

UNTERSUCHUNG DER LEISTUNGSFÄHIGKEIT UND DES LEISTUNGSVERHALTENS EINES STRASSENBAHN-ENDPUNKTES

Zsolt DENKE

Lehrstuhl für Verkehrsbetrieb
TU Budapest
H-1521 Budapest, Ungarn
Tel: 36 1 463 1926
Fax: 36 1 463 3269
e-mail: denkezs@kku.bme.hu

Eingegangen: Dec. 10, 1999

Abstract

The object of this analysis is a tram terminal, which is one of the main elements of the public transport system. The results of traffic counts have been used to describe the arriving and starting process of trams. If all of the tracks in the terminal are occupied the arriving trams queue on the open track in front of the terminal and they must wait. This problem results in low public transport quality. The tram terminal station is examined as a service system. The terminal process of trams is modelled with the help of queuing theory. Proposals have been worked out to increase the service quality in this terminal station.

Keywords: public transport, queuing theory, tram terminal.

1. Einführung

Bei Schienenbahnen gibt es Kopfendstellen, bei denen das Wenden von Zügen ohne Rangieren am Bahnsteig erfolgt. Voraussetzung ist der Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen. In der ungarischen Hauptstadt Budapest werden bei der Straßenbahn Zweirichtungsfahrzeuge eingesetzt und sie arbeiten häufig mit dem beschriebenen Endstellen-Typ. Die Gestaltung dieses Endpunktes in Budapest wird in *Abb. 1* dargestellt.

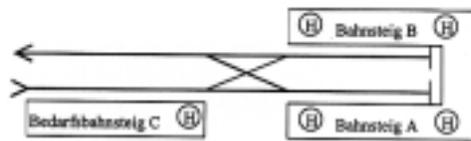


Abb. 1. Der Straßenbahn-Endpunkt

Auf dieser Art der Endpunkte erfolgt das Wenden am Bahnsteig, was die Kapazität des Endpunktes stark beeinflusst (siehe *Abb. 1*). Wenn keine Wendegleise frei sind, muß der ankommende Zug am Bedarfsbahnsteig halten. Die Fahrgäste müssen entweder aussteigen, oder auf die Einfahrt auf dem Wendegleis warten. In ersterem Fall wird der Abgangsweg vergrößert, in anderem Fall wird die Reisezeit vergrößert. Das ist ein eindeutiger Rückgang der Qualität des öffentlichen Verkehrs.

Der Betriebsablauf auf der Endstation wird als Bedienungsprozeß untersucht. Als Ausgangspunkt dienen die Ergebnisse einer Verkehrserhebung. Dadurch werden die Kenngrößen der Ankunfts- und Abfahrtsvorgänge der Straßenbahnen gewonnen. Die Ziele der Abhandlung sind es, die Leistungsfähigkeit und das Leistungsverhalten der Endstation festzustellen, sowie Lösungen zur Vermeidung eines Qualitätsrückgangs zu finden. Das soll durch Verwendung einer analytischen Lösung mit Hilfe der Bedienungstheorie verwirklicht werden.

Der untersuchte Straßenbahn-Endpunkt liegt in Budapest auf dem Etele Platz vor dem Bahnhof Budapest-Kelenföld. Dort enden zwei Straßenbahnlinien, die Linie 19 und 49.

2. Betrachtung des Straßenbahn-Endpunktes als Bedienungssystem

2.1. Allgemeine Grundlagen

2.1.1. Der Betriebsablauf als stochastischer Prozeß

Der Betriebsablauf im öffentlichen Verkehr ist ein stochastischer Prozeß. Der Zeitaufwand der Prozesse im öffentlichen Verkehr, der einfach meßbar ist, charakterisiert den Betriebsablauf gut. Die Zeitdauer der verschiedenen Prozesse hat Schwankungen, Abweichungen um einen Mittelwert. Daraus ergibt sich, daß sie eine Zufallsgröße ist. Sowohl die Bausteine der Umlaufzeiten, die Wendezeiten, die Haltestellenaufenthaltszeiten und die Fahrzeiten als auch die Zugfolgezeiten können durch eine Normalverteilung oder Erlangverteilung gut beschreiben werden (siehe beispielsweise: in [1] Abschnitt 6.1. und 6.7. und in [2]). Die stochastischen Prozesse können mit Verwendung der Wahrscheinlichkeitstheorie gut untersucht werden.

