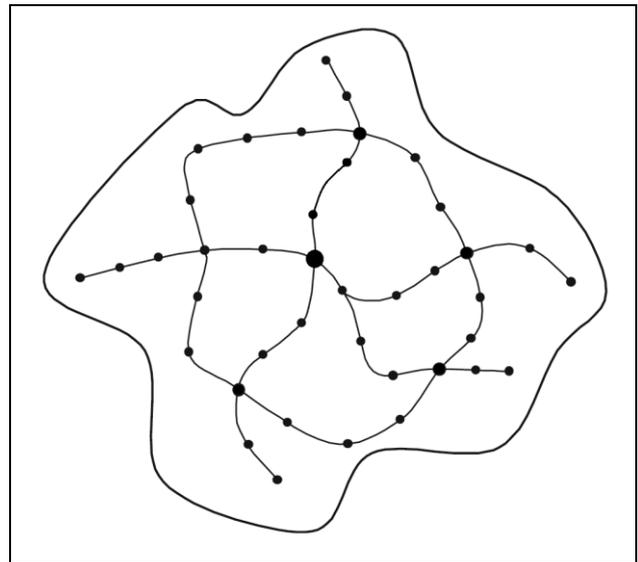


Optimale Haltestellen- und Linienabstände im Öffentlichen Verkehr

Optimal Stop and Line Spacing in Public Transport



Bearbeiter: cand.-B.Sc. Jörg Sonnleitner

Betreuer: M.Sc. Maximilian Hartl

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich

April 2014



vorgelegt an der

Universität Stuttgart

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

Zusammenfassung

Die Abstände zwischen einzelnen Haltestellen und Linien sind wesentliche Gestaltungsvariablen öffentlicher Verkehrsnetze. Sie beeinflussen Kosten für die Betreiber sowie die Reisezeit der Fahrgäste immens.

Zum einen bevorzugen Reisende sehr kurze Zugangswege zu Haltestellen, das Netz muss dafür dicht strukturiert, die Haltestellen- und Linienabstand klein sein. Zum anderen soll jedoch die benötigte Fahrzeit für die Ortsveränderung kurz sein, was bedeutet, dass auf dem Weg zum Ziel wenige oder sogar überhaupt keine Haltestellen angefahren werden sollen. Das Bedienen einer Haltestelle bedeutet für die sich bereits im Fahrzeug befindenden Passagiere ein Zeitverlust durch Bremsen, Ein- und Aussteigen anderer Fahrgäste und Beschleunigen. Der Haltestellenabstand sollte für einen Fahrgast nach dem Einstieg zur Erzielung einer kurzen Fahrzeit also möglichst groß sein. Die Wünsche der Reisenden nach minimalen Zugangswegen einerseits und kurzen Reisezeiten andererseits schließen sich gegenseitig aus und gestalten die Wahl des optimalen Haltestellenabstands schwierig.

Für die Betreiber ist ein grobmaschiges Netz kostengünstiger. Große Linienabstände reduzieren die Netzlänge und damit Kosten für die Infrastruktur. Größere Distanzen zwischen Haltestellen erhöhen die Beförderungsgeschwindigkeit und es müssen somit weniger Fahrzeuge unterhalten werden. Die Größen stehen damit im Konflikt der Interessen der beteiligten Parteien. Hier muss ein Kompromiss gefunden werden, um dieses Dilemma der Netzgestaltung handhaben zu können.

Grundlage für die Optimierung in dieser Arbeit ist ein Modell, bestehend aus einem Korridor mit parallel verlaufenden Linien und konstanten Haltestellendistanzen in einem Stadtgebiet. Reisezeit, Kosten, etc. werden in Abhängigkeit des Haltestellen- und Linienabstands vereinfacht berechnet. Für verschiedene Zielstellungen werden Funktionen hergeleitet und die zugehörigen optimalen Werte für die Netzgestaltungsvariablen Haltestellen- und Linienabstand bestimmt. Ein geeignetes Optimierungsziel ist das Maximieren der ökonomischen Wohlfahrt, da die Interessen von Betreibern und Reisenden vertreten werden. Die resultierenden optimalen Werte stehen unter starkem Einfluss dieser Zielwahl für die Optimierung.

Durch das Einpflegen klassischer Werte für die Abstände realer Verkehrsnetze ist eine Vergleichsmöglichkeit zu den - je nach Zielstellung - optimalen Netzen gegeben. Die Ergebnisse der Optimierung zeigen, dass die betriebsbedingten Kosten bei gleichzeitig geringfügigen Änderungen der Reisezeit und Nachfrage durch Anpassen der Haltestellen- und Linienabstände reduziert werden können. Einerseits steigt zwar die Zugangszeit für Reisende durch einen größeren Haltestellenabstand an, andererseits profitieren sie zusammen mit dem Betreiber aber hiervon, da die Fahrzeit kürzer und die Beförderungsgeschwindigkeit größer wird.

Abstract

Stop and line spacing are important design variables of public transport networks. They affect operational costs as well as the travel time of passengers immensely.

On the one hand travelers favour very short access routes to stops. The network has to be dense so that stop and line spacing are small. On the other hand in-vehicle time should be short. Therefore the vehicle should approach only a few or no stops at all so that losing time because of accelerating, boarding and alighting passengers and braking can be avoided. After boarding stop spacing should be wide in the interest of the traveler. In some extent traveler's wishes are mutually exclusive.

A coarse network is cost-saving for the operator. Large line spacing reduces network length and for this reason, the operator has to maintain less infrastructure. Larger stop spacing increases transportation speed so that less vehicles are needed. Hence the variables stand right in the middle of the conflicting interests of the parties involved. A compromise has to be found for the sake of handling the dilemma of network design.

The basis of optimization in this paper is a model consisting of a corridor with parallel lines and constant stop spacing in an urban area. Travel time, costs, demand and welfare are calculated simplified as a function of stop and line spacing. Adapting different objectives optimal values for these decision variables are determined. The chosen aim of maximizing economic welfare is well suited to represent the interests of both, the operator and the traveler. However the recommendations for the choice of these network design parameters are strongly influenced by the objective for optimization.

To achieve comparability traditional network parameters are added to the model as well. The results of the optimization show that the operational costs can be reduced significantly through adapting stop and line spacing. At the same time there are only minor changes in travel time and demand. Access time increases due to larger stop spacing but travelers as well as operators benefit from shorter in-vehicle time and higher transportation speed.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig verfasst habe und keine anderen Hilfestellungen oder Quellen als die angegebenen in Anspruch genommen habe.

Insbesondere habe ich keinen bezahlten Dienst mit der Anfertigung der gesamten Arbeit oder Teilen der Arbeit beauftragt.

Stuttgart, den 12.04.2014

Jörg Sonnleitner

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Grundlagen	5
2.1	Angebotsqualität	5
2.2	Reisezeit	5
2.2.1	Zugangszeit	6
2.2.2	Wartezeit	7
2.2.3	Beförderungszeit	8
2.2.4	Umsteigezeit	9
2.2.5	Abgangszeit	9
2.2.6	Empfundene Reisezeit	10
2.3	Kosten	10
2.3.1	Betreiber	10
2.3.2	Fahrgast	12
2.4	Ökonomische Wohlfahrt	12
3	Vorstellung bisheriger Optimierungen	14
3.1	Übersicht	14
3.2	Saka (2001): „Model for determining optimum bus-stop spacing in urban areas“	15
3.3	Khondaker & Wirasinghe (2013): „Bus stop spacing and location for a corridor with multiple bus routes“	18
3.4	Van Nes (2000): „Optimal stop and line spacing for urban public transport networks“	22
3.5	Schäffeler (2004): „Netzgestaltungsgrundsätze für den öffentlichen Personennahverkehr in Verdichtungsräumen“	25
3.6	Furth & Rahbee (2000): „Optimal bus stop spacing through dynamic programming and geographic modeling“	28
4	Modell	32
4.1	Reisezeit	33
4.2	Nachfrage	34
4.3	Kosten & Einnahmen	35

4.4	Wohlfahrt	36
4.5	Systemparameter	37
5	Anwendung	40
5.1	Zielstellungen	40
5.2	Optimierung	41
5.2.1	Minimieren der empfundenen Reisezeit	41
5.2.2	Maximieren des Gewinns	43
5.2.3	Maximieren der ökonomischen Wohlfahrt	44
5.2.4	Minimieren der Gesamtkosten	45
5.2.5	Ergebnisübersicht	46
5.3	Sensitivitätsanalyse	49
5.3.1	Minimieren der empfundenen Reisezeit	52
5.3.2	Maximieren des Gewinns	52
5.3.3	Maximieren der ökonomischen Wohlfahrt	53
5.3.4	Minimieren der Gesamtkosten	54
5.3.5	Fazit	55
6	Zusammenfassung	57
7	Abkürzungsverzeichnis	59
8	Tabellen- und Abbildungsverzeichnis	60
9	Literaturverzeichnis	62
10	Anhang	64

1 Einleitung

Die Struktur eines öffentlichen Verkehrsnetzes hat großen Einfluss auf dessen Eigenschaften wie Leistungsfähigkeit, Erreichbarkeit und somit einhergehend auch die Wettbewerbsfähigkeit. Der Netzaufbau bestimmt damit, zusammen mit dem Fahrplan, die Qualität des Angebotes, das der Öffentliche Verkehr einem Reisenden zur Verfügung stellen kann.

Die Netzstruktur wird sowohl durch Anordnung und Anzahl der Linien, als auch durch die Positionierung und Anzahl der Haltestellen entlang einer Linie bestimmt. Geringe Haltestellenabstände haben einerseits kürzere Weglängen zu und von den Haltestellen, andererseits längere Fahrzeiten, da die Fahrzeuge häufiger anhalten, abbremsen und beschleunigen müssen, zur Folge. Eine niedrigere Beförderungsgeschwindigkeit bedarf einer größeren Fahrzeugflotte, wenn die Bedienungshäufigkeit konstant bleiben soll, und damit steigen wiederum die Kosten für den Betreiber.

Ein kleiner Linienabstand wirkt sich ebenfalls positiv auf die Zu- und Abgangszeit aus. Kleinere Abstände erhöhen die Linienanzahl und es wird dadurch seltener für Reisende nötig sein, umzusteigen. Ein dichteres Netz bedeutet jedoch gleichzeitig, dass die Kosten für die nötige Infrastruktur und den Betrieb steigen, da die Gesamtlinienlänge wächst und mehr Fahrzeuge benötigt werden.

Es kommt also zwangsläufig bei der Wahl der jeweils zu verwendenden Abstände zwischen Haltestellen oder Linien zu einem Interessenkonflikt zwischen Fahrgästen und Betreibern des öffentlichen Verkehrssystems. Für die Optimierung ist es unverzichtbar, Kriterien zu finden, mithilfe derer sich Zielstellungen formulieren und Funktionen aufstellen lassen. Dabei gibt es die Möglichkeit, das Netz nur für eine Interessengruppe optimal auszulegen, oder eine Lösung, die die Wünsche von Betreibern und Reisenden berücksichtigt, umzusetzen.

Es gilt zu untersuchen, wie Haltestellen- und Linienabstände jeweils genau Reisezeit, und Kosten beeinflussen, ob es optimale Werte für diese Größen gibt und inwiefern diese von gewählten Optimierungskriterien abhängen.

Zunächst werden allgemeine Begriffe für das nötige Verständnis erläutert. Was sind die Merkmale eines guten Angebots des öffentlichen Verkehrs? Aus welchen Teilen setzt sich die Tür-zu-Tür Reisezeit zusammen? Welche Kosten entstehen für Reisende oder Betreiber? Diese und weitere Fragen werden im Kapitel 2 beantwortet.

Im Anschluss wird der aktuelle Stand der Forschung zum Thema aufbereitet. Dabei werden verschiedene Ansätze zur Ermittlung optimaler Haltestellen- und Linienabstände vorgestellt und erläutert. Eine wichtige Rolle spielen dabei die verwendeten Modelle, getroffene Annahmen sowie Zielstellungen, nach denen optimiert wird, zu finden in Kapitel 3.

Mithilfe eines in Kapitel 4 entwickelten Modells wird die Problemstellung greifbar gemacht. Im darauf folgenden Kapitel werden Zielstellungen erarbeitet und anhand derer erfolgen jeweils Optimierungen eines Beispielnetzes. Eine variable, angebots-abhängige Nachfrage spielt dabei für einige Fälle eine bedeutende Rolle. Die Verwendung verschiedener Optimierungskriterien ermöglicht es, Lösungen besser einordnen und bewerten zu können.

Schlussendlich wird in einer Sensitivitätsanalyse in Kapitel 6 die Wirkung einiger angenommener Größen auf die Optima genauer untersucht. Es können dabei Wertebereiche für Parameter getestet werden, deren Angabe sich als schwierig erweist oder für die starke Vereinfachungen der Situation in der Realität nötig sind.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst allgemeingültige Zusammenhänge und Formeln für ein besseres Verständnis der Problemstellung hergeleitet. Es soll deutlich werden, wie und aus welchen Teilen sich die Tür-zu-Tür-Reisezeit zusammensetzt und wie sich diese Anteile berechnen lassen. Die Angebotsqualität, die diverse Kriterien umfasst wird ebenso näher untersucht. Zuletzt werden die Kosten betrachtet, die durch die Nutzung des öffentlichen Verkehrs aufseiten der Betreiber, aber auch aufseiten der Kunden entstehen.

2.1 Angebotsqualität

Die Angebotsqualität zeichnet sich unter anderem durch folgende Merkmale aus (Europäisches Komitee für Normung, 2001):

- Örtliche Verfügbarkeit
- Zeitliche Verfügbarkeit
- Reisezeit (inklusive Zuverlässigkeit)
- Sicherheit
- Komfort
- Information

Diese Kriterien bestimmen die Wettbewerbsfähigkeit des öffentlichen Verkehrs und damit auch die Nachfrage, die dafür erzeugt werden kann. Von großer Wichtigkeit für die Betrachtungen in dieser Arbeit sind die örtliche Verfügbarkeit und die Reisezeit. Ersteres ist direkt beeinflusst durch Haltestellenabstände D_s und Linienabstände D_l : je kleiner diese Größen, desto dichter das Netz und desto besser auch die örtliche Verfügbarkeit, da sozusagen an jeder Kreuzung eine Haltestelle zu finden ist. Der Einfluss auf die Reisezeit wird im nächsten Kapitel klar.

Indirekt kann auch die zeitliche Verfügbarkeit von Haltestellen- und Linienabständen beeinflusst werden, wenn von konstanten Kursfahrzeugdichten ausgegangen wird und die Frequenz damit unter anderem von diesen Größen abhängt. Näheres dazu wird in Kapitel 3.5 erläutert.

2.2 Reisezeit

Die Reisezeit, auch Tür-zu-Tür-Reisezeit genannt, ist die Zeit, die ein Reisender benötigt, um von einem Ort A zu einem Ort B zu gelangen. Wird dieser Weg, beispielsweise von Wohnort zu Arbeitsplatz, mit öffentlichen Verkehrsmitteln zurückgelegt, muss der Reisende zuerst zu einer Haltestelle gelangen, von der aus er ein öffentliches Verkehrsmittel wie Bus oder Bahn nutzen kann. Daraufhin fährt derjenige

idealerweise bis zur Haltestelle, die seinem Ziel am nächstgelegenen ist, um dann auszusteigen und den restlichen Weg bis zum Zielort zu Fuß zurückzulegen. Wenn erforderlich, muss der Reisende auch umsteigen, um zu einer günstig gelegenen Haltestelle zu kommen.

Die Reisezeit T_t setzt sich also aus folgenden Elementen zusammen:

- Zugangszeit T_a
- Wartezeit T_w
- Beförderungszeit T_c
- Umsteigezeit T_u
- Abgangszeit t_e

2.2.1 Zugangszeit

Die Zugangszeit lässt sich mit der Kenntnis von der Weglänge vom Startpunkt zur nächstgelegenen Haltestelle, dem Anmarsch- oder Zugangsweg D_a , und der Fußgängergeschwindigkeit v_a relativ einfach berechnen.

$$T_a = \frac{D_a}{v_a}$$

Die Tatsache, dass der Reisende die Haltestelle wählt, zu der der Weg am kürzesten ist, beruht auf der Annahme, dass derjenige ortskundig ist und die nötigen Wege kennt.

D_a steht also für die tatsächliche Fußweglänge, die zurückgelegt werden muss, die in den seltensten Fällen der Luftlinienentfernung entspricht. Häufig lässt sich in Wohngebieten eine rasterförmige Anordnung der Straßen samt Gehwegen erkennen, was bedeutet, dass jener Weg zu einer Haltestelle zum Großteil aus Wegen parallel und senkrecht zur Linie zurückgelegt wird. Dieser Sachverhalt ist beispielhaft auf Abbildung 1 gut zu erkennen.

Es ist klar, dass mit steigenden Haltestellen- und Linienabständen auch der durchschnittliche Anmarschweg in einem Gebiet wächst. Somit sind beide Größen relevant für die Zugangszeit.

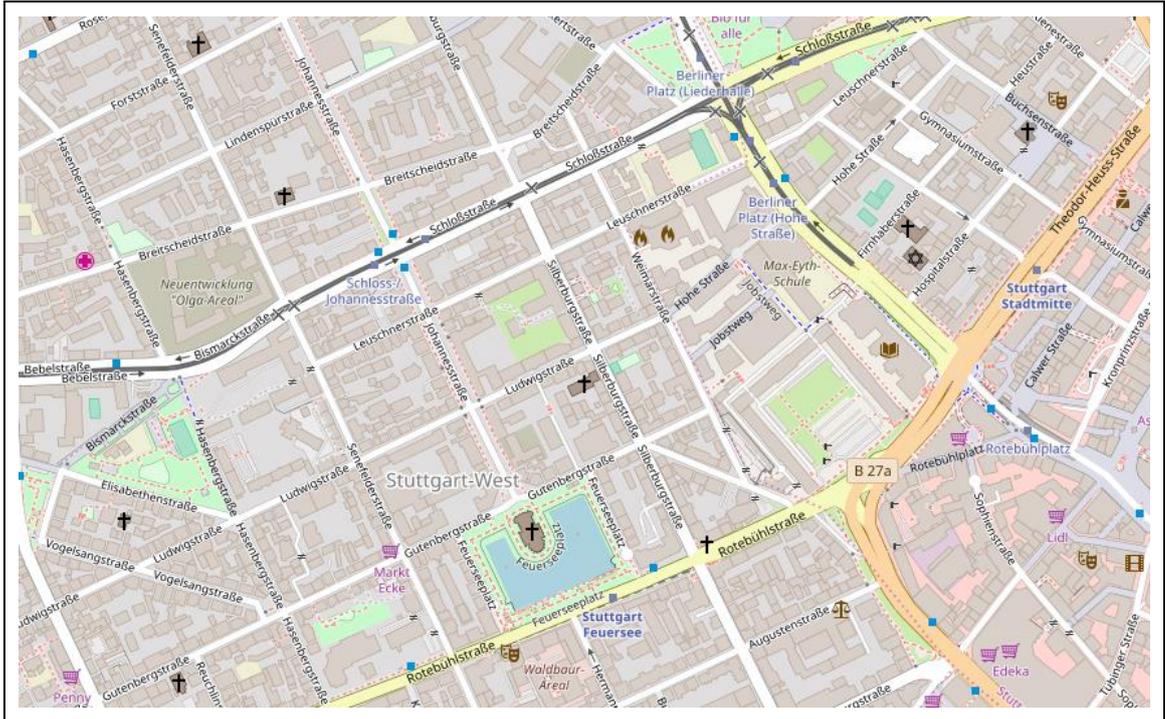


Abbildung 1: Ausschnitt aus dem Stadtgebiet Stuttgarts: gitterförmige Anordnung der Straßen (OpenStreetMap, 2014).

2.2.2 Wartezeit

An der Haltestelle angekommen gilt es darauf zu warten, bis das nächste Fahrzeug eintrifft, das den Reisenden möglichst ohne umzusteigen zur Zielhaltestelle bringt. Die Wartezeit T_w hängt dabei zum einen davon ab, ob der Fahrgast den Abfahrtsplan kennt und sich gezielt auf eine bestimmte Abfahrtszeit hin zur Haltestelle begibt, und zum anderen, wie oft die Haltestelle angefahren wird. Letzteres lässt sich mithilfe der Frequenz F ausdrücken, die angibt, wie viele Fahrzeuge pro Zeiteinheit einen Halt bedienen. Ist diese konstant, lässt sich die Kursfolgezeit, also die Zeit zwischen zwei Abfahrten an einer Haltestelle, durch den Kehrwert der Frequenz berechnen.

$$T_k = \frac{1}{F}$$

Fahrplanunabhängige Reisende treffen zufällig an der Haltestelle ein. Sie kennen den Fahrplan nicht oder kümmern sich nicht darum (Lüthi, 2005). Die Wartezeit beträgt dann durchschnittlich die Hälfte der Kursfolgezeit (Schäffeler, 2004).

$$T_w = \frac{T_k}{2}$$

Fahrgäste, die sich gezielt zur Haltestelle begeben und die Abfahrtszeit des nächsten Kurses wissen, treffen dennoch in den meisten Fällen nicht exakt zur Abfahrtszeit ein, sondern müssen auch warten.

Gründe für diese Ungenauigkeit sind nach Lüthi (2005):

- Unzuverlässigkeit im Betrieb
- Unzuverlässige Anmarschdauer
- Ungenauigkeit der eigenen Uhr
- Person ist ortsunkundig
- Wichtigkeit der Tätigkeit am Ziel

In dieser Situation besteht ein anderer Zusammenhang zwischen Warte- und Kursfolgezeit, den Brändli & Müller (1981) herausgearbeitet haben:

$$T_{w,fahrplanabhängig} = 0,16 T_k + 1,7 \text{ min}$$

Ihnen zufolge gibt es bereits ab kleinen Kursfolgezeiten von ca. 7 min teils fahrplanabhängigen Fahrgastzufluss, dessen Anteil schließlich mit zunehmender Folgezeit ansteigt. Erst bei $T_k = 20 \text{ min}$ kennen alle eintreffenden Fahrgäste den Fahrplan. Die Verläufe beider Varianten zur Wartezeitberechnung sind in Abbildung 2 dargestellt.

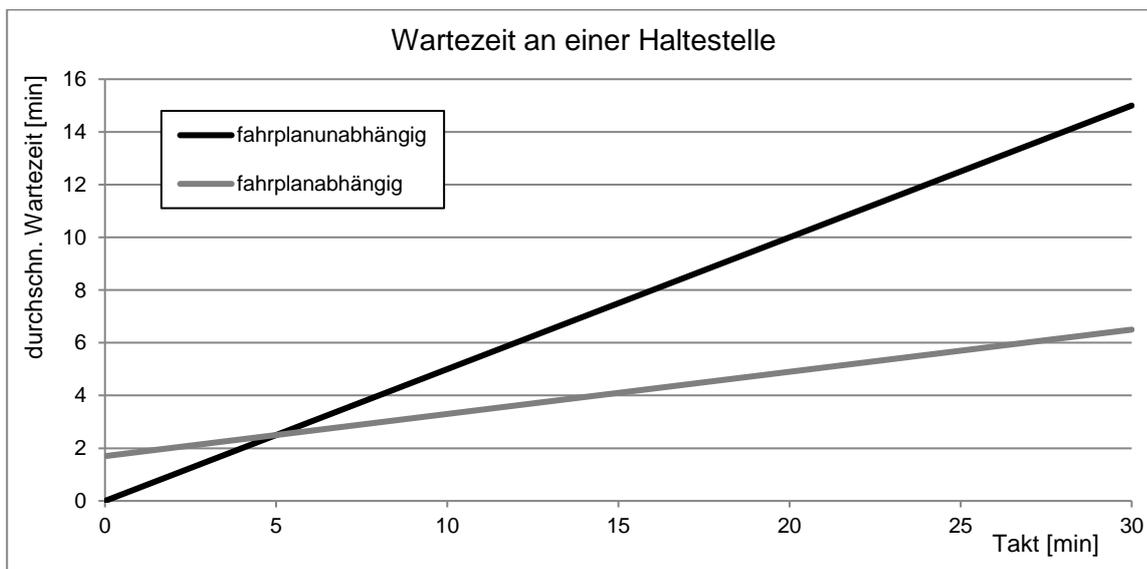


Abbildung 2: Wartezeitfunktionen für fahrplanabhängigen und fahrplanunabhängigen Fahrgastzufluss an einer Haltestelle.