2.1.2. Begriff der Bedienungstheorie

Die Bedienungstheorie (oder Warteschlangentheorie) ist eines der Anwendungsgebiete der Wahrscheinlichkeitstheorie. Gegenstand der Bedienungstheorie ist die Untersuchung stochastischer Modelle für Bedienungssituationen – sog. Bedienungssysteme.

Klassische Beispiele sind die Bedienung an Schaltern oder in Geschäften, die Vermittlung der Ferngespräche, Reparatur ausgefallener Maschinen oder Geräte.

Beispiele im Verkehrswesen sind

- Fahrkartenverkauf an Schaltern oder an Automaten,
- Bedienung an Zapfsäulen der Tankstellen,
- Streckengleis der Eisenbahn als einkanaliges Wartesystem,
- Gleiskapazität in verschiedenen Gleisgruppen der Bahnhöfe,
- oder Größe der Umladehalle eines Güterbahnhofs.

Charakteristisch für Bedienungssysteme sind die zufälligen Zeitpunkte des Eintreffens von *Bedienungsforderungen* und die zufälligen *Bedienungszeiten*. Die weiteren Grundbegriffe der Bedienungsprobleme werden jetzt nicht erörtert, sondern im Abschnitt 2.2. durch konkrete Beispiele des untersuchten Straßenbahn-Endpunktes dargestellt.

2.1.3. Begründung der Verwendung der Theorie

Die Endstation ist in unserer Betrachtung ein Bedienungssystem. Die Straßenbahnen stellen an die Endstation als Bedienungssystem Forderungen, deren Erfüllung der Wendevorgang auf den Wendegleisen am Bahnsteig ist. Zu planmäßigen Abfahrtszeitpunkten verlassen die Züge die Endstation. Wenn alle Wendegleise besetzt sind, muß ein ankommender Zug am Bedarfsbahnsteig auf die Einfahrt auf ein freies Wendegleis warten. An dem Bedarfsbahnsteig kann eine Warteschlange auftreten, die mehrere Züge bilden, wenn sie nicht auf ein Wendegleis einfahren können.

2.1.4. Begriff Leistungsfähigkeit und Leistungsverhalten

Die Leistungsfähigkeit eines Bedienungssystems ist sein Vermögen, einen bestimmten Durchsatz bzw. eine bestimmte Leistung unter Einhaltung der vorgesehenen Technologie zu erreichen. Die Leistungsfähigkeit ist eine Zufallsgröße [4].

Die Kenngrößen der Leistungsfähigkeit (maximale Leistungsfähigkeit, momentane Leistungsfähigkeit) gehen von einer permanenten und konstanten Belastung des Bedienungssystems aus, mit anderen Worten, ein gesättigter Forderungsstrom tritt auf. Aber in der Praxis treten die Forderungen zufällig auf. Wenn nicht nur die Leistungsfähigkeit, sondern auch der Forderungsstrom als Zufallsgröße betrachtet wird, muß auch das resultierende Leistungsverhalten ein zufälliges sein.

Das Leistungsverhalten eines Bedienungssystems ist sein Vermögen, eine bestimmte Leistung, einen bestimmten Durchsatz oder einen bestimmten Gesamteffekt unter Berücksichtigung seiner Leistungsfähigkeit und der gestellten Anforderungen zu erreichen. Das Leistungsverhalten ist ein Zufallsprozeß [4].