2.2.3 Beförderungszeit

Die Beförderungszeit ist die Zeit, die von Einsteigen bis Aussteigen eines Reisenden vergeht. Sie hängt zum einen von der Reisedistanz, fortan als D_c bezeichnet, und zum

anderen von der Beförderungsgeschwindigkeit v_c ab. Diese Geschwindigkeit lässt sich mithilfe des Haltestellenabstands D_s und der Zeit T_s , die ein Fahrzeug von einer Haltestelle inklusive Bedienen zur nächsten benötigt, berechnen.

$$v_c = \frac{D_s}{T_s}$$

Die Beförderungszeit zwischen zwei Haltestellen T_s hängt wiederum vom Haltestellenabstand, der erreichbaren oder erlaubten Höchstgeschwindigkeit, der Beschleunigung, Bremsverzögerung, sowie der Standzeit des Fahrzeugs an der Haltestelle ab.

Damit ergibt sich insgesamt für T_c folgender Zusammenhang:

$$T_c = \frac{D_c}{v_c} = \frac{D_c}{D_s} T_s$$

2.2.4 Umsteigezeit

Ist es für einen Fahrgast nicht möglich, direkt durch eine Fahrt mit einem Fahrzeug zur Zielhaltestelle zu gelangen, ist Umsteigen unumgänglich. So besteht die Zeit für einen Umsteigevorgang in jedem Fall aus der Zeit, die man benötigt, um das Fahrzeug zu wechseln, also aus Aussteigen, eventuellem Wechseln des Gleises und wieder Einsteigen. Diese Zeit wird auch als Fahrzeugwechselzeit t_{FW} bezeichnet.

Dazu kommt, abhängig davon, ob die Fahrpläne der Linien, zwischen denen gewechselt wird, abgestimmt sind, noch die reguläre Wartezeit hinzu (Schäffeler, 2004). Ist die Koordination zwischen den Fahrplänen gegeben, entfällt ein zusätzliches Warten, und die Umsteigezeit besteht nur aus der Fahrzeugwechselzeit. Man spricht hier von einem Anschluss, der gegeben ist.

$$T_{U,Anschluss} = t_{FW}$$

Entsprechend wird die Umsteigezeit größer, wenn Fahrpläne der relevanten Linien nicht aufeinander abgestimmt sind und man in Abhängigkeit der Kursfolgezeit auf das nächste Fahrzeug warten muss.

$$T_U = t_{FW} + T_w$$

2.2.5 Abgangszeit

Die Abgangszeit t_e kann analog zur Zugangszeit bestimmt werden. Ist jedoch die Zielwahl vorgegeben, spielt der genaue Weg von der Zielhaltestelle zum Zielort keine

Rolle, da dieser für alle Reisenden im Beispielnetz identisch ist. Somit kann die Abgangszeit t_e als fix angenommen werden.

2.2.6 Empfundene Reisezeit

In der Reisezeit sind bereits einige Angebotsqualitätskriterien enthalten (Reisezeit, örtliche & zeitliche Verfügbarkeit). Daher lassen sich mit der Kenntnis um sie bereits tendenzielle Aussagen darüber treffen, auf welchem Niveau sich das Angebot des öffentlichen Verkehrs befindet. Allerdings geht aus einigen Untersuchungen hervor, dass die einzelnen Reisezeitelemente von den Fahrgästen differenziert wahrgenommen werden und dementsprechend verschieden stark gewichtet werden sollten (z.B. van der Waard (1988), Hoogendoorn-Lanser & Hoogendoorn (2002), van Nes (2000)).

Eine Gewichtung kann durch explizite Gewichtungparameter der Zeitanteile (van Nes, 2000) oder durch eine entsprechende Veränderung der Ausgangsvariablen geschehen. Hierzu kann beispielsweise durch Verringern der Fußgängergeschwindigkeit dem Anmarschweg, und damit der Zugangszeit, mehr Bedeutung beigemessen werden (Schäffeler, 2004). Reisende empfinden beispielsweise die Zugangszeit als länger wie die Wartezeit, welche wiederum als länger wie die Fahrzeit wahrgenommen wird (van der Waard (1988), Hoogendoorn-Lanser & Hoogendoorn (2002), van Nes (2000), Schäffeler (2004)).

Die gewichtete Reisezeit hat also aus Sicht der Reisenden mehr Aussagekraft bezüglich der Angebotsqualität als die reine Reisezeit und spielt daher eine wichtige Rolle für Netzoptimierungen im öffentlichen Verkehr.

2.3 Kosten

Dieser Abschnitt erläutert, mit welchen Kosten beziehungsweise Kostenarten sich Betreiber und Fahrgäste konfrontiert sehen.

2.3.1 Betreiber

Der Betreiber eines öffentlichen Verkehrssystems hat es mit verschiedenen Kostenarten zu tun. Noch vor dem laufenden Betrieb sind viele Investitionen für die nötige Infrastruktur notwendig. Hier gibt es teilweise Unterschiede, je nachdem ob es sich um einen Bus- oder Bahnbetrieb handelt.

Für den Busbetrieb müssen Haltestellen mit Schildern und Markierungen auf den Straßen die Haltestellen gekennzeichnet, eventuell sogar überdacht werden. Es kann teilweise auch erforderlich sein, separate Parkbuchten für die Busse anzulegen.

Für den Betrieb mit Bahnen sind Schienen nötig, die entweder im Mischbetrieb mit dem Individualverkehr auf der Straße oder aber bei einem unabhängigen Bahnkörper im Schienenbett verlaufen. Der Fahrweg muss außerdem ausreichend mit Signalen ausgestattet sein, möglicherweise sind an manchen Stellen Schranken zu errichten. Eine Stadtbahnlinie kann auch unterirdisch verlaufen, was nochmals große Investitionen im Bereich Tunnelbau mit sich zieht. Nicht zuletzt werden eigene Haltestellen benötigt, die überdacht und mit Fahrscheinautomaten ausgestattet sein können. Für den Antrieb muss ein Energieversorgungsnetz eingerichtet werden.

Unabhängig von der eingesetzten Fahrzeugart werden schließlich auch die Fahrzeuge selbst benötigt. Je größer das bediente Verkehrsnetz, desto größer wird auch die Fahrzeugflotte sein müssen, vorausgesetzt die Bedienungshäufigkeit sinkt nicht erheblich.

Sind diese einmaligen Investitionen getan, bleiben die laufenden Kosten. Diese beinhalten hauptsächlich Personal-, Wartungs- und Unterhaltungskosten. Die Infrastruktur und Fahrzeuge müssen gewartet, bei Ausfall repariert und auf lange Sicht auch, den Sicherheitsstandards entsprechend, erneuert oder aufgerüstet werden. Für den Betrieb respektive Antrieb müssen die Fahrzeuge mit Energie in Form von Strom oder fossilen Brennstoffen versorgt werden.

Auf die laufenden Kosten, weiterhin als Betriebskosten bezeichnet, haben die Abstände der Haltestellen und Linien einen direkten Einfluss, denn diese bestimmen, zusammen mit der Frequenz der Linien, die Anzahl der sich im Einsatz befindenden Fahrzeuge in einem Gebiet. Die Betriebskosten sind nach Schöffeler (2004) und van Nes (2002) proportional zu dieser Zahl, Kursfahrzeugdichte Z genannt, die selbst proportional zur Frequenz und zum Kehrwert des Linienabstands ist.

Werden Haltestellen häufiger bedient, sinkt der Abstand zwischen den Fahrzeugen und es sind mehr pro Flächeneinheit im Einsatz.

$$Z \sim F$$

Der Linienabstand bestimmt die Netzdichte und die Gesamtlinienlänge. Ein geringerer Abstand geht Hand in Hand mit einer höheren Linienanzahl und damit auch mehr Fahrzeugen, die diese Linien bedienen.

$$Z \sim \frac{1}{D_l}$$

Der Haltestellenabstand beeinflusst die Kursfahrzeugdichte über die Beförderungsgeschwindigkeit V_c . Je kleiner diese ist, desto mehr Fahrzeuge werden für den Betrieb benötigt, vorausgesetzt es soll eine vernünftige Bedienungshäufigkeit bestehen bleiben. Damit ergibt sich schließlich insgesamt für die Kursfahrzeugdichte des einstündigen Betriebs in eine Richtung auf einer Fläche R folgender Zusammenhang:

$$Z = \frac{R}{D_l D_s} F T_s$$

2.3.2 Fahrgast

Die Kosten für einen Fahrgast belaufen sich zum einen auf den Preis für ein Ticket für die gewählte Fahrt und zum anderen indirekt auf die Zeit, die investiert wird, um von A nach B zu kommen. Diese Zeitdauer kann mithilfe eines Umrechnungsfaktors monetarisiert werden. Dieser Faktor ist unter dem Begriff Zeitwert bekannt und erhält das Kürzel c_t . Der Zeitwert gibt an, wie viel Geld einem Fahrgast eine Stunde wert ist, hier dementsprechend eine Stunde der Reisezeit.

In der Literatur gibt es viele Angaben dieses Wertes und damit verbunden auch Unstimmigkeiten. Nachvollziehbar ist jedenfalls, dass der Zeitwert von vielen Faktoren abhängt wie dem Einkommen der Person, dem Zweck der Fahrt etc. Da eine einkommens- oder fahrtzweckabhängige Betrachtung nicht Hauptbestandteil dieser Arbeit ist, wird später mit einem festen Wert gearbeitet, der in der Erläuterung der Modelleigenschaften begründet ist.

2.4 Ökonomische Wohlfahrt

Van Nes (2000) führt die ökonomische Wohlfahrt als berechenbare Größe zum Ausdruck der Interessen der Öffentlichkeit ein. Sie ist definiert als die Summe von Produzenten- und Konsumentenrente (Vimentis Lexikon, 2014). Diese Begriffe aus den Wirtschaftswissenschaften drücken den Nutzen für Produzenten und Konsumenten aus, den die Parteien haben, wenn sich auf dem Markt Angebot und Nachfrage für ein Gut treffen.

Auf der Seite des Produzenten, der hier dem Betreiber des öffentlichen Verkehrssystems entspricht, ist der Nutzen der Gewinn, der erzielt wird: Einnahmen durch Fahrscheinverkäufe abzüglich der Kosten, die entstehen.

Die Konsumentenrente ist die Summe der Vorteile aller Reisenden, welche das Angebot den öffentlichen Verkehr für eine Ortsveränderung zu nutzen auch für höhere Kosten im Sinne von längerer Reisezeit oder höheren Preisen für Fahrscheine in Anspruch genommen hätten. Der jeweilige Nutzen oder Vorteil besteht dann in der Differenz der noch akzeptierten Kosten zu den tatsächlich entstehenden Kosten.

Anschaulich dargestellt in Abbildung 3 ist die Konsumentenrente die graue Fläche unter der Nachfragekurve. Diese Fläche repräsentiert alle Zeitersparnisse der Reisenden, die sich bei einer längeren Reisezeit nicht für einen anderen Verkehrsmodus entschieden hätten.

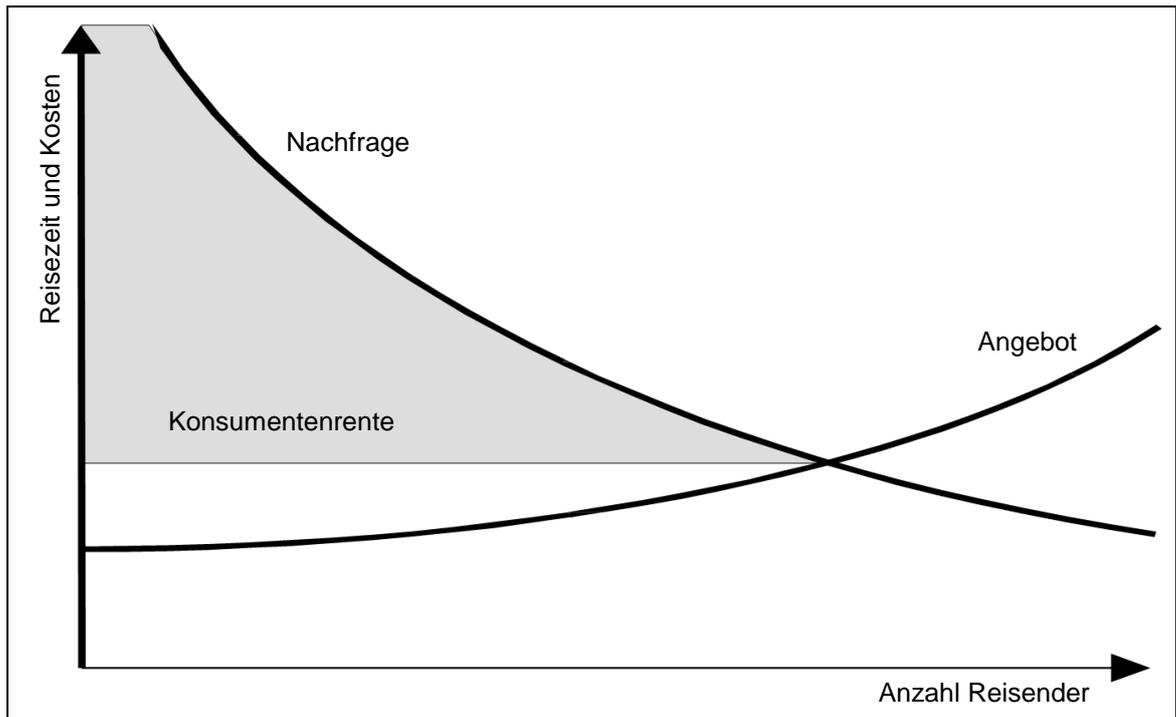


Abbildung 3: Die Konsumentenrente als Fläche dargestellt, abhängig von Angebot und Nachfrage; nach (van Nes, 2000).

Da sie den Nutzen für die beiden Parteien Reisende und Betreiber, die gegensätzliche Interessen verfolgen, enthält, hat die ökonomische Wohlfahrt als Größe reichliches Potenzial dazu, ein Kriterium für eine Optimierung eines Verkehrsnetzes zu sein.

3 Vorstellung bisheriger Optimierungen

Bestandteil dieses Kapitels ist die Vorstellung einiger der zahlreichen Publikationen aus dem Bereich der Verkehrsplanung, die sich mit dem Bestimmen optimaler Haltestellen- und Linienabstände befassen. Durch die Analyse verschiedener Quellen wird ein Überblick über den Forschungsstand geboten.

Für jede dieser Arbeiten werden jeweils getroffene Annahmen, Vorgehensweisen, Optimierungsziele und Erkenntnisse erläutert und, wenn für das Verständnis hilfreich, dargestellt. Auf diese Weise werden Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden deutlich und es kann mithilfe dieses Wissens ein geeigneter Optimierungsansatz für die spätere Anwendung ausgesucht werden.

3.1 Übersicht

Ein Überblick über die fünf im Folgenden besprochenen Arbeiten ist in Form der Auflistung der entsprechenden Autoren samt behandelter Fragestellungen in Tabelle 1 zu finden.

Autoren	In der Arbeit untersuchte Größe(n)
Saka (2001)	Haltestellenabstand
Khondaker & Wirasinghe (2013)	Haltestellenabstand
van Nes (2000)	Haltestellen- und Linienabstand
Schäffeler (2004)	Haltestellen-, Linienabstand und Frequenz
Furth & Rahbee (2000)	Haltestellenstandorte

Tabelle 1: Auflistung der Autoren mit untersuchten Fragestellungen.

In Saka's (2001) Untersuchungen liegt das Augenmerk auf einer Buslinie, die solche Haltestellenabstände aufweisen soll, sodass ein leistungsfähiger Betrieb bei gleichzeitig minimaler Flottengröße möglich ist. Khondaker & Wirasinghe (2013) befassen sich mit einem Korridor, in dem mehrere Buslinien verkehren und sich gegenseitig auch behindern können. Die umfangreichste Analyse liefert van Nes (2000), der versucht, unter verschiedenen Gesichtspunkten nicht nur optimale Haltestellen-, sondern auch optimale Linienabstände zu finden. Dabei unterscheidet er jedoch zwischen Verkehrssystemen mit Bussen und solchen mit Bahnen. Einen ähnlichen Modellaufbau verwendet Schäffeler (2004), der vor allem Zusammenhänge zwischen den von ihm als „Netzgestaltungsvariablen“ bezeichneten Größen, zu denen eben auch die Frequenz gehört, aufzeigt. Furth & Rahbee (2000) machen es sich zum Ziel, konkrete Haltestellenstandorte für Buslinien zu bestimmen, sodass die Gesamtkosten von Passagieren und Betreibern minimal werden.

3.2 Saka (2001): „Model for determining optimum bus-stop spacing in urban areas“

Die Betreiber eines öffentlichen Verkehrssystems sind daran interessiert, ihre Kosten zu minimieren. Andererseits bevorzugen Fahrgäste kurze Zugangswege. Daher wird als Ziel formuliert, geeignete Haltestellenabstände zu finden, bei denen die Anzahl der benötigten Fahrzeuge so gering wie möglich gehalten wird, aber die Zugangswege für die Fahrgäste nicht zu lang sind.

Angenommen wird, dass potenzielle Haltestellen über die Route gleichmäßig verteilt sind. Die erreichbare Höchstgeschwindigkeit eines Busses ist abhängig von der Distanz der Halte und begrenzt auf einen Maximalwert, der auch bei ausreichend großen Abschnitten nicht überschritten wird. Passagiere sind nicht dazu bereit, mehr als 800 m zu einer Haltestelle zu laufen. Saka bezieht sich dabei auf Untersuchungen von Pushkarev & Zupan (1975) und Pline (1992). Das führt zu einer modellmäßigen Obergrenze für den Haltestellenabstand von 1,6 km, da nur der Zugangsweg parallel zur Linie berücksichtigt wird. Als Besonderheit werden auch Zeitverzögerungen, verursacht durch Verkehrssignale wie Ampeln, in das Modell mit aufgenommen. Sekundäreffekte wie sonstige Verzögerungen bedingt durch den Verkehrsfluss, Stress des Fahrers, Verschleiß am Fahrzeug oder Ähnliches werden vernachlässigt.

Das Vorgehen besteht darin, die Reisezeit in Abhängigkeit der Zahl der Halte zu berechnen, um dann aus der Reisezeit mithilfe der Fahrzeugfolgezeit die benötigte Flottengröße zu bestimmen. Ausgehend von der Mindestanzahl der Haltestellen auf der betrachteten Reisedistanz, wird diese Anzahl nach und nach erhöht, bis ein Optimum erkennbar ist. Dies zeichnet sich dadurch aus, dass es die geringsten Haltestellenabstände bei der gleichzeitig kleinsten Flottengröße innehat. Die Mindestanzahl an Halten kann durch den vorher festgelegten Maximalabstand von 1,6 km bestimmt werden. Die Zahl der benötigten Fahrzeuge muss ganzzahlig sein, es wird also immer auf die nächsthöhere Ganzzahl aufgerundet. Durch Auswahl der geringsten Distanz zwischen Halten bei der minimalen Flottengröße wird der kürzest mögliche Anmarschweg für Reisende gewährleistet.

Die Reisezeit errechnet sich zu:

$$T_{bus} = T_{a,d} + T_s + T_c + T_o + T_m$$

mit

T_{bus}	gesamte Fahrzeit
$T_{a,d}$	Zeitanteil für Beschleunigen und Bremsen
T_s	Summe aller Haltezeiten
T_c	Signalbedingte Verzögerungen
T_o	Fahrzeit bei konstanter Geschwindigkeit
T_m	sonstige Verzögerungen durch Pausen, Wendemanöver, o.Ä.

Alle Anteile sind Summen der Zeitelemente über die gesamte Fahrt von Start- bis Endhaltestelle. Ein Zeitverlust durch sonstige Verzögerungen T_m wird nicht ins Modell mit aufgenommen. Auffällig ist, dass hier die Fahrzeit des Busses bestimmt wird, die Zugangszeit von Fahrgästen fließt an keiner Stelle mit ein.

Bei den Berechnungen wird auch unterschieden, um welche Art von möglichem Halt es sich handelt. So gibt es Haltestellen, die isoliert von Verkehrssignalen sind, Haltestellen an signalisierten Kreuzungen und auch signalisierte Kreuzungen ohne Haltestelle. Von der Art eines möglichen Haltes abhängig ist die Wahrscheinlichkeit, mit der der Bus tatsächlich anhält. Faktoren die dabei eine Rolle spielen, sind die effektive Dauer der Grünphasen sowie die Zeit, die der Bus für einen Umlauf braucht, für signalisierte Stellen.

$$\rho_c = \frac{C - g}{C}$$

mit

ρ_c	Wahrscheinlichkeit, an Ampeln stoppen zu müssen
C	Umlaufdauer
g	durchschnittliche Dauer der Grünphasen

Im Falle von Haltestellen sind es Nachfrage und Frequenz, die die Haltewahrscheinlichkeit ρ_s bestimmen.

$$\rho_s = 1 - (e^{-\lambda})^2$$

mit

$$\lambda = \frac{Q}{F(N_s + N_{s,c} + 1)}$$

und

Q	stündliche Nachfrage entlang der Route
F	Frequenz
N_s	Anzahl isolierter Haltestellen
$N_{s,c}$	Anzahl Haltestellen an signalisierten Kreuzungen

Ist die Fahrzeit des Busses für das Befahren der Route in eine Richtung bestimmt, lässt sich die benötigte Flottengröße n für den Betrieb in beide Richtungen mithilfe der Kursfolgezeit, die nach 2.2.2 der reziproke Wert der Frequenz ist, folgendermaßen berechnen:

$$n = \frac{2 T_{bus}}{T_k}$$

Anwendung findet die Methode am Beispiel der Optimierung einer Busroute in Baltimore City. Die nötigen Systemparameter werden auf verschiedenste Weise bestimmt. Beispiele hierfür sind die Dauern für das Öffnen und Schließen der Türen oder für das Ein- und Aussteigen eines Passagiers, deren Werte jeweils durch Beobachtungen gestützt auf 3 s festgelegt wurden. Manche Eingabegrößen sind durch die gegebene Linie bereits vorgegeben, wie die Routenlänge mit 12,5 km, die Kursfolgezeit mit 10 min oder die Anzahl signalisierter Kreuzungen N_c . Andere wiederum werden im Bezug auf frühere Untersuchungen festgelegt, wie z.B. die Beschleunigung von $0,5 \text{ m/s}^2$ und Bremsverzögerung von $2,0 \text{ m/s}^2$ (Pline, 1992). Weitere müssen sinnvoll geschätzt werden, wie beispielsweise die stündliche Nachfrage Q entlang der Linie.

Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise ist in Abbildung 4 ein Ausschnitt aus den Ergebnissen der Untersuchung für die Buslinie in Baltimore City dargestellt. Von dem Startwert des maximalen Haltestellenabstands von ca. 1,6 km aus wird die Anzahl der Haltestellen erhöht und zugleich die daraus entstehende Reisezeit sowie die Flottengröße bestimmt. Die Werte in Klammern ist der ganzzahlige Wert, der die nötige Anzahl an Bussen widerspiegelt. Das Optimum liegt bei einem durchschnittlichen Haltestellenabstand von 405 m, da dies der kleinste Wert ist, für den die nötige Flottengröße nicht gewachsen ist.

Average bus stop spacing, x_s (m)	Total number of bus stops, N	Terminal-to-terminal bus travel time (min)	Required fleet size, η (buses)
1,570	7	41.1	8.2 (9)
897	13	42.2	8.4 (9)
698	17	42.9	8.6 (9)
405	30	45.0	9.0 (9)
256	48	47.4	9.5 (10)
199	62	49.1	9.8 (10)
174	71	50.0	10.0 (10)
100	125	55.0	11.0 (11)

Abbildung 4: Ergebnistabelle der Untersuchung einer Buslinie in Baltimore City; Ausschnitt aus (Saka, 2001).

Das Vorgehen selbst ist also eine Sensitivitätsanalyse, in der die Auswirkungen der Variation der Anzahl möglicher Haltestellen erfasst werden.

Ein Nachteil des Verfahrens ist die Nichtberücksichtigung von möglichen Nachfrageänderungen, denn es wird angenommen, dass gleich viele Menschen den Bus als Fortbewegungsmittel wählen werden, gleichgültig ob sie 800 m oder 100 m zur nächstgelegenen Haltestellen zurückzulegen haben. Die Annahme, nur den Anteil des Fußweges parallel zur Linie zu berücksichtigen ist außerdem riskant, denn falls eine

relativ große Haltestellendistanz als für optimal befunden wird, übertrifft der reale Anmarschweg schnell den Grenzwert, den die Reisenden noch bereit sind, zu gehen. Wie lang der Weg senkrecht zu Linie tatsächlich für einen beliebigen Fahrgast ist, hängt natürlich auch stark von der Siedlungsstruktur in der Umgebung ab. Positiv zu bemerken ist die Berücksichtigung der Einflüsse durch Ampeln in der Fahrzeit und die geringe Komplexität der mathematischen Zusammenhänge.