2.2. Bestimmung der bedienungstheoretischen Begriffe im Vorgang des Wendens

Im Bedienungsprozeß am untersuchten Endpunkt gibt es zwei *Forderungsquellen*, nämlich die anderen Endpunkte der Linien 19 und 49. Zwei Betrachtungsweisen sind möglich: einerseits bilden die eingesetzten Züge beider Linien *einen Forderungenstrom*, andererseits entstehen *zwei Forderungenströme*, wenn die Linien 19 und 49 getrennt untersucht werden. In den Hauptverkehrszeiten (also auch in der untersuchten Zeitdauer) sind 6 Züge auf der Linie 19 und 11 Züge auf der Linie 49 eingesetzt. Das untersuchte Bedienungssystem hat zwei *Bedienungskanäle*, nämlich die zwei Wendegleise des Straßenbahn-Endpunktes. Das Gleis an dem Bedarfsbahnsteig entspricht dem *Warteraum in der Bedienungsanlage*, wo zwei Straßenbahnen gleichzeitig zum Aussteigen der Fahrgäste hintereinander halten können. Theoretisch können unendlich viele Züge hintereinander auf der freien Strecke halten.

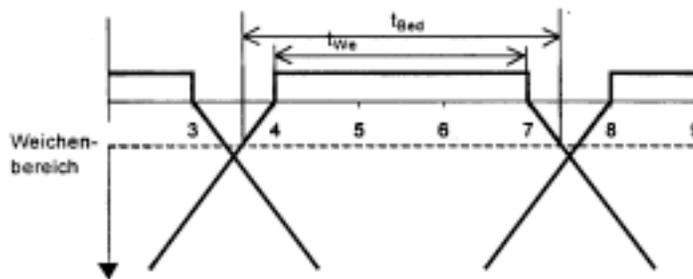


Abb. 2. Bildfahrplan mit Darstellung der Bedienungszeit und Wendezeit

Der *Bedienungsprozeß* eines Zuges am Endpunkt beginnt mit der Einfahrt des Zuges in den Weichenbereich vor den Wendegleisen, umfaßt das Wenden des Zuges und endet mit dem Zeitpunkt, in dem der Zug nach seiner planmäßigen Abfahrt den Weichenbereich verläßt. Dementsprechend ist die Bedienungszeit identisch mit der Belegungszeit der benutzten Fahrwege (Weichen und Gleise) und der Belegungszeit des benutzten Wendegleises.

Die Bedienungszeit wird in *Abb. 2* auf einen Teil des Bildfahrplans des Endpunktes gezeichnet. Aus dem Bildfahrplan läßt sich die Bedienungszeit direkt ablesen

$$t_{\text{Bed}} = t_{\text{Ein}} + t_{\text{We}} + t_{\text{Aus}} \quad (1)$$

- t_{Bed} Bedienungszeit des untersuchten Zuges an dem Straßenbahn-Endpunkt
- t_{Ein} Einfahrtzeit des untersuchten Zuges
- t_{Aus} Ausfahrtzeit des untersuchten Zuges
- t_{We} Wendezeit des untersuchten Zuges.

2.3. Betriebsablauf am Endpunkt

Die Züge der auf dem Etele Platz endenden Straßenbahnlinie 19 und 49 verkehren den ganzen Tag koordiniert. Die Züge der Linie 19 verkehren in den Hauptverkehrszeiten im 10 Minuten Takt und die Zugfolgezeiten der Linie 49 sind abwechselnd 4 und 6 Minuten gemäß dem offiziellen Fahrplan des Verkehrsbetriebs [3] (siehe *Tabelle 1*). Die Überlagerung der Zugfolgezeiten der Straßenbahnlinien wird in *Abb. 3* dargestellt.

Tabelle 1. Ankunftsfolgezeiten ($t_{Z,An}$), Wendezeiten (t_{We}) und Abfahrtsfolgezeiten ($t_{Z,Ab}$) der auf dem Etele Platz endenden Straßenbahnlinien

Linie	$t_{Z,An}$		t_{We}		$t_{Z,Ab}$	
	min	s	min	s	min	s
19	10	600	9	540	10	600
49 –1 ¹	6	360	3	180	4	240
49 –2 ²	4	240	5	300	6	360
49 –1, 2 ³	5	300	4	240	5	300
19,49 ⁴	3,33	200	5,67	340	3,33	200

Bemerkungen zur *Tabelle 1*:

- ¹ jeder ungerade Zug der Linie 49
- ² jeder gerade Zug der Linie 49
- ³ mittlere Zugfolgezeiten und Wendezeit der Züge der Linie 49
- ⁴ mittlere Zugfolgezeiten und Wendezeit der Züge der Linien 19 und 49.