Unter der Voraussetzung, dass genügend Informationen und Daten zu Nachfrage etc. vorhanden sind, können bestehende oder sich in der Planung befindliche Linien relativ einfach bewertet oder optimiert werden. Ausdrücklich weist Saka allerdings daraufhin, dass bei der Umsetzung ausreichend Toleranzen zu den optimalen Werten für den durchschnittlichen Haltestellenabstand eingeplant werden, da die Fahrzeit auch Einflüssen wie Wetter, Fahrer und Individualverkehr unterliege.

3.3 Khondaker & Wirasinghe (2013): „Bus stop spacing and location for a corridor with multiple bus routes“

Ziel der Arbeit ist es, für einen Korridor, den sich mehrere Buslinien teilen, wertvolle Erkenntnisse darüber zu erlangen, von welchen Größen optimale Haltestellenabstände wie beeinflusst werden. Dabei sollen sowohl Kosten auf Seiten des Betreibers, als auch auf Seiten der Fahrgäste berücksichtigt werden. Es kommen mehrere Modelle zum Einsatz, da verschiedene Ansätze verfolgt werden. Als Basis dient die Betrachtung einer einzigen Linie mitsamt allen Einflussfaktoren, später soll dieses Modell dann entsprechend verschiedener Annahmen erweitert werden. Eine wichtige Rolle soll die Zeit spielen, die benötigt wird, bis alle Passagiere eingestiegen sind. Es wird ein Ansatz angeführt, der den Zusammenhang zwischen Abwicklungsdauer und der Anzahl einsteigender Personen als linear annimmt, und einen, der davon ausgeht, dass diese Dauer exponentiell ansteigt. Schließlich wird auch noch das Szenario untersucht, in dem es möglich ist, dass Busse verschiedener Linien gleichzeitig eine Haltestelle bedienen wollen, und es daher zu Zeiverlusten kommt. Das Vorgehen ist für alle Ansätze kontinuierlicher Art: es gibt keine Einschränkungen für die Haltestellenorte. Sie könnten theoretisch überall auf der Linie platziert werden.

Die unterschiedenen Kostenarten, die für die Optimierung eine Rolle spielen und unter dem Einfluss der Haltestellenabstände stehen, sind:

- Kosten der Zugangszeit für Fahrgäste
- Kosten durch Fahrzeitverluste für Fahrgäste
- betriebsbedingte Kosten der Betreiber

Das Optimierungskriterium ist für alle Ansätze gleich: die Minimierung der Gesamtkosten. Dazu ist es unumgänglich, Faktoren einzuführen, mithilfe derer die einzelnen Zeiten in Kostenwerte umgerechnet werden können. Durch die Wahl verschiedener Zeitwerte lässt sich auch gleichzeitig eine Gewichtung erzielen, indem

man beispielsweise der Zugangszeit einen höheren Wert zuweist, diese aufgrund dessen einen größeren Anteil an den Gesamtkosten trägt und in der Folge an Bedeutung gewinnt. Die verwendeten Gewichtungswerte sind Tabelle 2 zu entnehmen. Die Zugangszeit wird deutlich stärker betont. Die Zeitkosten für eine normale Gewichtung betragen $10 \frac{\$}{h}$, für eine Anmarschdauer von einer Stunde demzufolge 28 \$.

Zeitelement	Zugang	Beförderung
Parameter	w_a	w_c
Wert	2,8	1,0

Tabelle 2: Gewichtungswerte für Zugangs- und Beförderungszeit.

Für die Berechnung der Zugangszeit wird angenommen, dass der durchschnittliche Anmarschweg ein Viertel des Haltestellenabstands ist, wobei alle Größen direkt in Abhängigkeit zum Ort x angegeben sind.

$$D_a(x) = \frac{D_s(x)}{4}$$

Für Fahrgäste, die entlang der betrachteten Route aussteigen, wird der Abgangsweg identisch bestimmt. Die Kosten in Form von Zeit, die ihnen entstehen, werden auch bei den Zugangskosten mitberücksichtigt.

Bei den Kosten für die Reisenden durch die Fahrzeit geht es nicht um die Fahrzeit selbst, sondern um die Zeitverluste, die die durchfahrenden Passagiere wegen eines Haltes hinnehmen müssen. Dieser Zeitverlust pro Haltestelle setzt sich aus drei Komponenten zusammen: die Zeitverluste durch Beschleunigen und Bremsen, die Zeit zum Öffnen und Schließen der Türen und die Dauer, die der Ein- und Aussteigevorgang in Anspruch nimmt.

Die Kosten für den Betreiber setzen sich aus einem Anteil für eine Haltestelle, nämlich Bau und Instandhaltung, und einem Anteil für die laufenden Kosten zusammen. Letzterer berechnet sich aus Anzahl bedienter Haltestellen, Fahrzeit zwischen zwei Haltestellen und einem Kostenfaktor, den Khondaker & Wirasinghe mit $70 \frac{\$}{h}$ angegeben haben.

Für die Optimierung in allen betrachteten Fällen wird angenommen, dass alle Busse jede Haltestelle bedienen und die Nachfrage gleichmäßig entlang der Route verteilt ist; dies gilt auch für Aussteigende. Die Nachfrage ist außerdem nicht variabel und damit unabhängig von der Angebotsqualität. Der Individualverkehr und jegliche Verkehrssignale haben keinen Einfluss. Für das Basismodell mit einer Linie, und der ersten Erweiterung mit mehreren Linien wird außerdem vorausgesetzt, dass niemals mehrere Busse gleichzeitig einen Halt bedienen wollen und die Zeit für den Ein- und Aussteigevorgang linear mit der Anzahl der entsprechenden Fahrgäste ansteigt.

Die optimale Haltestellendistanz kann dann durch partielles Ableiten der aufgestellten Gesamtkostenfunktion $Z(x)$ nach dem Haltestellenabstand, anschließendem Gleichsetzen mit Null und Auflösen nach $D_s(x)$ bestimmt werden:

$$\frac{\partial Z(x)}{\partial D_s(x)} \stackrel{!}{=} 0$$

Der Unterschied zum Fall mit mehreren Linien besteht nur darin, dass die entsprechende Gesamtkostenfunktion die einzelnen Kostenfunktionen jeder Linie in sich vereint. Die Kosten für jede Haltestelle an sich werden dabei gleichmäßig auf die einzelnen Linien aufgeteilt.

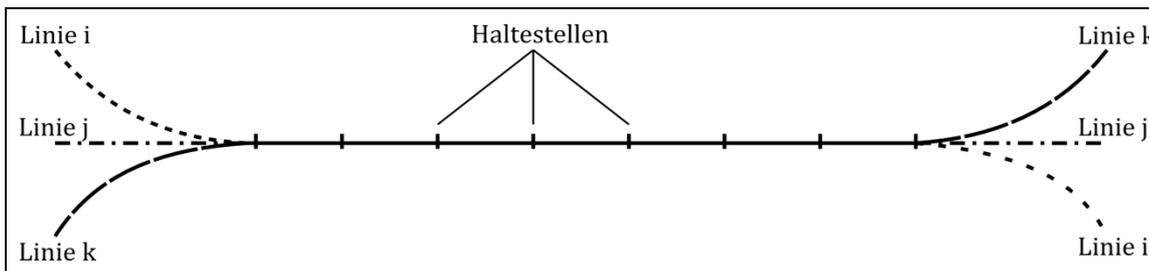


Abbildung 5: Von mehreren Linien befahrener Korridor in Anlehnung an (Khondaker & Wirasinghe, 2013).

Wie auf Abbildung 5 gut zu erkennen ist, bedienen alle Linien die gemeinsamen Haltestellen im Korridor.

Mit einigen numerischen Annahmen zur generellen Nachfrage und der Anzahl der Ein- und Aussteigenden auf der Route werden dann auch konkrete Ergebnisse erzielt. Die Schlüsse, die aus dem Fall mit mehreren Linien gezogen werden können sind:

- Steigt die Anzahl durchfahrender Passagiere, wächst auch der Haltestellenabstand
- Bei größeren Zeitverlusten pro Halt wird der Abstand ebenfalls größer
- Wächst die Anzahl Ein- und Aussteigender im Korridor, sinken die Abstände
- Wird der Umrechnungswert für die Zugangs- bzw. Abgangszeit als nahezu verschwindend angenommen, steigt der Haltestellenabstand enorm an ($D_s(x) \rightarrow \infty$). Das Zurücklegen einer Strecke ausschließlich zu Fuß bringt dann praktisch keine Kosten mehr mit sich, weswegen alle Reisenden gehen und niemand mehr den Bus wählt
- Der gemeinsame optimale Haltestellenabstand aller Linien auf der Route ist beinahe identisch wie der durchschnittliche Wert der optimalen Abstände der einzelnen Linien

Für die zweite Erweiterung wird ein exponentieller Ansatz gewählt, um die Zeit, die für das Ein- und Aussteigen der Fahrgäste benötigt wird, zu bestimmen. Nach Wirasinghe

& Vandeboba (1983) ist diese Variante für einen derartigen Korridor zutreffender, weil die Zahl der Ein- und Aussteigenden größer sei, als auf einer Route, die nur von einer Linie befahren wird. Diese Behauptung wird dadurch gerechtfertigt, dass die Nachfrage entlang der Route generell sehr hoch sein muss, sonst würde sie nicht von mehreren Linien bedient werden. Mit diesem Ansatz wird die Dauer für das Abwickeln des Einsteigevorgangs zunehmen. Ferner wird davon ausgegangen, dass im betrachteten Abschnitt Personen nur einsteigen, Busse ausreichend Kapazität für alle Passagiere haben und es zu keinen Behinderungen oder Verzögerungen durch andere Busse kommt.

In Abbildung 6 ist dieser nichtlineare Zusammenhang zwischen Einsteigenden und dem Zeitverlust für die Durchreisenden an einer Haltestelle zu erkennen. Die Funktion verwendet Parameter des von Cundill & Watts (1973) erstellten Modells zur Bestimmung der Zeitverluste durch einsteigende Passagiere am Beispiel von Bussen in London. Die Zeit, die durchfahrende Fahrgäste wegen einer Haltestelle verlieren, selbst wenn niemand einsteigt, ist auf Verluste durch Beschleunigen, Bremsen sowie Öffnen und Schließen der Türen zurückzuführen.

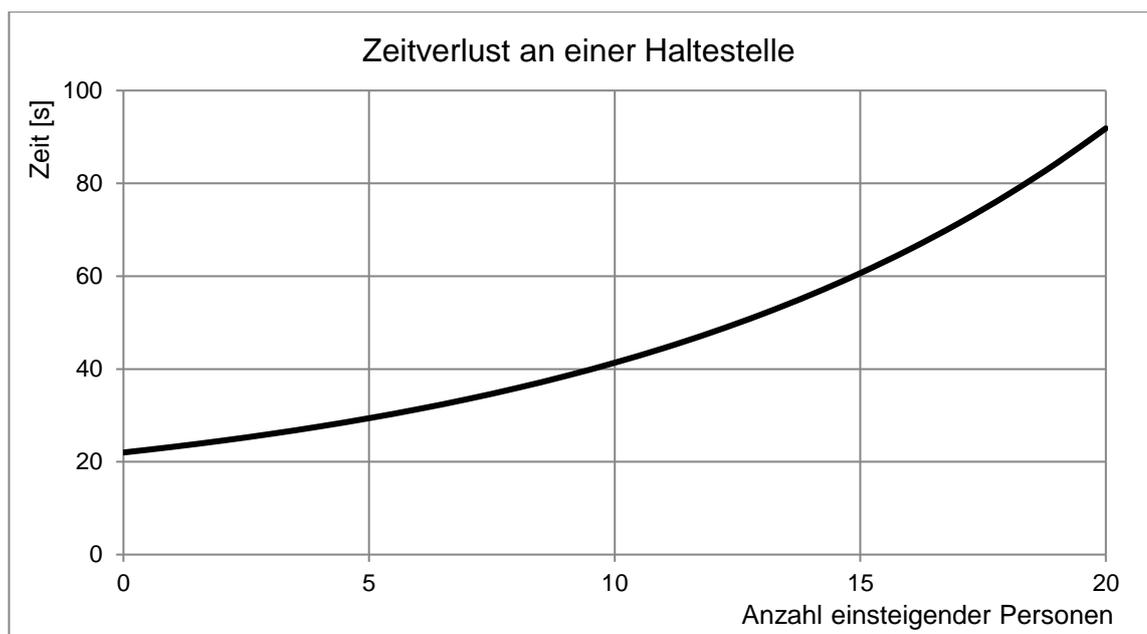


Abbildung 6: Exponentieller Verlauf des Zeitverlustes in Abhängigkeit der Anzahl einsteigender Fahrgäste; angelehnt an (Cundill & Watts, 1973).

Es resultiert ein geringerer optimaler Haltestellenabstand, der sich durch die stärkere Einflussnahme der einsteigenden Fahrgäste erklären lässt. Khondaker & Wirasinghe stellen fest, dass einerseits eine wachsende Nachfrage kleinere Abstände zur Folge hat, und andererseits größere, vom Einsteigevorgang unabhängige, Zeitverluste den Haltestellenabstand wiederum vergrößern.

Für die letzte Modellvariante wird wieder der lineare Zeitverlauf beim Einsteigevorgang verwendet. Nun wird durch explizite Angabe passender Frequenzen die Situation kreiert, dass Busse zur selben Zeit an einer Haltestelle eintreffen können. Typischerweise kommt es in der Hauptverkehrszeit dazu, dass laufend Busse an einem vielbefahrenen Streckenabschnitt an einer Haltestelle ankommen, und es deswegen unvermeidlich ist, dass manch ein Fahrzeug warten muss. Dies ist im Modell beispielhaft der Fall, wenn ein Bus der Linie 1 eine Fahrzeugfolgezeit von 20 *min* hat und ein Bus der Linie 2 eine von 10 *min* aufweist. Die Haltestellen sind so dimensioniert, dass immer nur ein Bus Platz findet und ein weiterer Bus daher die gesamte Haltezeit des ersten Busses abwarten muss. Der zweite Bus büßt also genau die Haltezeit des ersten Busses ein und kann dann erst einfahren um Passagiere aufzunehmen oder aussteigen zu lassen. Treffen mehr als zwei Busse zur gleichen Zeit ein, wird dieser Effekt noch deutlich verstärkt, was die Abstände wiederum größer macht.

Das Ergebnis dieses Ansatzes bei der gleichen Dateneingabe wie für die erste Erweiterung ist ein größerer Haltestellenabstand. Dieser kommt dadurch zustande, dass für jedes gleichzeitige Eintreffen von Bussen erhebliche Verzögerungen durch Warten entstehen und bei größeren Abständen auf einer Route weniger Haltestellen liegen, was die Anzahl dieser Beeinträchtigungen reduziert.

Eine mögliche Schwäche der verwendeten Ansätze ist das Vernachlässigen von Wartezeiten Reisender. Die Frequenzen auf den Linien spielen für die Berechnungen bis auf letzteren Fall keine Rolle. Des Weiteren wird bei den Modellen nicht bedacht, dass gleichzeitig Personen ein- und aussteigen können, da Busse in der Regel zwei Zustiegs- respektive Ausstiegsmöglichkeiten offerieren. Die Zeiten für den Einstiegs- und den Ausstiegsvorgang werden addiert.

Die Autoren präsentieren mit ihrer Arbeit einige Modelle, mithilfe derer sich Aussagen über die Einflüsse verschiedener Größen auf eine sinnvolle Distanz zwischen Haltestellen treffen lassen. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass gleichartige analytische Modelle entsprechend auf lokale Gegebenheiten und Bedingungen angepasst werden müssen, um nützliche Folgerungen schließen zu können.

3.4 Van Nes (2000): „Optimal stop and line spacing for urban public transport networks“

Van Nes befasst sich ausführlich mit der Optimierung der Haltestellen- und Linienabstände in einem von ihm entwickelten Modell. Dieses besteht aus zwei parallelen Verkehrslinien in einem Korridor, die beide zum Zentrum einer Stadt führen. Es wird davon ausgegangen, dass das Ziel aller Fahrten eben dieses Stadtzentrum ist. Die Haltestellenabstände entlang der Linien sind konstant. Der betrachtete Untersuchungszeitraum beläuft sich auf eine Spitzenverkehrsstunde.

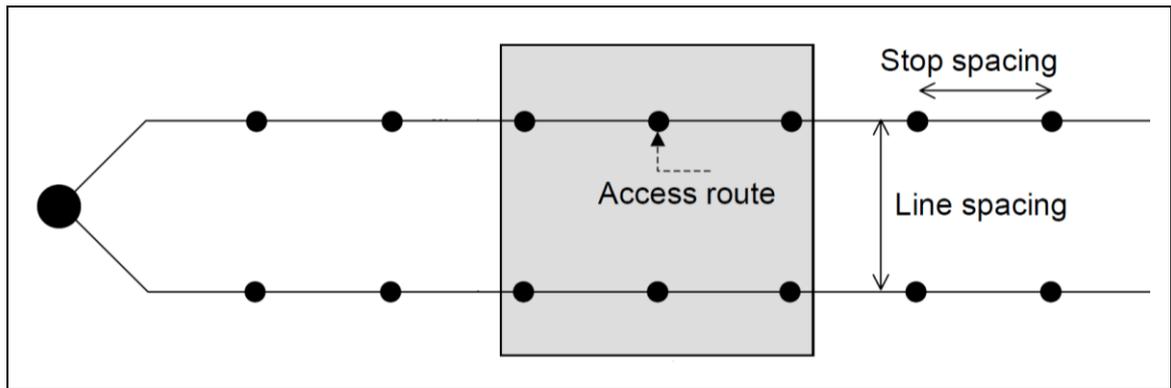


Abbildung 7: Aufbau des untersuchten Ausschnitts des öffentlichen Verkehrsnetzes (van Nes, 2001).

Zentrales Thema in der Arbeit sind die möglichen Optimierungskriterien, die sich aus den Interessen der drei Gruppen Reisende, Betreiber und Behörden ergeben. Die Ziele lauten:

- aus der Sicht der Reisenden
 1. Minimieren der gewichteten Reisezeit
 2. Minimieren der gewichteten Reisezeit bei einem vorgegebenen Budget
- vom Standpunkt der Betreiber aus
 3. Maximieren der Kosteneffizienz
 4. Maximieren des Gewinns
- und im Interesse der Behörden
 5. Maximieren der ökonomischen Wohlfahrt
 6. Minimieren des Gesamtkosten
 7. Maximieren der Nachfrage

Ziel Nr. 1 entspricht dem letzten formulierten Ziel, da die Nachfrage für eine minimale gewichtete Reisezeit maximal wird. Die Reisezeit setzt sich wie in Kapitel 2.2 beschrieben zusammen. Bei der frequenzabhängigen Wartezeit wird von fahrplanunabhängigem Fahrgastzufluss ausgegangen. Die Anmarschdistanz wird unter der Annahme, dass sich der Zugangsweg nur aus Strecken parallel und senkrecht zur Linie zusammensetzt, bestimmt. Je nach Zielstellung wird eine fest vorgegebene oder variable Nachfrage angenommen, in jedem Fall ist sie aber gleichmäßig im Einzugsgebiet verteilt. Im Falle einer angebotsabhängigen, also elastischen Nachfrage wird die Wahrscheinlichkeit, dass das öffentliche Verkehrssystem gewählt wird, durch ein Logit-Wahlmodell geschätzt. Dieses verwendet neben Koeffizienten auch die empfundenen Reisezeiten, die eine Person je nach Wahl des Verkehrsmodus unterwegs wäre. Die einzige Alternative zum Öffentlichen Verkehr bei der Moduswahl

ist die Ortsveränderung mit einem Automobil. Für die Kalkulierung der empfundenen Reisezeit werden die Reisezeitanteile mit unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren (siehe Tabelle 3) und einem festen Zeitwert, wie auch schon bei Khondaker & Wirasinghe (2013), multipliziert. Den Wert für die Berechnung der Zeitkosten für die Reisenden, in der damaligen Währung Niederländische Gulden (f_l), gibt van Nes mit $10 \frac{f_l}{h}$ an. Das ergibt umgerechnet etwa $4,5 \frac{\text{€}}{h}$ (DNB, 2014).

Zeitelement	Zugang	Warten	Beförderung	Abgang
Parameter	w_a	w_w	w_c	w_e
Wert	2,2	1,5	1,0	1,1

Tabelle 3: Gewichtung der Reisezeitelemente nach van Nes (2000).

Für die Interessen der Betreiber und die der Öffentlichkeit ist es auch notwendig, die Betriebskosten identifizieren zu können, sowie mögliche Einnahmen zu bestimmen. Dazu hat van Nes die Daten aus dem Jahresbericht eines Verkehrsunternehmens in Den Haag ausgewertet und mithilfe der Erkenntnisse von Erkens & Wiggeraad (1994) für das Modell geeignet aufbereitet. Das Ergebnis waren die Kosten pro Stunde, die die Fahrzeuge im Betrieb verursachen, sowie die Einnahmen durch Fahrscheinerlöse pro Passagier.

Bei der eingesetzten Fahrzeugart für den öffentlichen Verkehrsbetrieb wird zwischen Bus und Bahn differenziert. Abgeleitet von Städten in den Niederlanden werden klassische Werte aus traditionellen Verkehrsnetzen der Realität zu Vergleichszwecken angeführt. So können die Auswirkungen der, je nach Zielstellung, optimierten Netze direkt bewertet werden.

Das Ergebnis der Optimierung eines von Bussen befahrenen Netzes nach beispielsweise Ziel Nr. 6, dem Minimieren der Gesamtkosten, sieht vor, die Haltestellen- und Linienabstände fast zu verdoppeln. Im Vergleich zu einem klassischen Korridor einer niederländischen Stadt bewirkt dies deutlich geringere Betriebskosten, eine höhere Kosteneffizienz, aber nur verschwindend kleine Nachfrageverluste, da die gewichtete Reisezeit nur minimal zunimmt.

Van Nes erweitert seine Analyse schließlich auch auf den ganztägigen Ablauf, mit dem Ergebnis, dass, abgesehen von den Frequenzen, auch Haltestellen- und Linienabstände für ein optimales Netz den unterschiedlichen Nachfragen je nach Tageszeit angepasst werden müssten. Meist bleibt doch nur die Möglichkeit, den unterschiedlichen Bedingungen innerhalb eines Tages durch Anpassen der Bedienungshäufigkeiten gerecht zu werden.

In einer anderen Betrachtung untersucht van Nes ein Szenario, in dem Reisende nicht nur zu Fuß, sondern auch mit dem Fahrrad den Weg zu Haltestellen zurücklegen können. Je nachdem, wie viele Menschen sich für das Fahrrad als Zugangsalternative

entscheiden, steigt die durchschnittliche Zugangsgeschwindigkeit an, was zu grobmaschigeren Netzen führt. Letztlich lassen sich Reisezeit und Betriebskosten dadurch enorm senken. Allerdings bestehen Unsicherheiten darüber, wie groß der Anteil der Fahrgäste wirklich ist, die tatsächlich das Fahrrad als Zugangsmodus wählen würden. Hier besteht mitunter also weiterer Forschungsbedarf.

Durch die große Anzahl untersuchter Optimierungskriterien und der Berücksichtigung verschiedener Fahrzeugarten wird van Nes' Arbeit zu einer der umfangreichsten ihres Themengebietes. Zusammenhänge werden klar und übersichtlich herausgearbeitet und daher eignet sie sich gut als eine Art Leitfaden für die spätere Anwendung.

3.5 Schöffeler (2004): „Netzgestaltungsgrundsätze für den öffentlichen Personennahverkehr in Verdichtungsräumen“

In seiner Dissertation hat Schöffeler es sich zum Ziel gemacht, weniger konkrete Werte, sondern vielmehr wichtige Zusammenhänge in der Netzgestaltung zu ermitteln.

Der betrachtete Ausschnitt eines Netzes ist wie bei van Nes (2000) ein Korridor, bei dem die Strecken parallel zueinander verlaufen. Haltestellenabstände und Kursfolgezeiten im Netz sind konstant. Die wichtigsten Unterschiede zur von van Nes (2000, 2002) verwendeten Methodik sind:

- Keine Unterscheidung zwischen Fahrzeugarten
- Keine endgültigen optimalen Werte → kein Vergleich zu traditionellen Netzen
- Abbilden der variablen Nachfrage mithilfe von Nutzenfunktionen
- Einbeziehen aller möglichen Anmarschwege in Einzugsgebiet
- Darlegen der Betriebskosten nur durch Kursfahrzeugdichte
- Außer Acht lassen von Einnahmen durch Fahrscheinerlöse o.Ä.
- Keine Monetarisierung der Zeitkosten Reisender
- Berücksichtigen des Betriebs nur in eine Richtung

Damit scheiden Kriterien wie das Maximieren des Gewinnes der Betreiber oder die Maximierung der ökonomischen Wohlfahrt für eine Optimierung automatisch aus. Als bereits festgelegte Eingabegröße geht der Haltestellenabstand mit 600 m ein, der nach Schöffeler (1999) optimal ist. Untersucht wird dann das Verhältnis von Kursfolgezeit zu Linienabstand, sowie welche Kursfahrzeugdichte damit einhergeht.

Als ersten Optimierungsansatz ausgewählt wird das Maximieren der objektiven Attraktivität. Dabei wird die Nachfrage als unelastisch angenommen und die Reisezeit ist ungewichtet. Der Anmarschweg wird hier noch als durchschnittlich vorgegeben und setzt sich wie bei van Nes zusammen. Das Ergebnis, zu sehen in Abbildung 8, ist ein einfach proportionaler Zusammenhang, der von der Anmarschgeschwindigkeit v_a und

der Struktur des Zugangsweges D_a abhängt. Das Optimum für jede vorgegebene Kursfahrzeugdichte befindet sich auf dieser Linie. Somit ist der optimale Linienabstand für einen 6 min-Takt etwa 790 m.

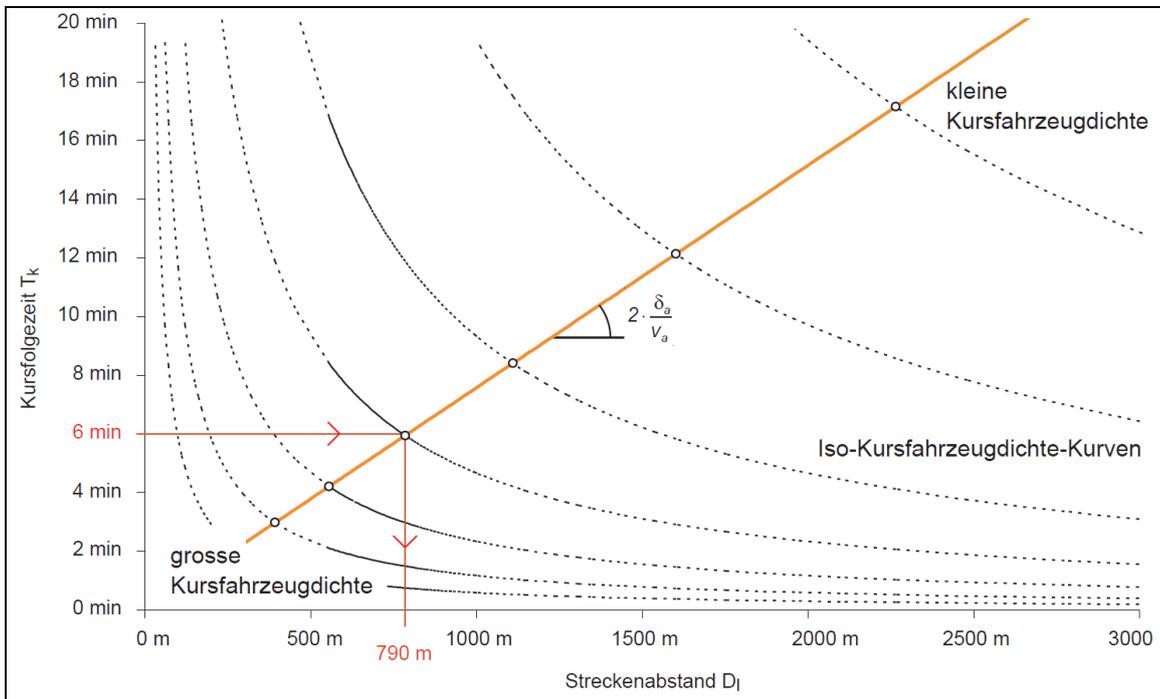


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen Strecken- bzw. Linienabstand und Takt (Schäffeler, 2004).

Ein weiterer Optimierungsansatz ist die Maximierung der subjektiven Attraktivität eines öffentlichen Verkehrssystems. Die Vorgehensweise beinhaltet nun, die Nachfrage als variabel anzusehen und die Reisezeit, unter Verwendung von Nutzenfunktionen, zu gewichten. Ferner wird nun jedem möglichen Ausgangsort einer Fahrt innerhalb des betrachteten Siedlungsgebietes Beachtung geschenkt. Die gesamte Nachfrage für eine Haltestelle wird durch die Integration über das Einzugsgebiet bestimmt. Vereinfacht gesagt wird die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit für die Wahl des öffentlichen Verkehrs im Einzugsgebiet maximiert, indem für jeden Ausgangspunkt die Anmarschdistanz und infolgedessen die resultierende Reisezeit berechnet wird. Für jeden dieser Ausgangspunkte wird mit einem Logit-Wahlmodell geschätzt, wie wahrscheinlich die Wahl des öffentlichen Verkehrs gegenüber der Wahl des Individualverkehrs ist. Diese Wahrscheinlichkeit wird von Schäffeler auch Ansprechbarkeit genannt. Mit geeigneten Parametern und den Reisezeitelementen wird der Nutzen errechnet, der in das Wahlmodell einfließt. Demgegenüber steht der Nutzen, der sich aus der Wahl des Individualverkehrsangebotes ergibt. Die Parameter für die Nutzenfunktion, die den Anteilen der Reisezeit verschieden starkes Gewicht verleihen, werden mithilfe des Maximum-Likelihood-Verfahrens und der Datengrundlage über die Nachfragereaktion bei veränderter Angebotsqualität von Schäfer (2001) geschätzt. Aus diesen Parametern lassen sich auch die Verhältnisse bestimmen, mit denen die Reisezeitelemente in die Nutzenfunktion eingehen. Sie

unterscheiden sich nur geringfügig von den von van Nes verwendeten Werten und sind in Tabelle 4 zu finden.

Zeitelement	Zugang	Warten	Beförderung	Abgang
Parameter	w_a	w_w	w_c	w_e
Wert	2,3	1,5	1,0	1,0

Tabelle 4: Berechnete Gewichtungsfaktoren aus den Parametern der Nutzenfunktion.

Das Ergebnis beinhaltet, dass die Kursfolgezeit für einen wachsenden Linienabstand nicht gleichmäßig steigt, sondern asymptotisch auf einen Grenzwert zuläuft. Soll die Ansprechbarkeit über das Einzugsgebiet gemittelt maximal werden, so unterliegt die Kursfolge dem Maximalwert von ungefähr $7-8 \text{ min}$. Das bedeutet, dass die so berechnete Nachfrage verhältnismäßig empfindlicher gegenüber der zeitlichen als gegenüber der örtlichen Verfügbarkeit ist. Unter gleichzeitiger Optimierung des Haltestellenabstands D_s ergeben sich Werte $< 700 \text{ m}$, der Verlauf der Kursfolgezeit bleibt jedoch identisch.

Zusätzlich untersucht Schöffeler unter anderem die Zusammenhänge der Netzgestaltungsvariablen für Tangentiallinien (vgl. Abbildung 9) mit verschiedenen Reisezielen der Fahrgäste. Tangentiallinien können von Vorteil für das Verkehrsnetz sein, wenn sie eine zusätzliche Erschließungsfunktion haben oder Orte mit besonders hoher Nachfragegenerierung wie z.B. Einkaufszentren oder Bezirke mit vielen Arbeitsplätzen direkt verbinden. Ist ein Netz durch seine Radiallinien, die Linien, die direkt mit dem Zentrum verbunden sind, bereits gut erschlossen, sinken der Nutzen und die Notwendigkeit für zusätzliche Tangentiallinien.

In der Arbeit von Schöffeler rückt der Haltestellenabstand thematisch beinahe in den Hintergrund. Dennoch kann sie teilweise hilfreich für die Modellentwicklung und die Anwendung sein.

Das Hauptaugenmerk liegt offensichtlich auf der Liniendichte und der Kursfolgezeit. Die Zusammenhänge der Größen in Anbetracht verschiedener Optimierungskriterien werden erarbeitet und ausführlich visualisiert. Die sorgfältig entwickelte Methode, die Nachfrage angemessen abzuschätzen ist sehr aufwendig, stellt den Sachverhalt aber etwas realitätsnäher dar.

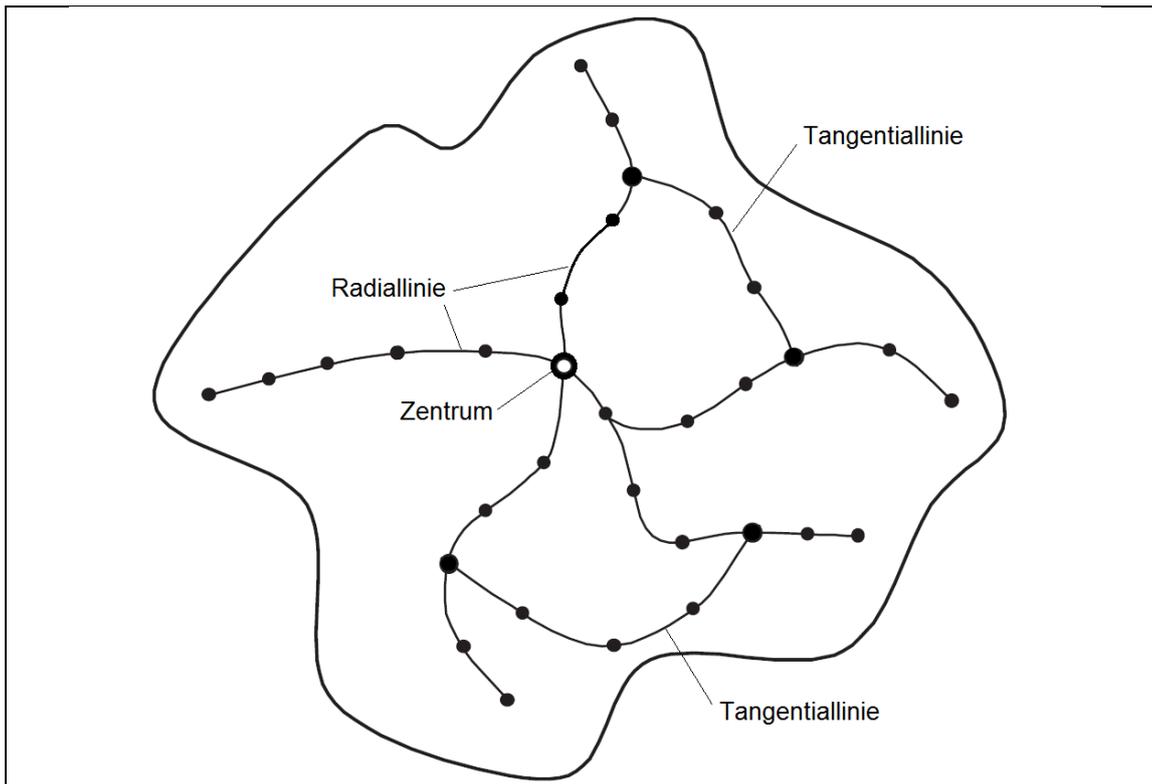


Abbildung 9: Schematischer Aufbau eines öffentlichen Verkehrsnetzes in Anlehnung an Schäffeler (2004).

3.6 Furth & Rahbee (2000): „Optimal bus stop spacing through dynamic programming and geographic modeling“

Die Herangehensweise von Furth & Rahbee ist grundsätzlich verschieden zu allen anderen bisher vorgestellten Methoden, da sie den Sachverhalt nicht kontinuierlich modelliert, sondern diskret. Dies bedeutet, dass nach optimalen, konkreten Standorten für Haltestellen gesucht wird. Die Optimierung einer Buslinie erfolgt mittels eines Satzes aus potenziellen Kandidaten für den Standort von Haltestellen. Diese möglichen Standorte sind an Kreuzungen entlang der Route angesiedelt, da laut Hakimi (1964) dadurch die durchschnittliche Anmarschdistanz bereits reduziert wird. Die Abstände dazwischen sind also nur ein Nebenprodukt und höchstwahrscheinlich auch nicht durchgängig identisch. Die Nachfrage im Untersuchungsgebiet unterliegt keinen Einschränkungen oder Vorgaben, wie beispielsweise ihrer gleichmäßigen Verteilung. Im Gegenteil: Eine ungleichmäßige Verteilung der Nachfrage wird befürwortet, denn diese sei ohnehin realistischer, da Nachfrage entlang einer Route typischerweise punktuell an Kreuzungen auftritt.

Den Autoren zufolge liegt das Problem der meisten Arbeiten über optimale Haltestellenabstände darin, dass ein mögliches Umsetzen der Ergebnisse in die Praxis nur grob oder gar nicht erläutert wird. Diese Aufgabe wird oftmals schlichtweg auf eine

spätere Planungsphase verschoben. Aus diesem Grund wählen Furth & Rahbee hier einen praxistauglicheren und damit vollständigeren Weg, indem ein Werkzeug vorgestellt wird, mit dem Haltestellen gezielt und im Sinne der Arbeit optimal platziert werden können.

Grundlage ist die Untersuchung des Betriebs einer Buslinie in eine Richtung. Jede Kreuzung wird als potenzieller Haltestellenkandidat angesetzt. Die Positionen dieser Kreuzungen sind bekannt, und damit auch die Abstände der möglichen Haltestellen zueinander. Gibt es auf der Route bereits festgelegte Haltestellen, wie beispielsweise Umsteigepunkte zu anderen Verkehrssystemen, reduziert sich das Optimierungsproblem auf die entsprechenden Teilabschnitte. Das Ziel ist die Minimierung der Gesamtkosten, die sich wie bei Khondaker & Wirasinghe (2013) aus den Zugangskosten, den Fahrzeitverlusten für Durchreisende und den Betriebskosten zusammensetzen. Diese Kostenanteile werden für jeden einzelnen Haltestellenkandidaten als Funktion in Abhängigkeit der vorausgehenden und nachfolgenden Haltestelle bestimmt. Um genau zu wissen, wie viele Menschen in einem Zeitabschnitt an welchen Stellen eine Ortsveränderung wünschen, wird ein geographisches Modell zur Verteilung der Nachfrage verwendet.

Aus Zählungen von Ein- und Aussteigenden an bestehenden Haltestellen der zu optimierenden Buslinie wird die beobachtete Nachfrage auf Gebiete an Parallelstraßen, kreuzenden Straßen und der Hauptstraße neu verteilt. Die genaue Verteilung ist abhängig von Einwohnerdichte, Arbeitsplätzen und Einkaufsmöglichkeiten und verlangt daher nach genaueren Informationen, im Idealfall nach Umfragedaten von Fahrgästen. Anschließend kann diese Nachfrage den möglichen Haltestellen zugeordnet werden. Zu Nachfragespitzen kommt es deshalb, weil die gesamte, ausgehende Nachfrage einer kreuzenden Straße an einem Punkt auf die Hauptstraße, auf der die Buslinie liegt, trifft. Die Nachfrage im Einzugsgebiet der Linie wird also sozusagen auf die Hauptstraße projiziert.

Die Neuverteilung der ermittelten, unelastischen Nachfrage geschieht mitunter durch die Einführung sogenannter Gleichgewichtslinien. Es wird Reisenden unterstellt, dass sie ihre gewichtete Reisezeit minimieren; deswegen ist die Grenze zwischen den Einzugsgebieten zweier Haltestellen nicht von beiden gleich weit entfernt. Abbildung 10 verdeutlicht diesen Sachverhalt: Ein Reisender will den Bus nehmen und kann bei Haltestelle A oder B zusteigen. Die Dauer für das Zurücklegen des Weges von der Gleichgewichtslinie g zu A (zu Fuß) mit dem anschließenden Fahren zu B entspricht dabei der Dauer für das Laufen von der Linie g zur Haltestelle B . Die Gleichgewichtslinie g markiert also die Grenze zwischen den Einzugsgebieten von A und B .

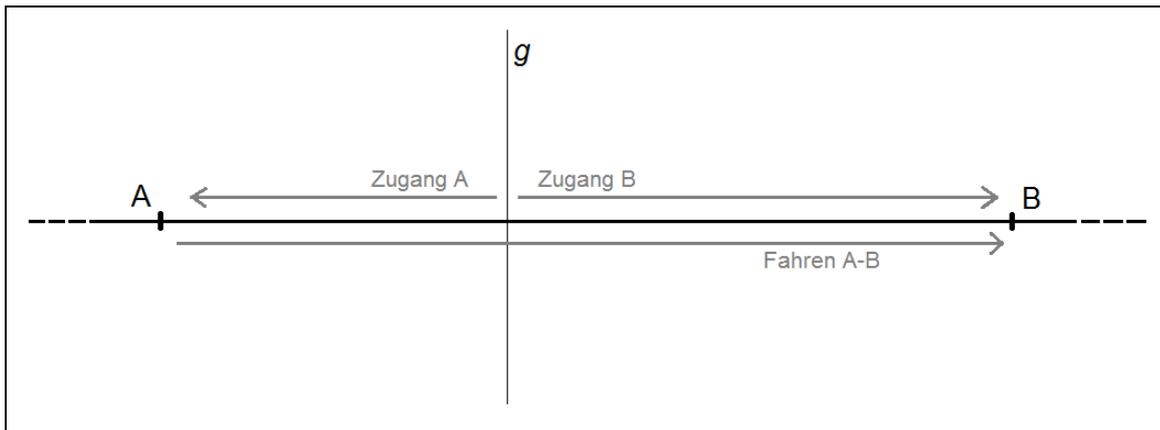


Abbildung 10: Gleichgewichtslinie g als Grenze der Einzugsgebiete für die Haltestellen A und B .

Die Lage der Linie wird mithilfe der Angaben zur Lauf- und Beförderungsgeschwindigkeit zusammen mit den Zeitwerten für Zugang und Fahren bestimmt.

Im Gegensatz zum Modell von Khondaker & Wirasinghe (2013) wird nicht davon ausgegangen, dass jeder Bus an jeder Haltestelle anhält. Haltestellen werden nur bedient, wenn dort Fahrgäste warten. Die Ankunft möglicher Fahrgäste wird mit einer Poissonverteilung angenähert.

Anschließend kann die gesamte Zielfunktion aufgestellt werden, welche für jede potenzielle Haltestelle mit ihren möglichen Vorgängern und Nachfolgern die Kosten bestimmt und über alle Halte aufsummiert. Auch hier werden verschiedene Zeitwerte für die jeweilige Kostenart verwendet, und dadurch auch eine Gewichtung vorgenommen. Die vorhandenen Parameterwerte sind in Tabelle 5 aufgelistet, der Grundkostensatz beträgt $4 \frac{\$}{h}$ für eine einfache Gewichtung.

Zeitelement	Zugang	Beförderung
Parameter	w_a	w_c
Wert	2,5	1,0

Tabelle 5: Parameterwerte zur Gewichtung der berücksichtigten Reisezeitelemente.

Die Optimierung an sich übernimmt ein Algorithmus, der, bei der Endhaltestelle beginnend, nach und nach die bestmöglichen Haltestellen für die Gesamtkostenminimierung ausgibt. Dieser Algorithmus arbeitet effizient und unterliegt keinen Begrenzungen, was Linienlänge oder Haltestellenanzahl anbelangt. Am Ende steht das Ergebnis in Form eines Sets aus den Haltestellenpositionen fest. Eine wichtige Nebenbedingung ist die Angabe über den maximalen Abstand, den zwei Haltestellen zueinander haben dürfen. Dieser kann für verschiedene Bereiche auf der Route angegeben werden, um topographisch bedingten Besonderheiten gerecht zu werden.

Damit kann gewährleistet werden, dass beispielsweise bei starkem Gefälle die Haltestellenabstände zugunsten der Reisenden nicht zu groß werden, da es dort anstrengender sein kann, den Zugangsweg zu bewältigen.

Anwendung findet die Methodik von Furth & Rahbee an einer vielbefahrenen Buslinie in Boston. Grundlage ist die Betrachtung einer Stunde während der morgendlichen Hauptverkehrszeit. Mithilfe der nötigen Daten zur Nachfrageverteilung wurde die Optimierung durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass aus 37 bisherigen Halten 19 werden sollten. Dies entspricht einer Verdoppelung des durchschnittlichen Haltestellenabstands, was auch zu längeren Anmarschwegen, jedoch deutlich geringeren Fahrzeitverlusten führt. Infolgedessen können die Gesamtkosten so um 18 % gesenkt werden. Die Angaben zu wichtigen, verwendeten Modellparametern sind in Tabelle 6 zu finden. Die Annahme einer minderen, möglichen Maximalgeschwindigkeit an signalisierten Kreuzungen erhöht natürlich die Wahrscheinlichkeit, dass eine Haltestelle an solch einer Kreuzung platziert wird, da die Zeitverluste dort geringer sind.

Modellparameter	Wert
Takt (HVZ morgens)	3 min
maximale Fahrzeuggeschwindigkeit an signalisierten bzw. unsignalisierten Kreuzungen	24 bzw. 48 km/h
Anmarschgeschwindigkeit	5 km/h
max. Haltestellenabstand	530 m
Beschleunigung & Bremsverzögerung	1,33 m/s ²
konstanter Zeitverlust pro Halt	9 s
Betriebskosten	80 \$/h

Tabelle 6: Modellparameter mit zugehörigen Werten für die Optimierung einer Buslinie in Boston, USA.

Durch einige Anpassungen im Algorithmus und den Formeln könnte auch der Betrieb in zwei Richtungen oder ganztags untersucht werden. Das Modell bedarf allerdings diesbezüglich weiterer Tests, bevor allgemeingültige Aussagen diesbezüglich getroffen werden können.

Das von Furth & Rahbee präsentierte Modell samt Vorgehen ist ein gutes Werkzeug, um praxisnah die richtigen Entscheidungen über Haltestellenpositionen zu treffen. Es wird der Tatsache Rechnung getragen, dass in Bereichen mit viel durchfahrenden Passagieren die Abstände größer, und in Gebieten, in denen viele Menschen ein- und aussteigen eher kleiner sein müssen. Es kann außerdem dazu benutzt werden, die Auswirkungen von Hinzufügen, Entfernen oder Verlegen von Haltestellen abzuschätzen und zu bewerten.

4 Modell

Ein Verkehrsmodell ist eine Abbildung eines realen Verkehrsnetzes. Diese sollte so einfach wie möglich und so komplex wie nötig sein, damit die Problemstellung mathematisch vereinfacht greifbar wird und gleichzeitig aber eine hohe Aussagekraft gewährleistet ist.

Die Entwicklung des Modells orientiert sich an denen von van Nes (2000) und Schäffeler (2004). Beim betrachteten Netzausschnitt handelt es sich um einen Korridor, bestehend aus parallel verlaufenden Linien in einem Stadtgebiet in vorgegebener Entfernung zum Zentrum (siehe auch Abbildung 11). Die Struktur eines Netzes des öffentlichen Verkehrs besteht vereinfacht beschrieben oft aus mehreren solchen Korridoren.

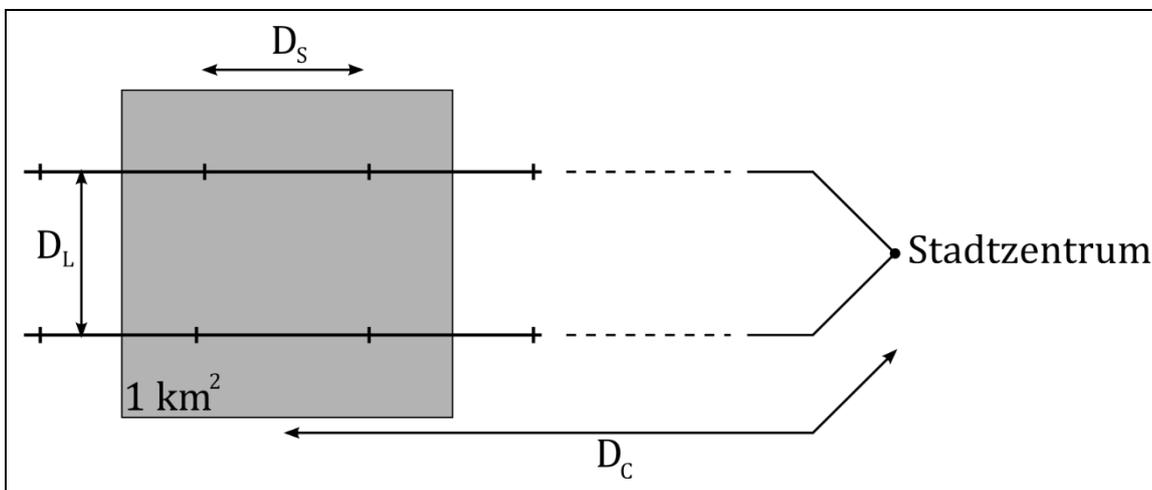


Abbildung 11: Aufbau des verwendeten Modells.