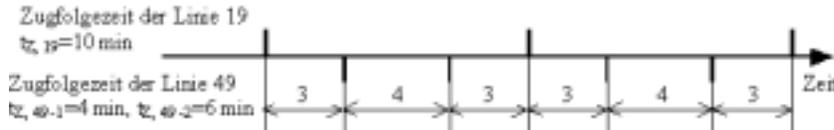


Abb. 3. Überlagerung der Zugfolgezeiten der Linien 19 und 49

Abb. 4 zeigt die Verteilungen der Zugfolgezeiten der Linien getrennt und gemeinsam untersucht. Die aus dem Fahrplan ermittelten Dichtefunktionen der Zugfolgezeiten und der Wendezeiten (*Abb. 5*) sind zum Vergleich zwischen ihnen und den tatsächlichen Werten wichtig.

In *Abb. 6* wird der Bildfahrplan dargestellt. Aus dem Bildfahrplan wird es sofort deutlich, daß eines der Wendegleise der Linie 19, das andere der Linie 49

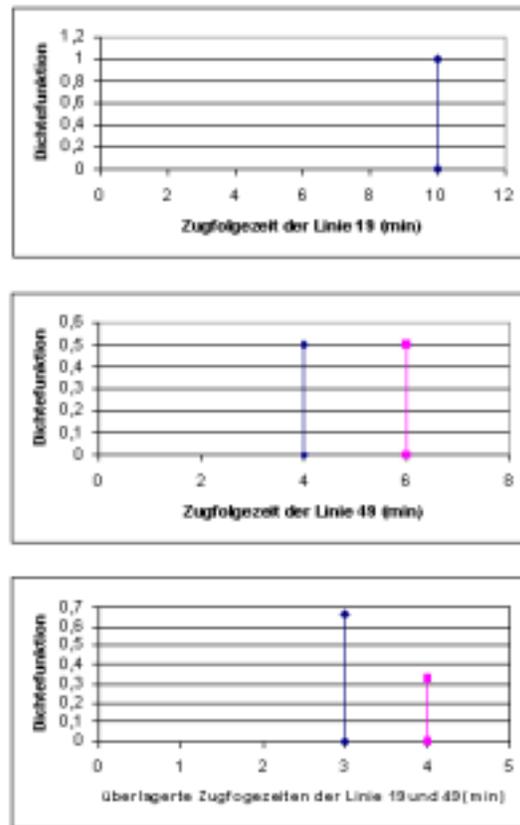


Abb. 4. Verteilungen der Zugfolgezeiten der Linien 19 und 49

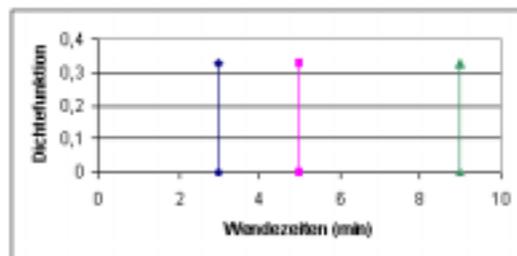


Abb. 5. Verteilungen der Wendezeiten der Linien 19 und 49

zur Verfügung steht. Die planmäßige Wendezeit der Linie 19 beträgt 9 Minuten, die der Linie 49 abwechselnd 3 und 5 Minuten.

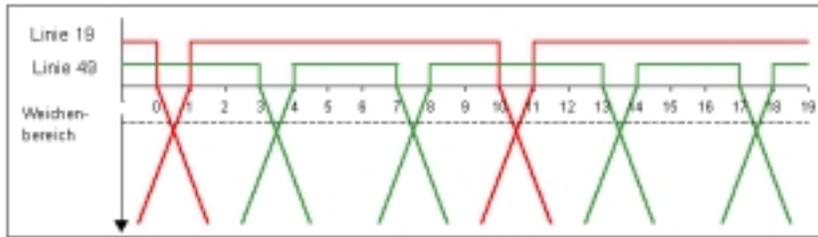


Abb. 6. Bildfahrplan der Linien 19 und 49 im Bereich des untersuchten Straßenbahn-Endpunktes