Die Fläche des Ausschnitts ist für spätere Berechnungen relevant und unabhängig des Linien- oder Haltestellenabstands quadratisch und immer 1 km^2 groß. Die Siedlungsdichte im entsprechenden Gebiet ist konstant, demgemäß ist auch die Nachfrage für den öffentlichen Verkehr gleichmäßig verteilt. Alle Reisenden wählen den kürzesten Weg zu ihrem festgelegten Ziel: dem Stadtzentrum. Sämtliche Linien führen zum Zentrum, es ist daher kein Umsteigevorgang für Fahrgäste erforderlich. Die Linien werden in beide Richtungen befahren und die Kursfolgezeiten sind konstant, demnach treten auch keine Verspätungen auf. Einflüsse der Fahrzeugkapazitäten werden nicht bedacht, es ist sozusagen immer ausreichend Platz für jegliche, aufkommende Nachfrage vorhanden. Auch Verzögerungen, die durch den Individualverkehr bedingt sind, werden vernachlässigt.

Im Folgenden werden die analytischen Zusammenhänge, die für das Aufstellen von Zielfunktionen unabdingbar sind, hergestellt. Dabei sind alle Größen entweder von den Entscheidungsvariablen Haltestellen- (D_S) und Linienabstand (D_L) abhängig, oder als fixe Parameter des Systems vorgegeben.

4.1 Reisezeit

Für Reisende ist die empfundene Reisezeit ein äußerst wichtiges Kriterium für das Angebot, welches der öffentliche Verkehr anbietet. Sie setzt sich aus den Reisezeit-elementen T_i und Gewichtungsfaktoren w_i folgendermaßen zusammen:

$$T_t = w_a T_a + w_w T_w + w_c T_c + w_e t_e \quad (4.1)$$

Wie schon in Kapitel 2.2.1 angedeutet, kann davon ausgegangen werden, dass der Zugangsweg nur parallel oder senkrecht zur Linie zurückgelegt wird. Außerdem kann man aus Symmetriegründen das Einzugsgebiet in vier Flächen aufteilen, von denen aus der durchschnittliche Startpunkt für eine Reise im Schwerpunkt der rechteckigen Fläche liegt (vgl. Abbildung 12).

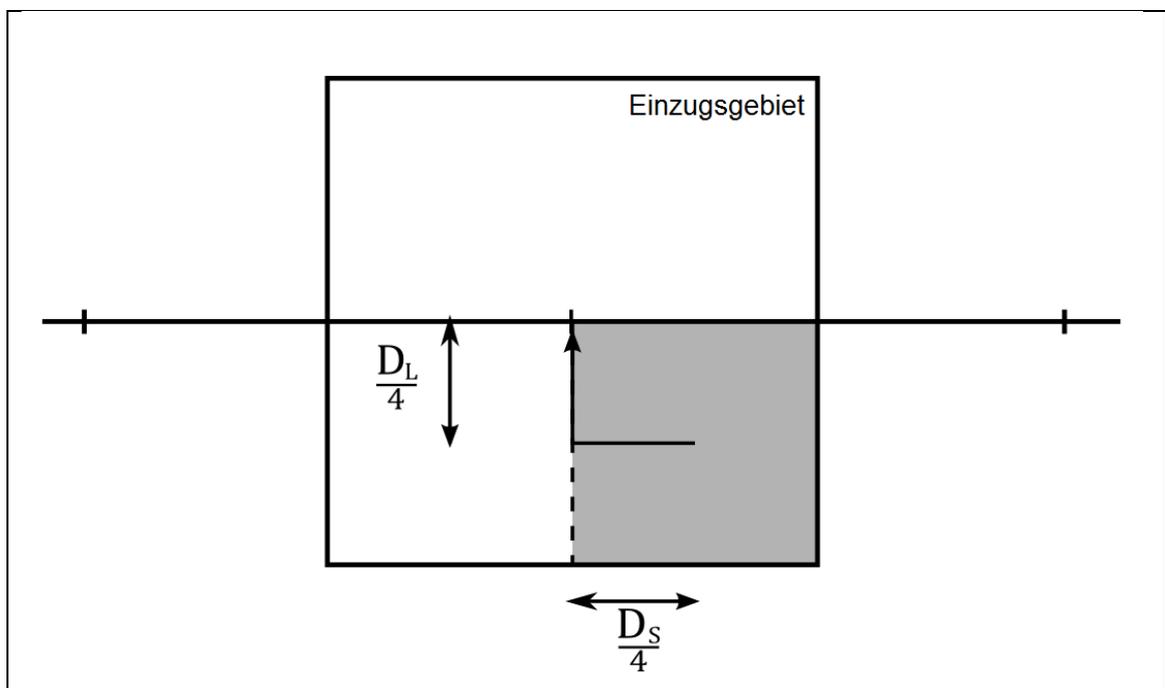


Abbildung 12: Durchschnittlicher Anmarschweg im Einzugsgebiet.

Damit ergibt sich der Anmarschweg

$$D_a = \frac{1}{4} D_s + \frac{1}{4} D_l \quad (4.2)$$

und zusammen mit der Geschwindigkeit der Fußgänger v_a ist die Zugangszeit

$$T_a = \frac{D_s + D_l}{4 v_a} \quad (4.3)$$

Für die Wartezeit wird von einem fahrplanunabhängigen Fahrgastzufluss ausgegangen, die Fahrgäste kommen also gleichmäßig an den Haltestellen an und die Wartezeit entspricht daher der Hälfte der Kursfolgezeit.

$$T_w = \frac{1}{2F} = \frac{1}{2} T_k \quad (4.4)$$

Die Beförderungszeit ist abhängig von der Anzahl der passierten Haltestellen bis zum Ziel und der Zeit, die das Fahrzeug braucht, um einen Haltestelle abzufertigen und zur nächsten zu gelangen.

$$T_c = \frac{D_c}{D_s} \left(\frac{D_s}{v} + \frac{v}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{d} \right) + t_s \right) \quad (4.5)$$

mit

D_c	Reisedistanz von Haltestelle zu Stadtzentrum
v	maximale Geschwindigkeit
a	Beschleunigung
d	Bremsverzögerung
t_s	Standzeit an einer Haltestelle

Die Standzeit t_s umfasst die einzelnen Zeiten für das Ein- und Aussteigen der Reisenden, als auch die Dauer zum Öffnen und Schließen der Türen. Sie wird als konstant deklariert und ist damit unabhängig von der Anzahl der Haltestellen, der ein- und der aussteigenden Passagiere. Die Korrektheit der Formel ist nur dann gewährleistet, wenn D_s so groß ist, dass v unter Berücksichtigung des Beschleunigungs- und Bremsweges erreicht werden kann (siehe Anhang 1).

Der Zeitverlust t_l , den das Bedienen einer Haltestelle verursacht ist:

$$t_l = \frac{v}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{d} \right) + t_s \quad (4.6)$$

Die Abgangszeit t_e kann aufgrund der vorgegebenen Zielwahl für alle Reisende als fix angenommen werden und ist nicht abhängig von Haltestellen- oder Linienabstand.

4.2 Nachfrage

Im Falle einer angebotsabhängigen Nachfrage hängt der Anteil der Reisenden, die sich noch für den öffentlichen Verkehr entscheiden, vom Nutzen ab, den sie im Vergleich zu den vorhandenen Alternativen daraus ziehen. Dieser Nutzen ist objektiv und für alle Personen im Einzugsgebiet gleich. Für das Schätzen der Nachfrage in Abhängigkeit dieses Nutzens lässt sich das Logit-Wahlmodell verwenden:

$$P(V_{\bar{o}v}) = P_0 \frac{e^{\beta_{\bar{o}v} V_{\bar{o}v}}}{e^{\beta_{\bar{o}v} V_{\bar{o}v}} + \sum_{n=1}^N e^{\beta_n V_n}} \quad (4.7)$$

mit

P	Nachfrage für den öffentlichen Verkehr
P_0	gesamte Verkehrsnachfrage
V_i	Nutzen des Modus i
β_i	Koeffizient, der die Sensitivität der Nachfrage beeinflusst
N	Anzahl der Alternativen

Die Faktoren, die Menschen bei der Wahl eines Verkehrsmittels beeinflussen sind zahlreich. So spielen neben der empfundenen Reisezeit und den Kosten auch noch Aspekte wie beispielsweise Komfort, Sicherheit, Einfachheit oder Erfahrungswerte eine Rolle. Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen jedoch der Haltestellen- und Linienabstand, weswegen sich die Größen, die im Nutzen enthalten sind, auf die empfundene Tür-zu-Tür Reisezeit beschränken. Steigt diese gewichtete Reisezeit an, sinkt der Nutzen, den ein Fahrgast daraus ziehen kann. Somit ergibt sich der vom Verkehrsmodus unabhängige Zusammenhang

$$V_i = -T_{t,i} \quad (4.8)$$

und damit wird aus obiger Logit-Formel

$$P(T_t) = P_0 \frac{e^{-\beta_{\text{öv}} T_t}}{e^{-\beta_{\text{öv}} T_t} + \sum_{n=1}^N e^{-\beta_n T_n}} \quad (4.9)$$

4.3 Kosten & Einnahmen

Die betriebsbedingten Kosten lassen sich mithilfe der Kursfahrzeugdichte bestimmen. Diese lautet für den betrachteten Netzausschnitt unter Beachtung des Betriebs in zwei Richtungen:

$$Z = 2 \frac{1000}{D_l} \frac{1000}{D_s} F \left(\frac{D_s}{v} + \frac{v}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{d} \right) + t_s \right) \quad (4.10)$$

Mit dem Kostensatz für eine Fahrzeugstunde c_o kommt man schließlich auf die absoluten Kosten C_o mit

$$C_o = c_o Z \quad (4.11)$$

Kosten für die Infrastruktur werden nicht mit einbezogen.

Auf der anderen Seite gibt es für einen Betreiber natürlich auch Einnahmen aus Fahrscheinverkäufen. Rechnet man den Preis für ein Fahrticket auf den Preis in Abhängigkeit der Reisedistanz aus, ergibt sich für die Einnahmen insgesamt:

$$R_o = r_d D_c P \quad (4.12)$$

mit

R_o Einnahmen des Betreibers
 r_d Ticketpreis pro km

Zuletzt gibt es noch die Kosten der Reisenden, welche sich aus den Zeitkosten für die empfundene Reisezeit und den zu bezahlenden Fahrscheinen ergeben:

$$C_t = P(c_t T_t + r_d D_c) \tag{4.13}$$

mit

C_t Reisekosten der ÖV-Fahrgäste
 c_t Zeitwert der Reisenden

4.4 Wohlfahrt

Zur Berechnung der ökonomischen Wohlfahrt ist das Bestimmen des Gewinns der Betreiber und des Vorteils der Reisenden erforderlich (vgl. Kapitel 2.4). Der Profit ist die Differenz der Einnahmen und Ausgaben:

$$S_o = R_o - C_o \tag{4.14}$$

Für den Vorteil der Reisenden spielen die Ticketpreise keine Rolle, da diese als konstant angenommen werden. Übrig bleibt die Zeit, die die Reisenden sparen, die auch bei einer als länger empfundenen Reisedauer ein öffentliches Verkehrsmittel gewählt hätten.

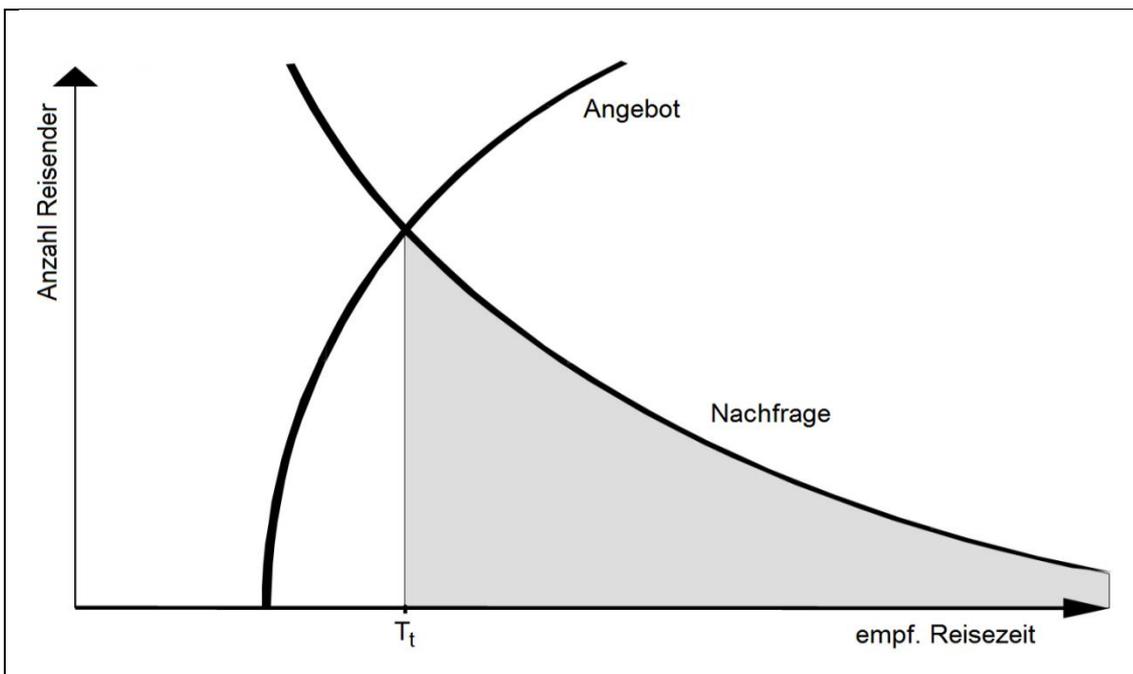


Abbildung 13: Vorteil der Reisenden als Fläche unter der Nachfragekurve; angelehnt an van Nes (2000).

Die erdachte Zeitersparnis, also eben dieser Vorteil der Reisenden, fortan als S_t bezeichnet, lässt sich durch die Berechnung der grauen Fläche (vgl. Abbildung 13) mit einem Integral realisieren:

$$S_t(T_t) = c_t \int_{T_t}^{\infty} P(T_\tau) dT_\tau \quad (4.15)$$

4.5 Systemparameter

Die Werte für die festgelegten, von den Entscheidungsvariablen unabhängigen, Parameter entsprechen weitestgehend denen aus van Nes (2000) und Schäffeler (2004). Die Empfindlichkeitskoeffizienten für die Schätzung der elastischen Nachfrage werden zunächst von van Nes (2000) übernommen, genau wie die Kostenfaktoren und Fahrscheinpreise. Es wird davon abgesehen, die Gelder in eine andere Währung umzurechnen. Stattdessen fließen sie als allgemeine Kostenwerte in die Berechnungen ein, denn die genaue Währung spielt für den Vergleich zu traditionellen Netzen keine Rolle.

Ferner wird zwischen Bus und Stadtbahn unterschieden. Die Ungleichheit zwischen diesen Fahrzeugarten wird durch diverse unterschiedliche Annahmen ausgedrückt. So gibt es verschiedene Werte für die durchschnittlichen Reisedistanzen, die Frequenzen, die hervorgerufenen Kosten und die maximale Nachfrage im untersuchten Einzugsgebiet. Die Frequenzen entsprechen den Werten in der Normalverkehrszeit in Gebieten mit hoher Nutzungsdichte (VDV 2001). Die durchschnittliche Reisedistanz, die maximale Nachfrage und die Kosten sind für die Fortbewegung mit der Bahn größer.

Alle Werte sind Tabelle 7 zu entnehmen. Als einzige Alternative zum öffentlichen Verkehr steht den Reisenden der Individualverkehr zur Verfügung.

Die Beschleunigung und Bremsverzögerung werden als identisch angenommen und dadurch vereinfacht sich Gleichung (4.6) zu

$$t_l = \frac{v}{a} + t_s \quad (4.16)$$

und in der Folge werden auch die Gleichungen für die Beförderungszeit (4.5) und die Kursfahrzeugdichte (4.10) simpler:

$$T_c = \frac{D_c}{D_s} \left(\frac{D_s}{v} + \frac{v}{a} + t_s \right) \quad (4.17)$$

$$Z = 2 \frac{1000}{D_l} \frac{1000}{D_s} F \left(\frac{D_s}{v} + \frac{v}{a} + t_s \right) \quad (4.18)$$

Bezeichnung	Kürzel	Bus	Bahn	Einheit
Reisedistanz	D_c	3	5	km
Frequenz	F	4	6	Fzg/h
Zugangsgeschwindigkeit	v_a	4	4	km/h
maximale Geschwindigkeit ÖV	v	50	50	km/h
Beschleunigung & Bremsverzögerung	a	1	1	m/s ²
Standzeit an einer Haltestelle	t_s	20	20	s
Abgangszeit	t_e	180	180	s
Fahrscheinpreis	r_d	0,25	0,25	1/km
Betriebsbedingte Kosten	c_o	217	362	1/(Fzg h)
Zeitwert der Reisenden	c_t	10	10	1/h
Gewichtung Zugang	w_a	2,2	2,2	–
Gewichtung Warten	w_w	1,5	1,5	–
Gewichtung Fahren	w_c	1,0	1,0	–
Gewichtung Abgang	w_e	1,1	1,1	–
fixe Nachfrage (für trad. Netz)	P	100	125	Pers/km ²
Empfindlichkeitskoeffizient ÖV	$\beta_{\text{öv}}$	0,03	0,03	min ⁻¹
Empfindlichkeitskoeffizient IV	β_{iv}	0,08	0,08	min ⁻¹
durchschnittliche Geschwindigkeit IV	v_{iv}	15	15	km/h
Zeitzuschlag IV (Parken, etc.)	t_{iv}	300	300	s

Tabelle 7: Werte der Systemparameter.

Mit dem Individualverkehr als Alternative ergibt sich die Nachfragefunktion aus Gleichung (4.9)

$$P(T_t) = P_0 \frac{e^{-\beta_{\text{öv}}T_t}}{e^{-\beta_{\text{öv}}T_t} + e^{-\beta_{\text{iv}}T_{t,\text{iv}}}} \quad (4.19)$$

mit

$$T_{t,\text{iv}} = \frac{D_c}{v_{\text{iv}}} + t_{\text{iv}} \quad (4.20)$$

Damit ergeben sich die Nachfragekurven für das Bus- respektive das Bahn-Netz, die in Abbildung 14 zu sehen sind.

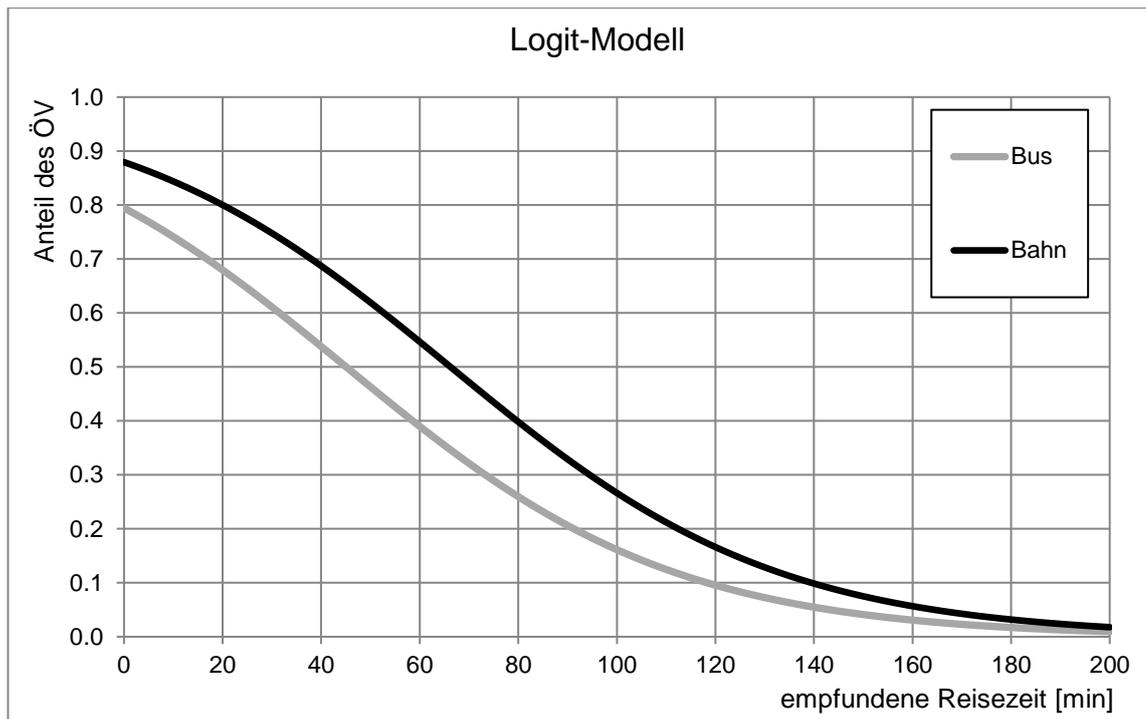


Abbildung 14: Kurven für die Schätzung der Nachfrage je nachdem, welches Netz mit zugehöriger Fahrzeugart betrachtet wird.

5 Anwendung

Damit das Modell zum Einsatz kommen kann, muss zunächst festgelegt werden, nach welchen Kriterien optimiert wird. Die nötigen Zielfunktionen müssen aufgestellt und gelöst werden. Gibt es Werte, die mit Abstand am besten für eine Problemstellung geeignet sind? Die Ergebnisse müssen in Zusammenhang gebracht und interpretiert werden.

Um Aufschluss darüber zu erhalten, wie stabil die jeweiligen optimalen Werte sind, muss geprüft werden, wie groß der Einfluss festgelegter Systemparameter ist. Dies erfolgt durch eine Sensitivitätsanalyse.

5.1 Zielstellungen

Optimale Haltestellen- und Linienabstände sind nur im Hinblick auf das gewählte Ziel optimal. Daher ist es sinnvoll, die Optionen für die Wahl des Optimierungsziels aufzulisten und zu erläutern, wie diese zustande kommen und was sie auszeichnet.

Die beteiligten Gruppen bei dem Dilemma der Wahl der richtigen Abstände sind die Reisenden, die Betreiber und die Behörden. Um den Einfluss der Zielwahl deutlich zu machen, wird für jede Partei mindestens ein Optimierungskriterium ausgesucht, das ihr Interesse ausdrückt.

Die empfundene Reisezeit beinhaltet durch das Gewichten der Zeitelemente die Angebotsqualitätskriterien örtliche Verfügbarkeit, zeitliche Verfügbarkeit und natürlich auch die reine Reisezeit. Der Wunsch der Reisenden ist es, diese empfundene Reisezeit so kurz wie möglich zu halten.

Ein Ziel aller Unternehmen ist es, Gewinn zu erwirtschaften. Dies kann auch bei einem Betreiber eines öffentlichen Verkehrssystems angenommen werden. Überwiegen die Ausgaben jedoch gegenüber dem Umsatz, geht es darum, den Verlust zu minimieren.

Der sinnvollste Weg wäre indessen, sowohl die Interessen der Reisenden als auch die der Betreiber zu beachten. Diesen Standpunkt vertreten die lokalen Behörden, die die Betreiber mit finanziellen Mitteln unterstützen, sollten diese Verluste einfahren. Die Gewährleistung einer hohen Angebotsqualität begünstigt eine große Nachfrage, und in der Folge auch mehr Einnahmen für den Betreiber, der damit weniger Unterstützung beansprucht. Der in Kapitel 2.4 eingeführte Begriff der ökonomischen Wohlfahrt ist also passend, um die beidseitigen Interessen zu vertreten. Eine andere Möglichkeit besteht in der Minimierung der Gesamtkosten; ein Ziel, welches am häufigsten in vergangenen Untersuchungen dieser Art verfolgt wurde.