Die Bedienungszeit eines Zuges umfaßt die Wendezeit zuzüglich der Ein- und Ausfahrtzeit (siehe Gleichung (1), Abschnitt 2.2.). Die Summe der Ein- und Ausfahrtzeit pro Zug beträgt knapp 1 Minute anhand der im Abschnitt 2.5. dargestellten Messung. Auch aus dem Bildfahrplan ist es abzuleiten, daß die Zeitdauer zwischen der Abfahrt eines Zuges und der Ankunft des nächsten Zuges auf gleichem Wendegleis dem maximalen Zeitbedarf für den Ein- und Ausfahrtvorgang entspricht. So ist aus dem Bildfahrplan die Bedienungszeit der Linien 19 und 49 abzuleiten. Das ist die laut Fahrplan vorgesehene Bedienungszeit, aber nicht der konkrete Wert.

2.4. Leistungsfähigkeit des Endpunktes

Die mögliche Durchlaßfähigkeit (maximale Leistungsfähigkeit) C_M eines Endpunktes ergibt sich als

$$C_M = \frac{60 \cdot n}{t_{\text{Bed, min}}} \quad (2)$$

- C_M mögliche Durchlaßfähigkeit der Endstation [h^{-1}]
- n Anzahl der Wendegleise
- $t_{\text{Bed, min}}$ minimale Bedienungszeit der Endstation pro Zug [min].

Die Summe der minimalen Wendezeit und der Ein- und Ausfahrtzeit ergibt die kürzeste Bedienungszeit der Endstation (Gleichung (3)).

$$t_{\text{Bed, min}} = t_{\text{Ein}} + t_{\text{Aus}} + t_{\text{We, min}} \quad (3)$$

Die kürzeste Wendezeit ist unter günstigsten Bedingungen (modifiziert entnommen aus [1], Gleichung (7.39))

$$t_{\text{We, min}} = 0,9 \cdot l_Z + 80 \quad (4)$$

$t_{\text{We},\min}$ minimale Wendezeit [s]
 l_Z Länge des Zuges [m].

In Gleichung (4) stellt der Summand $0,9 \cdot l_Z$ den Zeitbedarf für das Zurücklegen des Weges vom bisherigen bis zum neuen Fahrerstand dar. 80 s sind zum Verlassen und Absichern des alten sowie zum Betreten und Inbetriebsetzen des neuen Fahrerstandes nötig.

Die eingesetzten Straßenbahnzüge der Linie 19 sind aus zwei Triebwagen Typ UV an der Spitze gekuppelt. Die Länge des Zuges ist $13690 + 13690$ mm (entnommen aus [6]). In diesem Fall ist

$$t_{\text{We},19,\min} = 0,9 \cdot 23,38 + 80 = 105 \text{ [s]} \approx 2 \text{ [min]}. \quad (5)$$

Die eingesetzten Straßenbahnzüge der Linie 49 bestehen aus zwei Triebwagen Typ UV und einem Beiwagen Typ UV zwischen den beiden Triebwagen. Die Länge des Zuges ist $13690 + 10660 + 13690$ mm (entnommen aus [6]). In diesem Fall ist

$$t_{\text{We},49,\min} = 0,9 \cdot 38,04 + 80 = 114 \text{ [s]} \approx 2 \text{ [min]}. \quad (6)$$

Gerundet auf Minuten beträgt die kürzeste Wendezeit $t_{\text{We},\min}$ nach Gleichung (5) und (6) und auch infolge des Fahrplans [3] 2 Minuten. Die Summe der Ein- und Ausfahrtzeit ($t_{\text{Ein}} + t_{\text{Aus}}$) pro Zug beträgt knapp 1 Minute (siehe Ergebnisse der Messung im Abschnitt 2.4). In diesem Fall wäre die kürzeste Bedienungszeit

$$t_{\text{Bed},\min} = 1 + 2 = 3 \text{ [min]}. \quad (7)$$

Die mögliche Durchlaßfähigkeit C_M des untersuchten 2-gleisigen Straßenbahn-Endpunktes ist

$$C_M = \frac{60 \cdot 2}{3} = 40 \text{ [h}^{-1}\text{]} \quad (8)$$

natürlich bei einer sehr schlechten Qualität des Betriebsablaufes.

Die vorhandene Belegung M_{vorh} einer Endstation ergibt sich als

$$M_{\text{vorh}} = \sum_{i=1}^n \frac{60}{t_{Zi}} \quad (9)$$

M_{vorh} vorhandene Belegung der Endstation [h^{-1}]
 n Anzahl der Linien
 t_{Zi} Zugfolgezeit der i -ten Linie [min].

In diesem Fall ist

$$M_{\text{vorh}} = \frac{60}{10} + \frac{60}{5} = 18 \text{ [h}^{-1}\text{]}. \quad (10)$$

Anhand der durchgeführten Berechnung ist es festzustellen, daß die vorhandene Belegung M_{vorh} des Straßenbahn-Endpunktes weit unter der möglichen Durchlaßfähigkeit C_M liegt.

2.5. Ermittlung der Kenngrößen des stochastischen Vorganges

Das Ziel der Verkehrserhebung war die Ermittlung der Kenngrößen des tatsächlichen Vorganges. Aus dem Fahrplan [3] (siehe Abb. 6) sind die mittleren Folgezeiten und Wendezeiten der Züge sofort zu bestimmen. Aber die Kenngrößen der Schwankungen und die tatsächlichen Bedienungszeiten sind nur mit Messung zu ermitteln. Die Verkehrszählung wurde am Donnerstag, 13. Mai 1999, von 13.30 Uhr bis 15.30 Uhr durchgeführt.

Die gemessenen Zeitpunkte waren immer Ankunfts- und Abfahrtereignisse im Bereich des Endpunktes. Diese sind ausführlich:

- $t_{An,B}$ Ankunftszeitpunkt eines Zuges am Bedarfsbahnsteig (nur wenn der Zug tatsächlich hält, weil beide Gleise besetzt sind)
- $t_{Ab,B}$ Abfahrtszeitpunkt eines Zuges am Bedarfsbahnsteig (wenn der Zug früher dort hielt)
- $t_{An,W}$ Ankunftszeitpunkt eines Zuges auf einem Wendegleis
- $t_{Ab,W}$ Abfahrtszeitpunkt eines Zuges auf einem Wendegleis.

Auch die Liniennummer und das benutzte Wendegleis des einzelnen Zuges wurden als weitere wichtige Informationen festgesetzt.

Eine zweite Messung wurde am Montag, 29. Mai 1999, von 12.50 Uhr bis 14.50 Uhr durchgeführt, bei der die Ausfahrtzeiten der Züge von den Wendegleisen festgestellt wurden. Aus den gemessenen Zeitpunkten der ersten Messung sind die Ausfahrtzeiten nicht abzuleiten, da die Zeitpunkte nicht festgestellt wurden, wann die Züge den Weichenbereich des Endpunktes verlassen haben. In der Messung wurden die folgenden Zeitpunkte bestimmt:

- $t_{Ab,W}$ Abfahrtszeitpunkt des Zuges auf einem Wendegleis
- $t_{An,Wb}$ Zeitpunkt, wann der Zug den Weichenbereich des Endpunktes verläßt.

Natürlich wurden auch die Liniennummer und das benutzte Wendegleis des einzelnen Zuges festgestellt.

Im weiteren werden, meistens in Tabellen, die folgenden Formelzeichen benutzt.

- x untersuchte Zufallsgröße
- x_{Fp} Wert der untersuchten Zufallsgröße nach Fahrplan [3]
- Ex Erwartungswert (Mittelwert) der Zufallsgröße x
- Dx Streuung der Zufallsgröße x
- Vx Variationskoeffizient der Zufallsgröße x
- x_{\min} Minimum der Zufallsgröße x
- x_{\max} Maximum der Zufallsgröße x
- N Anzahl der beobachteten Werte.