Die Zielstellungen, die in der Optimierung zur Verwendung kommen, lauten zusammengefasst:

- Minimieren der empfundenen Reisezeit → G1
- Maximieren des Gewinns → G2
- Maximieren der ökonomischen Wohlfahrt → G3
- Minimieren der Gesamtkosten → G4

5.2 Optimierung

Im Folgenden werden für jede Zielstellung die entsprechenden Funktionen mittels der Gleichungen aus Kapitel 4 aufgestellt. Für G1 wird eine unelastische Nachfrage angenommen, bei allen anderen Optimierungen wird das Wahl des Verkehrssystems der Reisenden mit dem Logit-Modell aus 4.5 geschätzt. Das Lösen der Problemstellungen, die eine elastische Nachfrage voraussetzen, ist analytisch nicht realisierbar und erfordert deshalb den Einsatz iterativer mathematischer Methoden.

Die Optimierung erfolgt mit dem Tabellenkalkulationsprogramm von Microsoft.

5.2.1 Minimieren der empfundenen Reisezeit

Es ergibt sich für die Zielfunktion

$$G1 = \text{Min} \left\{ w_a \frac{D_s + D_l}{4 v_a} + w_w \frac{1}{2 F} + w_c \frac{D_c}{D_s} \left(\frac{D_s}{v} + \frac{v}{a} + t_s \right) + w_e t_e \right\} \quad (5.1)$$

Es ist offensichtlich, dass die Kosten des Betreibers an keiner Stelle einfließen. Aufgrund der Tatsache, dass D_l nur im Teil der Anmarschzeit vorkommt und keinerlei Einschränkungen unterliegt, würde der Linienabstand infinitesimal klein werden ($D_l \rightarrow 0$). Um dieses unrealistische, unmöglich umzusetzende Ergebnis zu vermeiden, wird der Linienabstand als fix angenommen. Damit ist der Haltestellenabstand D_s die einzig verbleibende Entscheidungsvariable, die ohnehin einen größeren Einfluss auf die Reisezeit hat, da sie nicht nur die Zugangszeit, sondern auch die Fahrzeit mitbestimmt. Somit kann das Problem analytisch gelöst werden mit

$$\frac{\partial G1}{\partial D_s} \stackrel{!}{=} 0 \quad (5.2)$$

und es ergibt sich allgemein für den optimalen Haltestellenabstand

$$D_{s,G1} = \sqrt{w_c D_c \left(\frac{v}{a} + t_s \right) \frac{4 v_a}{w_a}} \quad (5.3)$$

Die Wirkung einzelner Größen ist nun mühelos identifizierbar. Steigt beispielsweise die Reisedistanz oder der Zeitverlust pro Halt, wächst auch die Haltestellendistanz. Umgekehrt wird bei einer stärkeren Gewichtung des Zugangs der Abstand kleiner.

Die einzelnen gewichteten Reisezeitanteile und die entstehende Reisezeit sind exemplarisch in Abbildung 15 dargestellt.

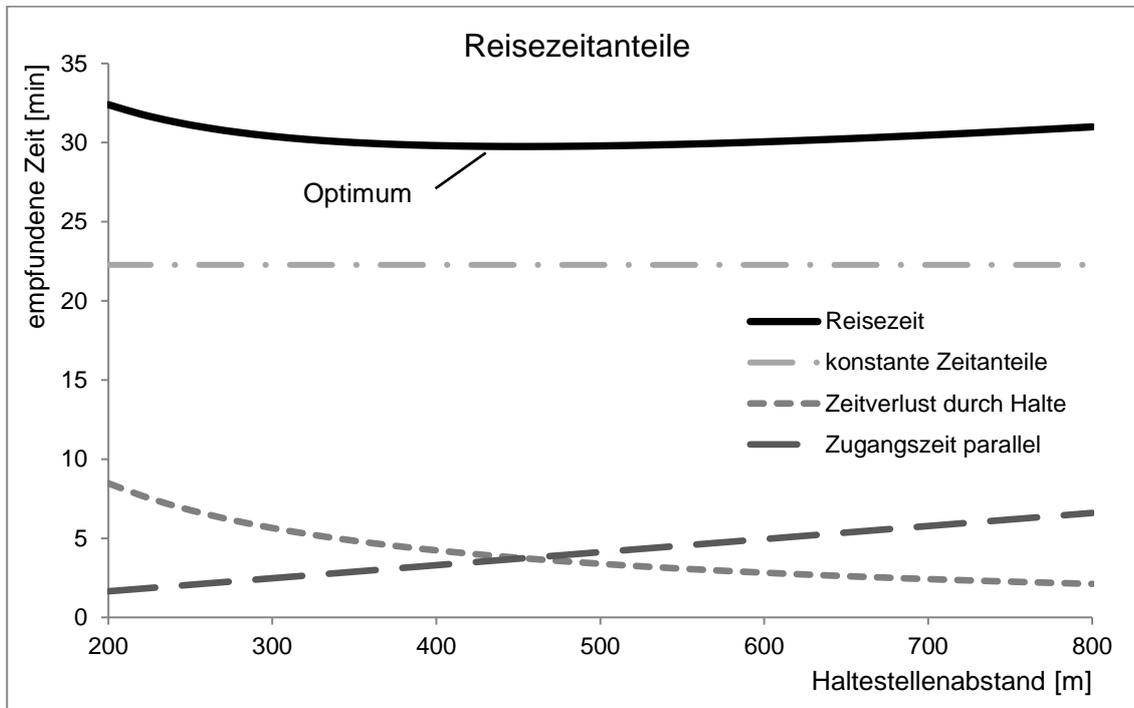


Abbildung 15: Reisezeitanteile in Abhängigkeit des Haltestellenabstands für ein mit Bussen betriebenes Netz.

Gut zu erkennen ist der gegenläufige Einfluss des Haltestellenabstands auf Zugangs- und Beförderungszeit. Durch das Festhalten des Linienabstands lassen sich diese beiden Zeitelemente in einen vom Haltestellenabstand abhängigen und einen unabhängigen Part aufteilen. Bei dem Anmarschweg ist das der Teil, den Reisende parallel zur Linie zurücklegen müssen:

$$T_a(D_s) = \frac{D_s}{4 v_a} \tag{5.4}$$

Der Weg senkrecht zur Linie ist konstant. Im Falle der Beförderungszeit ist der konstante Anteil die Dauer, die das Fahrzeug ohne jegliche Haltestellen vom Startpunkt zum Stadtzentrum bräuchte. Der variable Zeitanteil lautet also:

$$T_c(D_s) = \frac{D_c}{D_s} \left(\frac{v}{a} + t_s \right) \tag{5.5}$$

Das Optimum ist zu finden an der Schnittstelle eben dieser abhängigen Zeitanteile. Die empfundene Reisezeit ist also dann minimal, wenn sich die vom Haltestellenabstand beeinflussten, gewichteten Zeitanteile der Zugangs- und Beförderungszeit gleichen.

$$w_a \frac{D_s}{4v_a} \stackrel{!}{=} w_c \frac{D_c}{D_s} \left(\frac{v}{a} + t_s \right) \quad (5.6)$$

Darüber hinaus ist der Verlauf der gewichteten Reisezeit relativ flach, Änderungen des Abstands verursachen demgemäß verhältnismäßig kleine Veränderungen der Reisedauer. Kleine Haltestellendistanzen haben ferner eine größere Wirkung auf die empfundene Reisezeit, da der Zeitverlust für größer werdende Haltestellenabstände stärker abnimmt als die Zugangszeit ansteigt.

5.2.2 Maximieren des Gewinns

Mit den Gleichungen (4.12), (4.18) und (4.19) ergibt sich für die Zielfunktion

$$G2 = \text{Max} \left\{ r_d D_c P_0 \frac{e^{-\beta_{\text{öv}} T_t}}{e^{-\beta_{\text{öv}} T_t} + e^{-\beta_{\text{iv}} T_{t,\text{iv}}}} - c_o 2 \frac{1000}{D_l} \frac{1000}{D_s} F \left(\frac{D_s}{v} + \frac{v}{a} + t_s \right) \right\} \quad (5.7)$$

Das Ziel der Gewinnmaximierung beschreibt das Dilemma des Betreibers zwischen den Kosten und den Einnahmen durch die sich aus der Netzstruktur ergebenden Nachfrage. Die Funktionswerte sind in Abhängigkeit des Haltestellen- und Linienabstands in Abbildung 16 dargestellt.

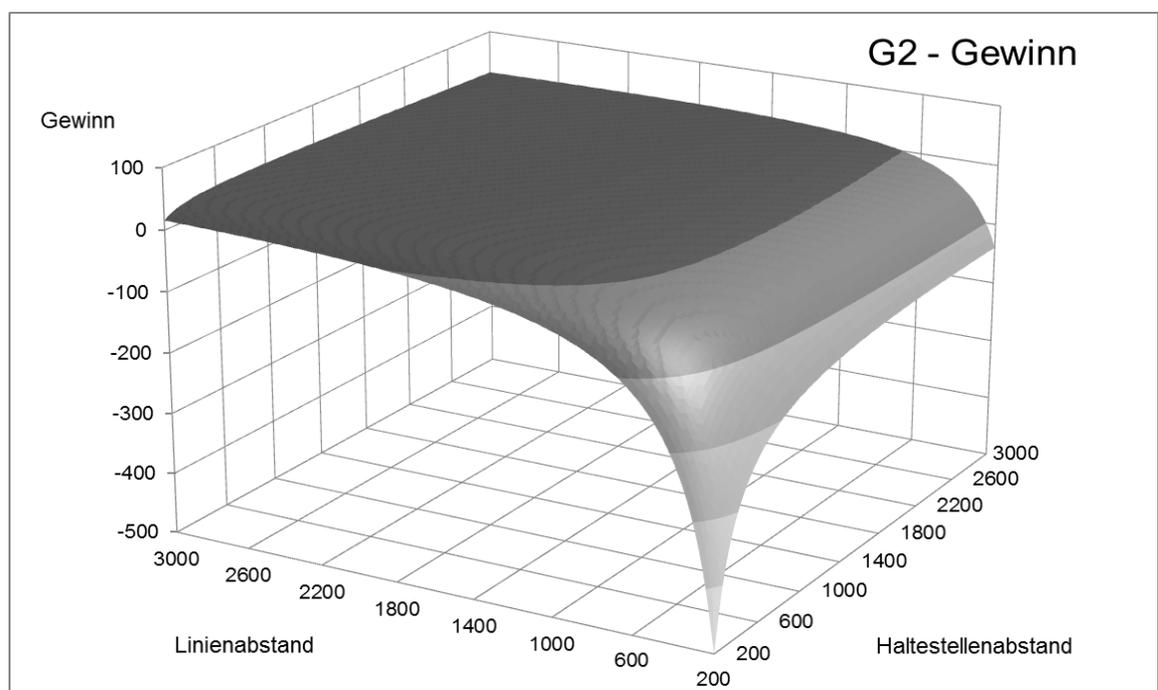


Abbildung 16: 3D-Plot des erzielbaren Profits für den Betreiber je nach Haltestellen- und Linienabstand. Die Werte beziehen sich auf ein Verkehrsnetz, in dem Busse eingesetzt werden.

Das stärkere Abfallen der Oberfläche für kleine Linienabstände lässt darauf schließen, dass die Liniendistanz einen größeren Einfluss auf den möglichen Gewinn respektive die entstehenden Kosten hat. Betrachtet man die Formel für die Kursfahrzeugdichte wird auch klar warum: während der Linienabstand ausschließlich im Nenner vorkommt, ist der Haltestellenabstand im Zähler und im Nenner vertreten, weshalb eine Veränderung der Größe geringeren Einfluss auf den Wert für die Kursfahrzeugdichte hat. Ferner nimmt die Funktion über große Bereiche beider Entscheidungsvariablen ähnlich große Werte an. Es ist schwer, anhand der Form zu erkennen, ob es überhaupt ein Optimum gibt. Tatsächlich existieren jedoch optimale Werte für den Haltestellen- und Linienabstand.

5.2.3 Maximieren der ökonomischen Wohlfahrt

Anhand Gleichung (4.14) und (4.15) kommt man für die Zielfunktion auf

$$G_3 = \text{Max} \left\{ c_t \int_{T_t}^{\infty} P(T_\tau) dT_\tau + r_d D_c P(T_t) - c_o 2 \frac{1000}{D_l} \frac{1000}{D_s} F \left(\frac{D_s}{v} + \frac{v}{a} + t_s \right) \right\} \quad (5.8)$$

Diesmal ist der Gewinn des Betreibers nur ein Teil der Funktion und konkurriert mit der Zeitersparnis, die alle Reisenden haben, welche den öffentlichen Verkehr auch bei längerer Reisedauer dem Individualverkehr vorgezogen hätten. Das zugehörige Schaubild ist in Abbildung 17 zu sehen.

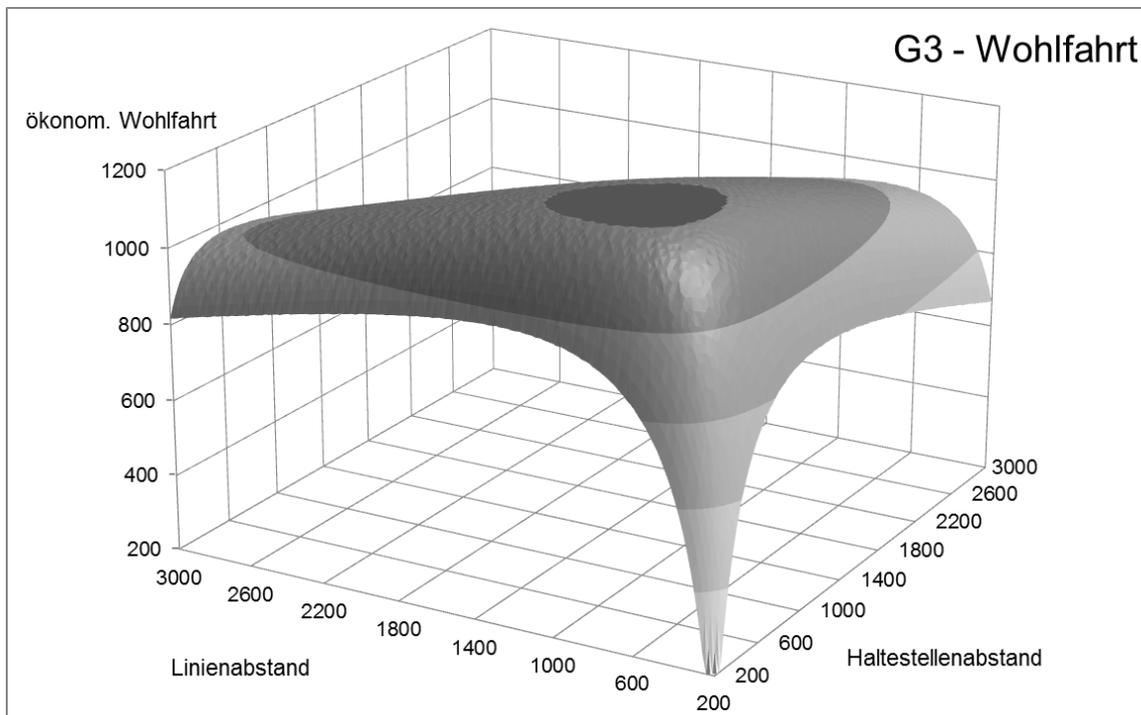


Abbildung 17: Oberflächendiagramm der ökonomischen Wohlfahrt für ein mit Bahnen betriebenes Verkehrsnetz.

Im Gegensatz zu $G2$ ist hier deutlich zu erkennen, dass es einen optimalen Bereich für den Haltestellen- und Linienabstand gibt. Vom Optimum aus fällt die Fläche beim Vergrößern einer Variablen leicht, beim Vergrößern beider Variablen stark ab. Für sehr kleine Werte beider Abstände ($< 400\text{ m}$) ist die Form der Funktion ähnlich wie die der Maximierung des Gewinns: Der Wert der Wohlfahrt bricht geradezu ein, eine derartige Wahl wäre ungünstig.

5.2.4 Minimieren der Gesamtkosten

Bei der Betrachtung der Gesamtkosten spielen die Fahrticketpreise bzw. –erlöse keine Rolle. Sie erhöhen zwar die Kosten für die Reisenden, reduzieren aber gleichermaßen die der Betreiber.

Mit (4.11) und dem Vernachlässigen der Fahrscheinpreise bei (4.13) ergibt sich die Zielfunktion für die Minimierung der Gesamtkosten zu

$$G4 = \text{Min} \left\{ c_t T_t P_0 \frac{e^{-\beta_{\text{ov}} T_t}}{e^{-\beta_{\text{ov}} T_t} + e^{-\beta_{\text{iv}} T_{t,\text{iv}}}} + c_o 2 \frac{1000}{D_l} \frac{1000}{D_s} F \left(\frac{D_s}{v} + \frac{v}{a} + t_s \right) \right\} \quad (5.9)$$

Hier wird also dem Dilemma zwischen den Zeitkosten Reisender und den Betriebskosten Rechnung getragen.

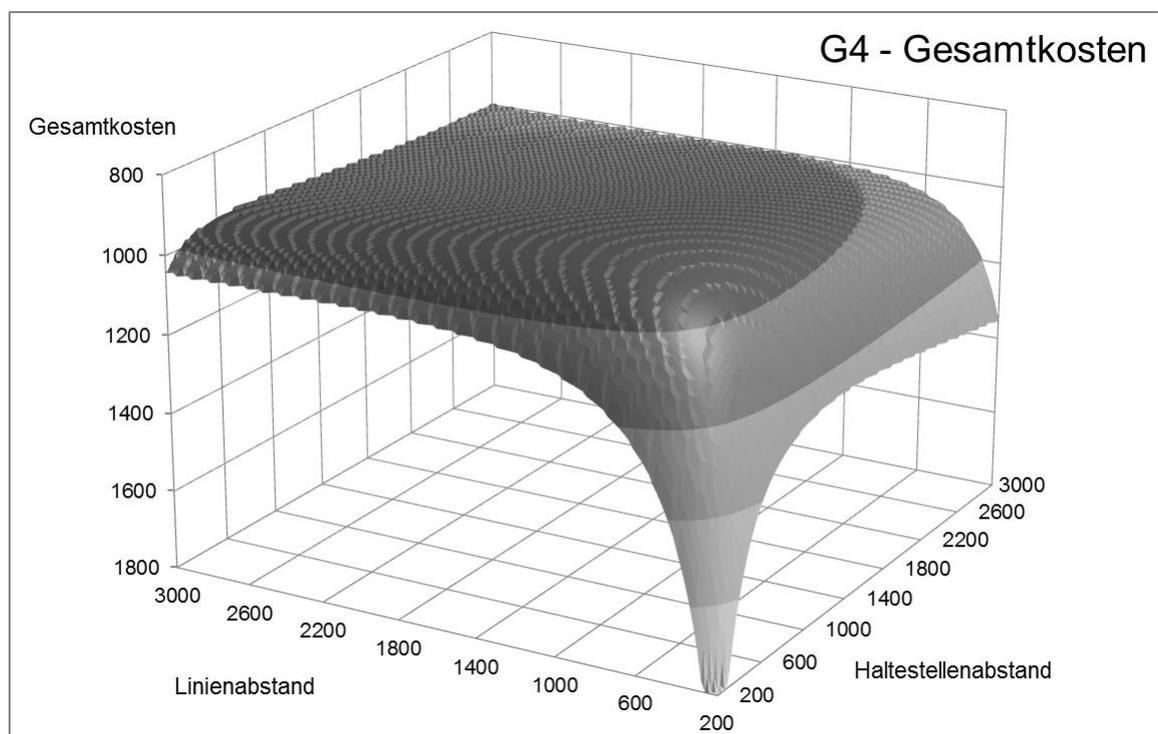


Abbildung 18: Plot der Gesamtkosten über Haltestellen- und Linienabstand.

Das dreidimensionale Schaubild ähnelt dem von $G2$ sehr. Die vertikale Achse ist derart formatiert, dass das Minimum der Gesamtkosten als höchster Punkt im Diagramm sichtbar wird. Die Erscheinung der sichtbaren Stufen auf der Funktionsfläche ist auf die Berechnung zurückzuführen: bei der Schätzung der Nachfrage wird stets aufgerundet, da es nur ganzzahlige Reisende gibt. Bei kleinen Veränderungen der Reisezeit kann die Nachfrageschätzung ergeben, dass direkt eine Person mehr (oder weniger) den ÖV wählt, und in der Folge der Anteil der Zeitkosten eine Änderung entsprechend des ganzzahligen Nachfrageunterschieds erfährt.

Wieder ist ein großer Bereich für die Wahl der Variablen möglich, ohne dass es beträchtliche Unterschiede bei den Gesamtkosten mit sich bringt. Es gibt ein Optimum, welches jedoch lokal ist. Realistische, optimale Werte können nur durch obere Schranken für den Haltestellen- und Linienabstand ermittelt werden. Wird unbeschränkt nach optimalen Werten gesucht, werden die Abstände unendlich groß ($D_s \rightarrow \infty$; $D_l \rightarrow \infty$), weil sich dann niemand mehr für eine Ortsveränderung mit dem öffentlichen Verkehr entscheidet. Die Zeitkosten der Reisenden sind damit gleich Null und durch die unendlich großen Abstände kommen auf den Betreiber ebenfalls keine Kosten zu.

5.2.5 Ergebnisübersicht

Zusammengefasst und tabellarisch dargestellt sind im Folgenden die bestimmten optimalen Werte für Haltestellen- und Linienabstand je nach Fahrzeugart samt den daraus errechneten Werten für die Reisezeit, die Nachfrage und die Kosten. Zu Vergleichszwecken sind auch die Werte für ein klassisches Netzwerk (van Nes, 2000) aufgelistet.

Die optimalen Werte sind dabei gerundet. Eine geringe Abweichung zu den exakten Abständen resultiert wegen der flachen Gestalt der Funktion nahe dem Optimum in keinen nennenswerten Unterschieden für die daraus berechneten Werte aller Zielstellungen. Die für $G1$ vorgegebenen Werte für beide Fahrzeugarten sind gekennzeichnet ¹.

Die Ergebnisse der Optimierung des mit Bussen betriebenen Beispielnetzes für alle vier Zielstellungen sind in Tabelle 8 zu finden.

Für jede formulierte Zielstellung ist die Empfehlung, Haltestellen- und Linienabstände zu erhöhen. Dadurch können sowohl die betriebsbedingten Kosten als auch die Gesamtkosten und der Verlust reduziert werden.

Der optimale Haltestellenabstand für eine Optimierung ausschließlich zugunsten der Fahrgäste ist $D_{s,G1,Bus} = 450 \text{ m}$ und damit der niedrigste Wert aller Zielstellungen. Ferner ist eine Reduzierung der empfundenen Reisezeit nur bei $G1$ zu sehen.

	<i>Klassisch</i>	<i>G1</i>	<i>G2</i>	<i>G3</i>	<i>G4</i>
Haltestellenabstand [m]	350	450	1000	600	650
Linienabstand [m]	500	500 ¹	2600	650	850
reale Reisezeit [min]	22,1	21,4	29,3	21,6	22,3
empf. Reisezeit [min]	30,0	29,8	49,5	31,3	33,1
Nachfrage [Pers]	100	100 ¹	77	99	96
Betriebskosten	163	142	20	95	70
Gesamtkosten	663	638	656	612	601
Gewinn / Verlust	-88	-67	38	-21	2
Betriebskosten pro Pers	1,63	1,42	0,26	0,96	0,73

Tabelle 8: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach allen Optimierungskriterien für das Bus-Netz.

Das Maximieren des Profits resultiert in einem sehr grobmaschigen Netz. Die Betriebskosten sind folglich mit Abstand am kleinsten. Der Verlust an Nachfrage nach dem öffentlichen Verkehr ist verhältnismäßig gering (-23 %), obwohl die gewichtete Reisezeit vergleichsweise hoch ist (+65 %). Der Grund hierfür ist der relativ unempfindliche Verlauf der Nachfrageschätzung. Es bietet sich also an, in einer Sensitivitätsanalyse auch die Empfindlichkeitskoeffizienten des Logit-Modells zu variieren. Des Weiteren ist der Unterschied zwischen der realen und der empfundenen Reisezeit auffällig groß (+69 %), was sich auf das starke Gewicht der empfundenen Anmarschzeit zurückführen lässt. Durch die riesigen Abstände wird demgemäß auch der Zugangsweg sehr lang.

Die Haltestellenabstände für das Maximieren der Wohlfahrt und dem Minimieren der Gesamtkosten sind fast gleich, der Linienabstand letzteren Kriteriums ist zum Vorteil der Betriebskosten jedoch größer. Die empfundenen Reisezeiten sind unerheblich größer, Nachfrageverluste daher fast nicht vorhanden. Die enorm geringeren betriebsbedingten Kosten (*G3*: -42 %; *G4*: -57 %) kommen den Betreibern zugute, ohne dass Reisende bedeutsame Nachteile erfahren.

Die Ergebnisse für die Optimierung des mit Bahnen betriebenen Verkehrsnetzes befinden sich in Tabelle 9.

Auch für ein Bahn-Netz sollten Haltestellen- und Linienabstände für fast jede Zielstellung erhöht werden. Ausnahme bildet das Maximieren der ökonomischen Wohlfahrt, bei dem der Linienabstand im Vergleich zum klassischen Verkehrsnetz reduziert werden sollte. Die Betriebskosten und Verluste können in jedem Fall reduziert werden.

	<i>Klassisch</i>	<i>G1</i>	<i>G2</i>	<i>G3</i>	<i>G4</i>
Haltestellenabstand [m]	400	600	1150	750	800
Linienabstand [m]	1000	1000 ¹	3050	850	1100
reale Reisezeit [min]	26,3	24,7	32,2	23,8	24,7
empf. Reisezeit [min]	35,4	34,7	53,9	33,8	36,0
Nachfrage [Pers]	125	125 ¹	103	127	124
Betriebskosten	189	155	40	166	126
Gesamtkosten	927	878	966	881	870
Gewinn / Verlust	-33	1	89	-8	30
Betriebskosten pro Pers	1,51	1,24	0,39	1,31	1,01

Tabelle 9: Ergebnisse der Optimierung für ein klassisches Bahn-Netz.

Der Vergleich zu dem mit Bussen betriebenen Beispielnetz zeigt, dass die Abstände für Haltestellen und Linien für das mit Bahnen betriebene Gegenstück größer sein sollten. Die Distanzen zwischen den Haltestellen steigen durch die größere Reisedistanz (vgl. 5.2.1), die Abstände zwischen den Linien steigen wegen der höheren Frequenz, die die Kursfahrzeugdichte direkt erhöht. Damit steigen auch die Kosten, und der größere Linienabstand, der einen reziproken Einfluss auf die Fahrzeugdichte (vgl. 4.3) hat, kann dieser Kostensteigerung gewissermaßen Einhalt gebieten. Die Betriebskosten werden ferner ohnehin größer, da der Kostensatz für Bahnfahrzeuge größer ist (+67 %). Der bereits im klassischen Netz im Vergleich zum Bus-Netz relativ große Linienabstand ist sicherlich auch auf die drastisch höheren Infrastrukturkosten (siehe auch 2.3.1) zurückzuführen.

Der im Interesse der Reisenden bestmögliche Haltestellenabstand liegt bei etwa $D_{s,G1,Bahn} = 600\text{ m}$ und ist damit 50 % größer als im traditionellen Netz, wodurch folglich auch die Betriebskosten reduziert werden können.

Erneut fallen die Abstände für das Maximieren des Gewinns sehr groß aus. Die empfundene Reisezeit ist dementsprechend wieder deutlich größer als die reale Reisezeit. Das führt zu hohen Zeitkosten der Reisenden und damit auch dazu, dass die Gesamtkosten gegenüber dem klassischen Netz sogar ansteigen. Die Nachfrageverluste sind wieder relativ gering (-18 %), obwohl die empfundene Reisezeit stark zunimmt (+52 %).

Das Maximieren der ökonomischen Wohlfahrt bringt sogar eine Verkürzung der empfundenen Reisedauer gegenüber *G1* mit sich, wodurch die Nachfrage leicht ansteigt. Der Grund ist der kleinere Linienabstand, weswegen das wichtigste Reisezeitelement, die Zugangszeit, verkürzt werden kann. Ein interessantes Ergebnis, denn bei keiner anderen Optimierung konnte die Nachfrage gesteigert werden.

Für die Minimierung der Gesamtkosten ergibt sich wieder ein minimal größerer Haltestellenabstand im Vergleich zum Netz aus $G3$, der aber doppelt so groß wie jener des klassischen Netzes ist. Der Linienabstand sollte nur minimal wachsen (+10 %). Die gewichtete Reisezeit und die Nachfrage sind beinahe gleich wie im traditionellen Netz.

5.3 Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse ist ein Verfahren, mit dem die Empfindlichkeit eines Ergebnisses bei veränderten Eingangsbedingungen geprüft wird. Es gibt Aufschluss darüber, wie stabil das Optimum eines Systems bei Variationen des Dateninputs ist.

Die für jede Zielstellung ermittelten optimalen Werte für den Haltestellen- und Linienabstand stehen unter dem Einfluss vieler Annahmen des Modells. Im Falle der analytischen Lösung für $G1$ lässt sich dieser Umstand leicht an der Gleichung für den optimalen Haltestellenabstand erkennen:

$$D_{s,G1} = \sqrt{w_c D_c \left(\frac{v}{a} + t_s \right) \frac{4 v_a}{w_a}} \quad (5.3)$$

Vorgegebene Werte für beispielsweise Reisedistanz oder Anmarschgeschwindigkeit wirken sich unmittelbar auf den optimalen Abstand aus.

Es gilt nun, für alle Zielstellungen zu untersuchen, wie stark welche Eingabegrößen die Optima beeinflussen. Es werden Szenarien geprüft, in denen jeweils immer nur eine Kategorie der Größen variiert wird, damit die isolierte Wirkung einer Veränderung auf die Optima deutlich wird. Folgende Situationen werden betrachtet:

- Verwendung der realen, anstatt der empfundenen Reisezeit
- andere Zugangsgeschwindigkeiten der Reisenden
- andere Höchstgeschwindigkeiten der Fahrzeuge
- unterschiedliche Standzeiten an Halten
- abweichende Reisedistanzen
- höhere Geschwindigkeit des Individualverkehrs
- Logit-Modell nach Schäffeler (2004)

Wie andersartig wären die Netze strukturiert, wenn das Zeitgefühl der Fahrgäste für alle Reisezeitelemente gleich wäre? Es ist zu erwarten, dass die Abstände zwischen Haltestellen und Linien steigen, da dem Anmarsch keine mit Abstand größere Bedeutung wie bisher zukommt.

Ferner sind auch unterschiedliche Angaben über die Fußgängergeschwindigkeit bekannt, sodass diese auch variiert werden sollte. Auf Google Maps wird sie mit 5 km/h angenommen (OpenStreetMap, 2014), in verkehrsberuhigten Bereichen zählen

7 km/h noch als Schritttempo (Verkehrswörterbuch, 2005). Die durchschnittliche Anmarschgeschwindigkeit kann natürlich zusätzlich auch durch den multimodalen Zugang mittels Fahrrädern erhöht werden (vgl. Kapitel 3.4). Ältere Menschen sind in der Regel deutlich langsamer. Gleiches gilt auch für jüngere Menschen, wenn sie zum Beispiel eine Steigung bewältigen müssen, um zur nächsten Haltestelle zu kommen.

Auch die Höchstgeschwindigkeiten der Fahrzeugarten bedürfen einer Veränderung. Busse, aber auch Stadtbahnen müssen durchaus mit Verzögerungen durch Signale im Straßenverkehr rechnen. Furth & Rahbee (2000) geben die Geschwindigkeit von Bussen an Kreuzungen mit $v = 24 \text{ km/h}$ an. Höher als die bisher verwendete maximale Geschwindigkeit von 50 km/h darf sie allerdings für Busse innerorts aus gesetzlichen Gründen nicht sein (StVO §3). Stadtbahnen jedoch dürfen auf ihrem, wenn vom Individualverkehr unabhängigen, Bahnkörper 70 km/h fahren, in Tunneln sogar 80 km/h (SSB 2014).

Es sollten außerdem Szenarien mit unterschiedlichen Standzeiten untersucht werden. Denn es kann sein, dass an Haltestellen niemand, oder besonders viele Passagiere ein- oder aussteigen wollen. Des Weiteren werden von den Annahmen abweichende Reisedistanzen untersucht, sowie eine höhere durchschnittliche Geschwindigkeit des Individualverkehrs. Mit bisher festgelegten $v_{iv} = 15 \text{ km/h}$ war diese im Vergleich zur Beförderungsgeschwindigkeit der Busse bei Minimieren der empfundenen Reisezeit mit etwa $v = 24 \text{ km/h}$ äußerst gering.

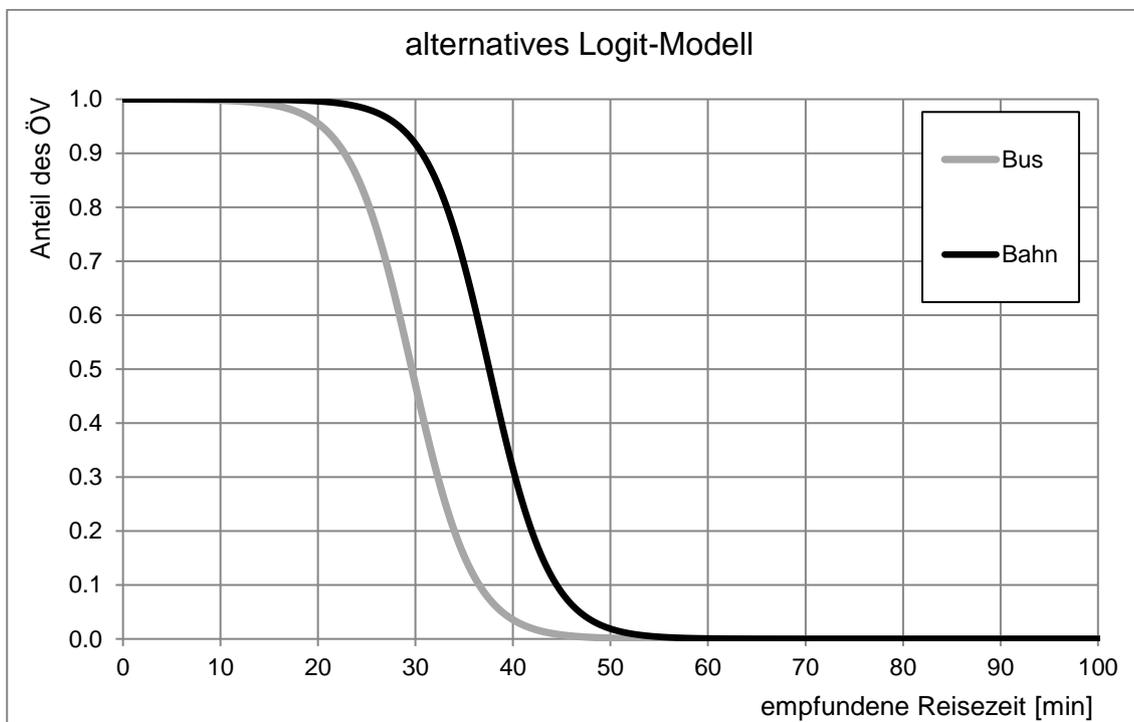


Abbildung 19: Alternative Nachfrageschätzung nach Schäffeler (2004).

Schließlich wird noch ein alternatives Logit-Modell nach Schäffeler (2004) verwendet, welches in Anhang 2 näher erläutert wird. Die zugehörigen Nachfragekurven unterscheiden sich deutlich von den bisherigen und sind in Abbildung 19 dargestellt.

Es fällt sofort auf, dass die Nachfrage zunächst für als kleine empfundene Reisezeiten bei 100 % startet und in einem sehr kleinen Bereich der Reisedauer rapide sinkt, bis sie sich dann schnell der 0 % Marke nähert. Reisende reagieren dieser Schätzung zufolge sensibler auf Änderungen der empfundenen Reisezeit und entscheiden sich bei vergleichsweise geringen Reisezeiten bereits vollständig für den Individualverkehr.

Eine Übersicht über die konkreten Variationen der Parameter ist in Tabelle 10 gegeben.

Bezeichnung	Werte bzw. -bereiche
gleich gewichtete Reisezeitelemente	$w_a = w_w = w_c = w_e = 1,0$
Zugangsgeschwindigkeit	$2 \text{ km/h} \leq v_a \leq 7 \text{ km/h}$
maximale Geschwindigkeit ÖV	$30 \text{ km/h} \leq v \leq 70 \text{ km/h} *$
Standzeit an einer Haltestelle	$0 \text{ s} \leq t_s \leq 40 \text{ s}$
Reisedistanz	$0,8 D_c \leq D_c \leq 1,2 D_c$
durchschnittliche Geschwindigkeit IV	$v_{iv} \leq 25 \text{ km/h}$
alternatives Logit-Modell	$\beta_{\text{öv}} = \beta_{iv} = 0,318 \text{ min}^{-1}$ zus. Nutzenkonstante $C_{iv} = -4,0467$

Tabelle 10: Für die Sensitivitätsanalyse verwendete Werte für einzelne Größen; * nur für Bahnen $v > 50 \text{ km/h}$.

Die prozentualen Unterschiede zwischen den neuen und ursprünglichen Parameterwerten sind für den Zugang und die Standzeit natürlich größer, als für die ÖV-Geschwindigkeit oder die Reisedistanz. Demzufolge darf dort auch eine stärkere Einflussnahme erwartet werden.

Im Folgenden wird für jede Zielstellung eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Entscheidend dabei sind die relativen Änderungen der Optima und weniger die konkreten Abstände, die durch veränderte Parameter entstehen. Dementsprechend beziehen sich diese relativen Änderungen auch auf die ursprünglichen Werte derselben Zielstellung, die in der Ergebnisübersicht 5.2.5 eingesehen werden können.

5.3.1 Minimieren der empfundenen Reisezeit

Für die Optimierung nach $G1$ liegt eine fest vorgegebene unelastische Nachfrage zugrunde, weswegen eine höhere durchschnittliche Geschwindigkeit des Individualverkehrs oder der Einsatz eines alternativen Logit-Modells keine Auswirkungen zeigen.

Das Ergebnis für die verbliebenen fünf Kategorien ist für den Haltestellenabstand im Bahn-Netz in Abbildung 20 zu sehen. Das jeweils verschobene Optimum ist identisch für das Bus-Netz.

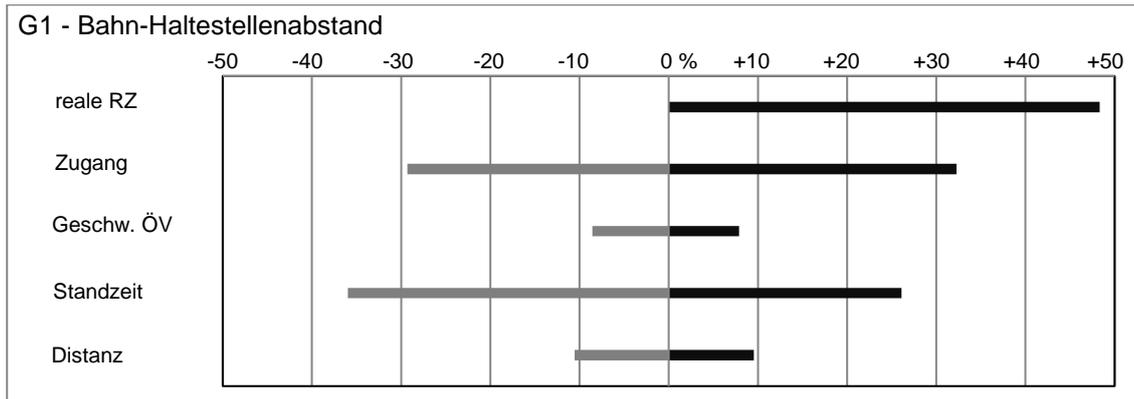


Abbildung 20: Sensitivitätsdiagramm für die Minimierung der empfundenen Reisezeit.

Wie erwartet wächst die Haltestellendistanz für die ungewichtete Reisezeit enorm, da jedes Reisezeitelement nun gleich wichtig ist. Die Zugangsgeschwindigkeit beeinflusst den Abstand ebenfalls erwähnenswert. Ein langsamerer Anmarsch kommt dabei einer stärkeren Gewichtung der Zugangszeit gleich, der Haltestellenabstand wird dadurch größer. Eine längere Standzeit und höhere Maximalgeschwindigkeiten bedeuten einen größeren Zeitverlust pro Halt und damit auch größere Abstände, kleinere Werte wirken entsprechend umgekehrt.

Durch die analytisch hergeleitete Formel für den optimalen Haltestellenabstand ist der Einfluss der einzelnen Größen proportional.

5.3.2 Maximieren des Gewinns

Die Netzstruktur nach $G3$ zeichnet sich durch große Haltestellen- und sehr große Linienabstände aus. Die Vorgehensweise zur Gewinnmaximierung besteht also darin, die betriebsbedingten Kosten extrem niedrig zu halten, während man, durch die unempfindliche Nachfrage bedingt, noch ausreichend Einnahmen mit dem Angebot erwirtschaftet. Am interessantesten ist hier also die alternative Nachfrageschätzung.

In allen Szenarien, die Reisedistanz ausgenommen, vergrößern sich beide Abstände für das Bus-Netz weiter. Für das neue Logit-Modell konnte kein Optimum gefunden werden: für unendlich große Abstände sind die Kosten offenbar geringer, als die

Differenz zwischen Einnahmen und Kosten für ein engmaschigeres, kundenfreundliches Netz.

Ein auffälliger Unterschied zum Bahn-Netz ist, dass hier ein Optimum unter Verwendung des veränderten Logit-Modells gefunden werden kann, für das der Haltestellenabstand um etwa 30 % abnehmen sollte. Wie in Abbildung 21 zu erkennen, sollte der Linienabstand sogar noch deutlicher sinken. Es entsteht also ein Netz, für das der Umsatz durch die vorhandene Nachfrage die gestiegenen Kosten für das engere Netz überwiegt.

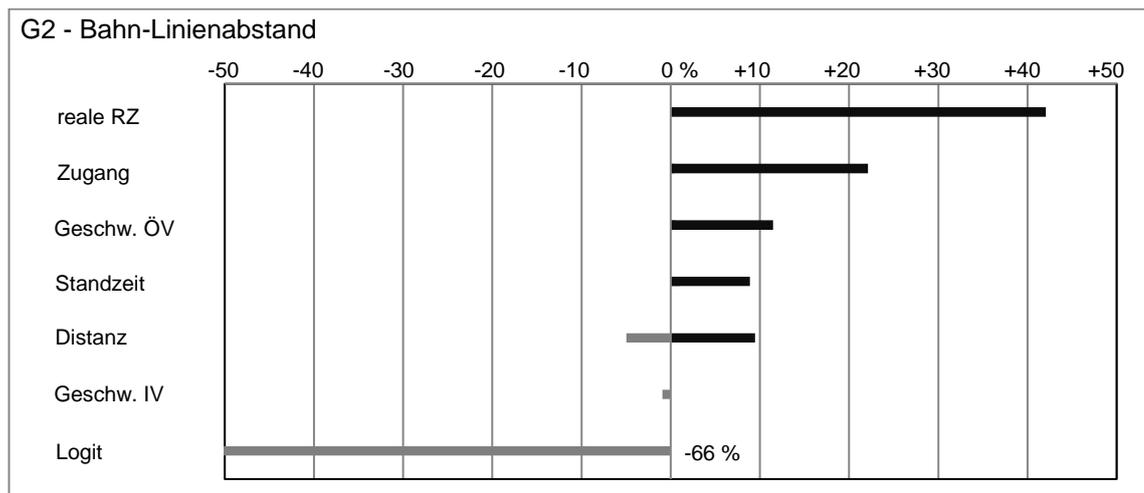


Abbildung 21: Sensitivitätsdiagramm für den Linienabstand im Bahn-Netz.

Die übrigen Variationen resultieren, wie auch schon für das Bus-Netz und den Bahn-Haltestellenabstand, größtenteils in einer Steigerung der Distanzen. Die Geschwindigkeit des Individualverkehrs hat durchweg keinerlei Auswirkungen für das Maximieren des Gewinns.

5.3.3 Maximieren der ökonomischen Wohlfahrt

Für die Zielstellung G3 verhalten sich die Verkehrsnetze bei Variation der Eingabegrößen unabhängig der Fahrzeugart beinahe identisch.

Sowohl die höhere Durchschnittsgeschwindigkeit des Individualverkehrs, als auch das alternative Nachfragemodell führen praktisch zu keinen anderen optimalen Werten für die Haltestellendistanz. Die relativen Änderungen, bedingt durch die restlichen Faktoren, entsprechen denen bei der Minimierung der gewichteten Reisezeit (siehe Abbildung 22). Das Gleichgewichten der Zeitelemente und verschiedene Zugangsgeschwindigkeiten wirken sich genauso wie auf die Haltestellen-, auch auf die Liniendistanz aus.

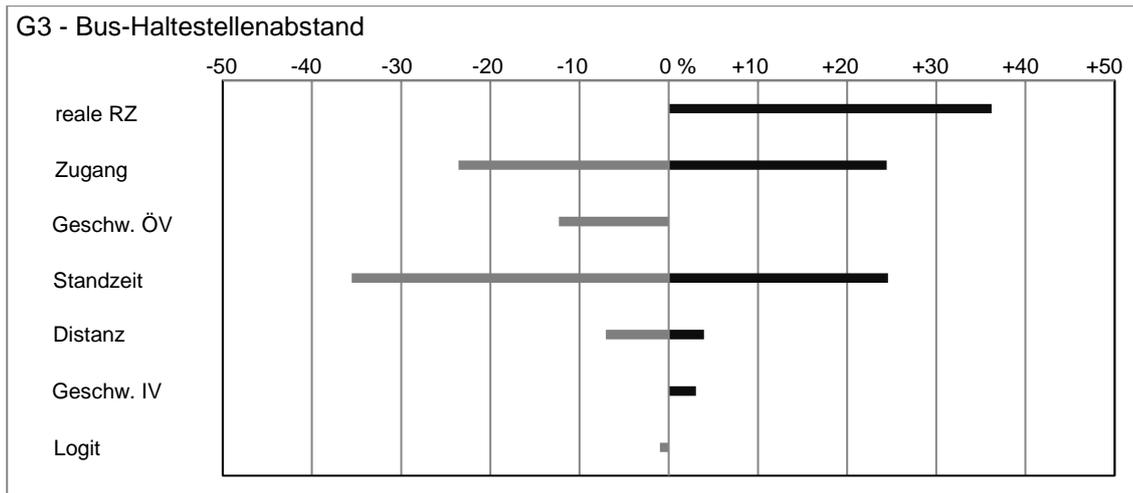


Abbildung 22: Veränderte Optima für das Maximieren der Wohlfahrt.

Eine verringerte Maximalgeschwindigkeit des öffentlichen Verkehrs bewirkt einerseits kleinere Haltestellen-, aber gleichzeitig größere Linienabstände (+15-20 %). Variationen der Standzeit, Reisedistanz oder der Geschwindigkeit des IV nehmen scheinbar keinen Einfluss auf den Linienabstand.

Die einzige nennenswerte Wirkung der alternativen Nachfrageschätzung ist eine Verringerung des Linienabstands für Bahn-Netz um 17 %. Die Kosten können dadurch leicht gesenkt werden. Des Weiteren sinken die Anmarschdistanzen, dadurch auch die gewichtete Reisezeit und die Nachfrage steigt bedeutend an. Es reichen praktisch minimale Anpassungen, damit das Angebot des öffentlichen Verkehrs den kleinen Bereich ausreichend großer Nachfrage nicht ‚verlässt‘.

5.3.4 Minimieren der Gesamtkosten

Die optimalen Werte zum Minimieren der Gesamtkosten sind die empfindlichsten. Für eine höhere IV-Geschwindigkeit und die Verwendung des anderen Logit-Modells konnten weder für das Bus- noch das Bahn-Netz Optima gefunden werden. Das Gleiche gilt für eine verringerte Zugangsgeschwindigkeit. Für $v_a = 7 \text{ km/h}$ waren die optimalen Werte in allen Fällen etwa 20 % größer.

Die Tendenz für die fehlgeschlagenen Optimierungen war, wie in 5.2.4 bereits erwähnt, unendlich große Haltestellen- und Linienabstände zu wählen, um die Betriebskosten derart zu minimieren, dass keine Nachfrage und daher keine Zeitkosten Reisender mehr vorhanden sind.

Für die verbleibenden Einflüsse sind die Sensitivitätsdiagramme für den Betrieb mit Bussen in Abbildung 23 und Abbildung 24 zu finden. Die Schaubilder für das Bahn-Netz sind nahezu gleich.

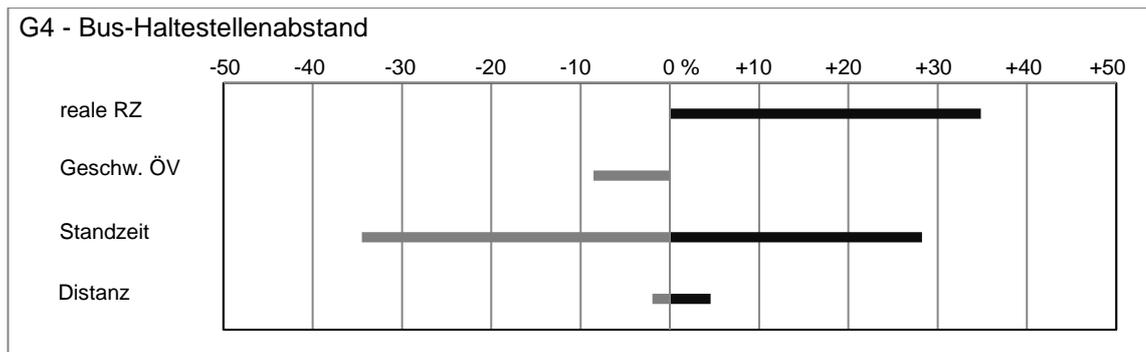


Abbildung 23: neue Bus-Haltestellenabstände im Vergleich zum Optimum nach *G4*.

Der optimale Haltestellenabstand bleibt bei Änderungen der Reiseweite etwa gleich, während er, wie für alle anderen Zielstellungen, mit der realen Reisezeit oder einer längeren Standzeit ansteigt. Eine geringere Maximalgeschwindigkeit führt zu geringeren Zeitverlusten an Haltestellen und damit zu einer Reduzierung der Haltestellendistanz.

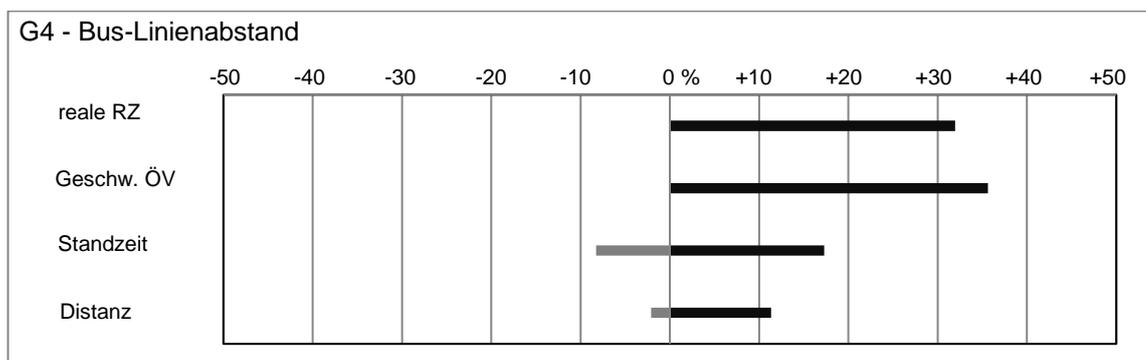


Abbildung 24: veränderte Linienabstände für ein Bus-Netz.

Die Reisedistanz nimmt größeren, die Standzeit kleineren Einfluss auf den Linienabstand. Wie auch schon für *G3* ist hier zu beobachten, dass der Linienabstand mit einer geringeren Maximalgeschwindigkeit des öffentlichen Verkehrs zunimmt. In diesem Fall ist die Steigerung deutlich über der von anderen Optimierungen.

Ebenfalls wie bei allen anderen Zielstellungen erhöht die Berücksichtigung der realen Reisezeit den Linienabstand, da auch dieser die Anmarschdistanz maßgeblich beeinflusst.

5.3.5 Fazit

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Variation unterschiedlicher Faktoren eine verschieden große Wirkung auf Optima hat. Fasst man die Ergebnisse aller untersuchten Zielstellungen zusammen, so stellt man fest, dass die Anmarschgeschwindigkeit respektive abweichende Gewichtung der Zugangszeit sowohl

Haltestellen- als auch Linienabstände stark beeinflusst. Wird die Zugangszeit als gleich wichtig erachtet, wie alle anderen Reisezeitanteile auch, wachsen die Abstände meist um ca. 30-45 %.

Die Standzeit der Fahrzeuge an Haltestellen nimmt vor allem großen Einfluss auf den Haltestellenabstand. Eine genaue Angabe ihrerseits ist jedoch schwierig. Ohne detaillierte Kenntnis über die Anzahl Ein- und Aussteigender lässt sich nur ein Durchschnittswert vermuten.

Änderungen der maximal möglichen Geschwindigkeit der ÖV-Fahrzeuge sowie eine höhere durchschnittliche Geschwindigkeit des Individualverkehrs zeigen in den meisten Fällen verhältnismäßig wenig bis keine Auswirkungen.

Der Einfluss kürzerer oder längerer Reisedistanzen ist vorhanden, jedoch gering. Bei der Variation um $\pm 20\%$ ergeben sich Änderungen für Haltestellen- und Linienabstand von ca. $\pm 5-10\%$. Größere Reisedistanzen bewirken ebenfalls größere Haltestellen- und Linienabstände und umgekehrt. Dessen ungeachtet ist die Annahme durchschnittlicher Reiseweiten für effiziente Optimierungen nach van Nes (2000) notwendig und sinnvoll.

Die Auswirkung der alternativen Nachfrageschätzung auf die Optima könnte nicht verschiedenartiger sein. So konnten für das Minimieren der Gesamtkosten überhaupt keine optimalen Werte mehr bestimmt werden, der Einfluss auf die Abstände, die sich aus dem Maximieren der Wohlfahrt ergeben, ist jedoch verschwindend. Hinzu kommt, dass bei der Profitmaximierung für ein Bus-Netz ebenfalls keine, für das Bahn-Netz aber optimale Werte gefunden werden konnten.

6 Zusammenfassung

Die Arbeit zeigt, dass Haltestellen- und Linienabstände großen Einfluss auf Betriebskosten und Angebotsqualität haben. Die Attraktivität des Angebots für die Fahrgäste und der Verlust beziehungsweise Gewinn für den Betreiber gehen damit Hand in Hand. Unterschiedliche Haltestellenabstände haben dabei eine größere Wirkung auf die Reisezeit, während die Linienabstände maßgeblich die betriebsbedingten Kosten bestimmen.

Die Wahl der Zielstellung für eine Optimierung ist von größter Bedeutung, da abhängig davon große Unterschiede zwischen den optimalen Abständen für ein Netz bestehen. Die Ergebnisse machen deutlich, dass eine Optimierung im Sinne der Betreiber und der Reisenden einen guten Kompromiss für die Parteien darstellt und am sinnvollsten ist. Als besonders gut geeignet stellt sich das Maximieren der ökonomischen Wohlfahrt als Ziel heraus: Sowohl Zeitvorteile der Fahrgäste als auch der Gewinn des Betreibers sind enthalten. Im Vergleich zu klassischen Verkehrsnetzen sollten dabei die Haltestellenabstände fast verdoppelt werden, die Distanz zwischen Linien sollte für Bus-Netze größer, für Bahn-Netz etwas kleiner ausfallen. Die optimalen Werte ändern sich für eine alternative Nachfragemodellierung nicht bedeutend. Dieser Umstand macht die Zielstellung daher vor allem für Einsatzgebiete, in denen es schwer ist, das Nachfrageverhalten detailliert abzubilden, attraktiv. Das resultierende Netz ist für den Betreiber im Vergleich kostengünstiger zu unterhalten und für Reisende mehr oder weniger identisch, was empfundene Reisezeiten angeht.

Eine weitere Zielstellung die versucht, die Balance zwischen den Interessen der involvierten Gruppen herzustellen, ist die Minimierung der Gesamtkosten. Diese erweist sich als äußerst empfindlich im Bezug auf die Schätzung der Nachfrage, denn nicht immer konnten optimale Werte gefunden werden. Möglicherweise wären weitere Untersuchungen mit anderen Nachfragemodellen, oder gar der Annahme einer unelastischen Nachfrage nötig, um zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten. Bei der Optimierung eines realen Netzes sollten ohnehin ausreichend Kenntnisse über Einwohnerdichte, angezogene und ausgehende Nachfrage und Siedlungsstruktur vorhanden sein, damit Unsicherheiten über die mögliche Fahrgastzahl beseitigt werden können.

Die Sensitivitätsanalyse offenbart, dass die getroffenen Annahmen durchaus einen großen Einfluss auf Optima haben, und daher wohl überlegt gewählt werden sollten. Dabei spielen zum Beispiel die Gewichtungsfaktoren für die Reisezeitanteile oder die Standzeit der Fahrzeuge an Haltestellen eine äußerst wichtige Rolle. In der Literatur gibt es bereits einige Werte für die unterschiedlichen Gewichtungen, die tendenziell übereinstimmen: Der Zugang ist für Reisende am wichtigsten, danach folgt das Warten der Fahrgäste an einer Haltestelle bis zur Abfahrt des nächsten Fahrzeugs.

Es gibt natürlich auch Möglichkeiten, die empfundene Reisezeit mit anderen Mitteln zu reduzieren. So wäre eine moderne und bessere Ausstattung der Haltestellen eine Option. Die aktuellen Nachrichten könnten auf großen Bildschirmen, wie es auch schon in einigen deutschen Städten der Fall ist, eingeblendet werden, um die gefühlte Wartezeit für die Reisenden zu verkürzen. Zusätzlich ist der schnellere Zugang mit dem Fahrrad attraktiver, wenn es direkt an Haltestellen Vorrichtungen zum Abschließen gibt.

Aus den diversen Vereinfachungen im Modell folgt natürlich, dass die konkreten optimalen Werte dieser Arbeit nicht eins zu eins für reale Verkehrsnetze verwendet werden können. In der Realität sind Haltestellen- und Linienabstände nicht konstant. Ein Netzentwurf muss selbstverständlich auch die örtlichen Umstände und die Umgebung berücksichtigen und an sie angepasst werden. Die optimalen Abstände sind vielmehr als Empfehlungen gedacht und zeigen Tendenzen auf, wie die Wahl der Abstände die Eigenschaften des Netzes beeinflussen können.

Es darf nicht vergessen werden, dass Frequenz, Fahrzeugkapazitäten und der genaue Fahrplan ebenfalls Kernelemente der Angebotsplanung sind, die in dieser Arbeit nicht bedacht wurden. Nimmt man derartige Größen für Optimierungen hinzu, entstehen weitere Aufgaben für die Forschung in diesem Gebiet.

7 Abkürzungsverzeichnis

T_t	empfundene Reisezeit	r_d	Ticketpreis pro km
T_a	Zugangszeit	S_o	Gewinn Betreiber
T_w	Wartezeit	S_t	Vorteil der Reisenden
T_c	Beförderungszeit	P	ÖV-Nachfrage
T_u	Umsteigezeit	P_0	gesamte Nachfrage
t_e	Abgangszeit	β_i	Empfindlichkeitskoeffizienten
T_k	Kursfolgezeit, Takt	V_i	Nutzen für Modus i
T_s	Beförderungszeit zw. Halten	C_{iv}	Nutzenkonstante IV
t_s	Standzeit	F	Frequenz
t_l	Zeitverlust pro Haltestelle	v_c	Beförderungsgeschwindigkeit
t_{FW}	Fahrzeugwechselzeit	v	Höchstgeschwindigkeit ÖV
t_{iv}	Zeitzuschlag IV	v_a	Zugangsgeschwindigkeit
D_a	Anmarschdistanz	v_{iv}	durchschn. Geschwindigkeit IV
D_c	Reisedistanz	a	Beschleunigung
D_s	Haltestellenabstand	d	Bremsverzögerung
D_l	Linienabstand	w_i	Gewichtungsfaktoren
Z	Kursfahrzeugdichte	R	Fläche
C_o	Kosten für Betreiber	$G1$	Minimieren empf. Reisezeit
c_o	Kosten pro Fahrzeugstunde	$G2$	Maximieren des Gewinns
C_t	Kosten für Reisende	$G3$	Maximieren der Wohlfahrt
c_t	Zeitwert der Reisenden	$G4$	Minimieren der Gesamtkosten
R_o	Einnahmen Betreiber		

8 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausschnitt aus dem Stadtgebiet Stuttgarts: gitterförmige Anordnung der Straßen (Google Inc., 2014).....	7
Abbildung 2: Wartezeitfunktionen für fahrplanabhängigen und fahrplan-unabhängigen Fahrgastzufluss an einer Haltestelle	8
Abbildung 3: Die Konsumentenrente als Fläche dargestellt, abhängig von Angebot und Nachfrage; nach (van Nes, 2000).....	13
Abbildung 4: Ergebnistabelle der Untersuchung einer Buslinie in Baltimore City; Ausschnitt aus (Saka, 2001).....	17
Abbildung 5: Von mehreren Linien befahrener Korridor in Anlehnung an (Khondaker & Wirasinghe, 2013)	20
Abbildung 6: Exponentieller Verlauf des Zeitverlustes in Abhängigkeit der Anzahl einsteigender Fahrgäste; angelehnt an (Cundill & Watts, 1973)	21
Abbildung 7: Aufbau des untersuchten Ausschnitts des öffentlichen Verkehrsnetzes (van Nes, 2001)	23
Abbildung 8: Zusammenhang zwischen Strecken- bzw. Linienabstand und Takt (Schäffeler, 2004).....	26
Abbildung 9: Schematischer Aufbau eines öffentlichen Verkehrsnetzes in Anlehnung an (Schäffeler, 2004).....	28
Abbildung 10: Gleichgewichtslinie g als Grenze der Einzugsgebiete für die Haltestellen A und B	30
Abbildung 11: Aufbau des verwendeten Modells.....	32
Abbildung 12: durchschnittlicher Anmarschweg im Einzugsgebiet.....	33
Abbildung 13: Vorteil der Reisenden als Fläche unter der Nachfragekurve.....	36
Abbildung 14: Kurven für die Schätzung der Nachfrage je nachdem, welches Netz mit zugehöriger Fahrzeugart betrachtet wird	39
Abbildung 15: Reisezeitanteile in Abhängigkeit des Haltestellenabstands für ein mit Bussen betriebenes Netz.....	42
Abbildung 16: 3D-Plot des erzielbaren Profits für den Betreiber je nach Haltestellen- und Linienabstand. Die Werte beziehen sich auf ein Verkehrsnetz, in dem Busse eingesetzt werden.	43
Abbildung 17: Oberflächendiagramm der ökonomischen Wohlfahrt für ein mit Bahnen betriebenes Verkehrsnetz.....	44
Abbildung 18: Plot der Gesamtkosten über Haltestellen- und Linienabstand.....	45
Abbildung 19: Alternative Nachfrageschätzung nach Schäffeler (2004)	50
Abbildung 20: Sensitivitätsdiagramm für die Minimierung der empf. Reisezeit.....	52
Abbildung 21: Sensitivitätsdiagramm für den Linienabstand im Bahn-Netz	53
Abbildung 22: Veränderte Optima für das Maximieren der Wohlfahrt.....	54
Abbildung 23: neue Bus-Haltestellenabstände im Vergleich zum Optimum nach $G4$...	55
Abbildung 24: veränderte Linienabstände für ein Bus-Netz.....	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung der Autoren mit untersuchten Fragestellungen.....	14
Tabelle 2: Gewichtungswerte für Zugangs- und Beförderungszeit	19
Tabelle 3: Gewichtung der Reisezeitelemente nach van Nes (2000)	24
Tabelle 4: Berechnete Gewichtungsfaktoren aus den Parametern für die Nutzenfunktion.....	27
Tabelle 5: Parameterwerte zur Gewichtung der berücksichtigten Reisezeitelemente..	30
Tabelle 6: Modellparameter mit zugehörigen Werten für die Optimierung einer Buslinie in Bosten, USA.....	31
Tabelle 7: Werte der Systemparameter	38
Tabelle 8: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach allen Optimierungs- kriterien für das Bus-Netz	47
Tabelle 9: Ergebnisse der Optimierung für ein klassisches Bahn-Netz	48
Tabelle 10: Für die Sensitivitätsanalyse verwendete Werte für einzelne Größen; * nur für Bahnen $v > 50 \text{ km/h}$	51

9 Literaturverzeichnis

- Brändli, H., & Müller, H. (1981). *Fahrplanabhängigkeit des Fahrgastzuflusses zu Haltestellen*. Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Cundill, M. A., & Watts, P. F. (1973). *Bus boarding and alighting times*. Crowthorne, Großbritannien: Transport and Road Research Laboratory, LR 521.
- DNB. (2014). *De Nederlandsche Bank*. Abgerufen am 31. März 2014 von <http://www.dnb.nl/en/payments/exchanging-guilders/rules-for-exchanging-guilder-notes/index.jsp>
- Erkens, A., & Wiggenraad, P. B. (1994). *Tramverbinding Den Haag - Rijswijk Steenvoorde: Second-opinion-onderzoek naar de vervoerwaarde en het tracé*. Delft University of Technology, Faculty Civil Engineering and Geosciences.
- Europäisches Komitee für Normung. (2001). *EN 13816*.
- Friedrich, M., & Ressel, W. (2013). *Verkehrsplanung und Verkehrstechnik*. Universität Stuttgart: Institut für Straßen- und Verkehrswesen.
- Furth, P. G., & Rahbee, A. B. (2000). Optimal bus stop spacing through dynamic programming and geographic modeling. *Transportation Research Record*.
- Hakimi, S. L. (1964). Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. *Operations Research Vol. 12*.
- Hoogendoorn-Lanser, S., & Hoogendoorn, S. (2002). *Public Urban Transport Trip-Chain Time-Attribute Analysis*. Modeling for Transportation Systems Planning; Delft University Press.
- Khondaker, B., & Wirasinghe, S. C. (2013). Bus stop spacing and location for a corridor with multiple bus routes. *Master Compendium - Conference Technical Papers*. Canadian Institute of Transportation Engineers.
- Lüthi, M. (2005). *Abhängigkeiten zur zeitlichen Verteilung des Fahrgastzuflusses an Haltestellen*. Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Minocha, V. K., & Saka, A. A. (2002). Discussion and closures; Model for determining optimum bus-stop spacing in urban areas. *Journal of Transportation Engineering*.
- OpenStreetMap. (2014). *OpenStreetMap*. Abgerufen am 25. März 2014 von <https://www.openstreetmap.de/karte.html>
- Pline, J. L. (1992). *Traffic engineering handbook*. Englewood Cliffs, New Jersey: Institute of Transportation Engineers, Prentice Hall.
- Pushkarev, B., & Zupan, J. M. (1975). *Urban space for pedestrians*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press.
- Saka, A. A. (2001). Model for determining optimum bus-stop spacing in urban areas. *Journal of Transportation Engineering Vol. 127*.
- Saka, A. A., & Minocha, V. K. (2002). Discussions and closures - "Model for determining optimum bus-stop spacing in urban areas". *Journal of Transportation Engineering*.

- Schäfer, F. (2001). Nachfrage effizient ermitteln. *Der Nahverkehr*, Jg. 19, Nr. 6.
- Schäffeler, U. (1999). *Optimale Haltestellenabstände für den öffentlichen Nahverkehr in den Niederlanden unter spezieller Berücksichtigung des multimodalen Verkehrs*. Zürich / Delft: Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Schäffeler, U. (2002). Line density and headway optimisation. *Conference paper STRC 2002*. Zürich: Swiss Transport Research Conference.
- Schäffeler, U. (2004). *Netzgestaltungsgrundsätze für den öffentlichen Personennahverkehr in Verdichtungsräumen*. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Schwarz, B. (13. Februar 2014).
- Straßenverkehrs-Ordnung (StVO). (1. April 2013). Deutschland.
- van der Waard, J. (1988). *The relative importance of public transport trip-time attributes in route-choice*. England: PTRC Education and Research Services.
- van Nes, R. (2000). *Optimal stop and line spacing for urban public transport networks*. Delft: The Netherlands TRAIL Research School.
- van Nes, R. (2001). The Impact of Alternative Access Modes on Urban Public Transport Network Design. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, No. 2.
- van Nes, R. (2002). *Design of multimodal transport networks*. Delft University of Technology: The Netherlands TRAIL Research School.
- van Nes, R., & Bovy, P. (2000). *Importance of Objectives in Urban Transit-Network Design*. Transportation Research Record 1735.
- VDV, V. D. (2001). Verkehrserschließung und Verkehrsangebot im ÖPNV. *VDV Schriften*.
- Verkehrswallexikon. (2005). *Das Verkehrswallexikon*. Abgerufen am 06. April 2014 von <http://www.verkehrswallexikon.de/Texte/Verkehrsberuhigt01.php>
- Vimentis Lexikon. (2014). Abgerufen am 24. März 2014 von <http://www.vimentis.ch/d/lexikon/197/Wohlfahrt.html>
- Wirasinghe, S. C., & Vandebona. (1983). Optimization and Analytical Modelling in Transit planning: Application to a Commuter Bus Route with Uniform Spacing. *Transportation System Analysis and Policy Studies*.

10 Anhang

Anhang 1:	Nebenbedingung für den Haltestellenabstand	65
Anhang 2:	Erläuterungen zu alternativem Logit-Wahlmodell	66

Anhang 1: Nebenbedingung für den Haltestellenabstand

Die Formel

$$T_c = \frac{D_c}{D_s} \left(\frac{D_s}{v} + \frac{v}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{d} \right) + t_s \right) \quad (4.5)$$

setzt voraus, dass die Höchstgeschwindigkeit v erreicht wird, denn sie beinhaltet auch die vollständigen Zeitanteile für das Beschleunigen und Bremsen zwischen v und Stillstand. Damit die Richtigkeit der Berechnung der Beförderungsgeschwindigkeit gewährleistet ist, wird eine Bedingung für den Haltestellenabstand eingeführt.

Sei s_a der Weg, der für den Beschleunigungsvorgang nötig ist und s_d die Strecke, die ein Fahrzeug braucht um anzuhalten. Damit die maximale Geschwindigkeit erreicht wird, muss gelten:

$$D_s \geq s_a + s_d$$

Mit

$$s = \frac{1}{2} at^2$$

$$t = \frac{v}{a}$$

und Umformungen ergibt sich für die Bedingung für den Haltestellenabstand

$$D_s \geq \frac{1}{2} v^2 \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{d} \right)$$

Wenn $a = d$ gilt, vereinfacht sich diese Bedingung zu

$$D_s \geq \frac{v^2}{a}$$

Für $v = 50 \frac{km}{h}$ und $a = d = 1 \frac{m}{s^2}$ wäre der minimale Haltestellenabstand beispielsweise $D_s = 193 m$, damit Formel (4.5) nicht an Gültigkeit verliert. Dieser Wert ist relativ gering, sodass die Bedingung in der Anwendung in Kapitel 5 nicht verletzt wird.

Anhang 2: Erläuterung zu alternativem Logit-Wahlmodell

Das für die Sensitivitätsanalyse verwendete alternative Logit-Modell nach Schöffeler (2004) hat die folgende Form:

$$P(T_t) = P_0 \frac{e^{V_{\ddot{O}V}}}{e^{V_{\ddot{O}V}} + e^{V_{IV}}}$$

Die Nutzenfunktionen ergeben sich zu:

$$V_{\ddot{O}V} = -\beta_{\ddot{O}V} T_t$$

$$V_{IV} = C_{IV} - \beta_{IV} T_{t,IV}$$

Die Konstante C_{IV} beinhaltet den negativen Nutzen, den die Wahl des Individualverkehrs zusätzlich zur Reisezeit mit sich bringt, wie z.B. Kosten für das Parken oder möglicher Stau. Sie enthält praktisch alle Merkmale, die das Angebot vom öffentlichen Verkehrsangebot unterscheiden. Schöffeler gibt für diese Konstante folgenden Wert an:

$$C_{IV} = -4,0467$$

Die Reisezeiten für ÖV und IV werden weiterhin nach der gleichen Vorgehensweise berechnet. Die Reisezeitanteile des öffentlichen Verkehrs werden mit den Gewichtungsparemtern versehen, zur Fahrzeit des IV kommt noch ein Zeitzuschlag für Anmarsch, Parken und dergleichen.

Ferner sind die Empfindlichkeitskoeffizienten für die Modi gleich:

$$\beta_{\ddot{O}V} = \beta_{IV} = \beta = 0,318 \text{ min}^{-1}$$

Das bedeutet, dass ohne die Berücksichtigung obiger Konstante, sich bei identischen gewichteten Reisezeiten beider Möglichkeiten jeweils eine Hälfte für den ÖV, und eine für den IV entscheiden würde. Der zusätzliche konstante Nutzenwert C_{IV} verschlechtert das Angebot des IV und verschiebt das Nachfragegleichgewicht und die gesamte Nachfragekurve nach rechts, in Richtung größerer empfundener Reisezeiten.

Insgesamt ergibt sich damit:

$$P(T_t) = P_0 \frac{e^{-\beta T_t}}{e^{-\beta T_t} + e^{C_{IV} - \beta T_{t,IV}}}$$