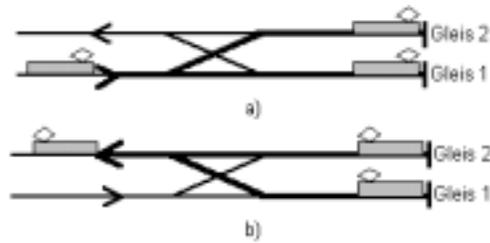


Abb. 7. Ein- und Ausfahrwege zu und von dem Endpunkta) Einfahrweg, b) Ausfahrweg

2.5.1. Ein- und Ausfahrzeiten der Züge

Die Länge des Ein- und Ausfahrweges ist von der Länge des Zuges unabhängig, sie hängt nur von dem benutzten Wendegleis ab. Der Fahrweg ist beim Befahren der Gleisverbindung um einen kleinen Betrag länger. Bei der Einfahrt fährt die Spitze der Züge beider Linien von dem Einfahrtsignal bis zum Kopf des Wendegleises auf gleich langem Weg. Bei der Ausfahrt fährt das Ende der Züge beider Linien von dem Kopf des Wendegleises bis zum Verlassen der letzten Weiche des Weichenbereiches auf gleich langem Weg (Abb. 7).

Tabelle 2. Einfahrzeiten t_{Ein} und deren Streuungsmaße

Gleis	Et_{Ein} [s]	Dt_{Ein} [s]	Vt_{Ein}	$t_{\text{Ein,min}}$ [s]	$t_{\text{Ein,max}}$ [s]	N
1	32,75	4,18	0,13	27	40	12
2	32,00	2,65	0,08	27	36	13
Beide	32,36	3,41	0,11	27	40	25

Tabelle 3. Ausfahrzeiten t_{Aus} und deren Streuungsmaße

Gleis	Et_{Aus} [s]	Dt_{Aus} [s]	Vt_{Aus}	$t_{\text{Aus,min}}$ [s]	$t_{\text{Aus,max}}$ [s]	N
1	25,87	2,10	0,08	21	29	15
2	22,95	2,99	0,13	17	27	19
Beide	24,24	2,99	0,12	17	29	34

Die charakteristischen Größen der gemessenen Ein- und Ausfahrzeiten zeigen die Tabellen 2 und 3. Die Ergebnisse unterstützen die Summe der aus dem Fahrplan ermittelten Ein- und Ausfahrzeiten (siehe Abschnitt 2.3). Die Summe der mittleren Ein- und Ausfahrzeiten ist $57 \text{ sec} \approx 1 \text{ min}$.

Leider wird es auf die Differenz der Werte bei den Einfahrten auf Gleis 1 und 2 nicht eingegangen. Es ist auffällig, daß die mittlere Einfahrzeit auf das Wendegleis 1 entsprechend der Messung etwas größer ist als die mittlere Einfahrzeit auf das Wendegleis 2. Aber der Einfahrweg ist auf das Wendegleis 1 etwas kürzer als auf das Wendegleis 2. Das bedeutet, daß die Wirkung der Wegdifferenz geringer ist als die Wirkung anderer zufälliger Ereignisse (Fahrtechnik der Fahrzeugfahrer und andere schwer auffindbare Einflüsse).

2.5.2. Ankunftsfolgezeiten der Züge

Tabelle 4. Ankunftsfolgezeiten $t_{Z,An}$, und deren Streuungsmaße

Linie	$t_{Z,An, Fp}$ [s]	$Et_{Z,An}$ [s]	$Dt_{Z,An}$ [s]	$Vt_{Z,An}$	$t_{Z,An, min}$ [s]	$t_{Z,An, max}$ [s]	N
19	600	594,40	122,75	0,21	391	770	10
49 –1	360	349,55	160,00	0,46	51	717	11
49 –2	240	258,75	139,76	0,54	62	499	12
49 –1, 2	300	302,17	156,50	0,52	51	717	23
19, 49	200	204,41	132,81	0,65	13	576	34
19, 49 2x	400	408,82	150,32	0,37	129	717	34

Bemerkungen zur *Tabelle 4*:

19,49 2x 2-fache Zugfolgezeit der Linien 19 und 49.

Die Ankunftsfolgezeit $t_{Z,An}$ ist die Differenz der Ankunftszeit der zwei hintereinander kommenden Züge am Bedarfsbahnsteig. Wenn der ankommende Zug ohne Behinderung auf das Wendegleis einfahren kann, wurde keine Ankunftszeit am Bedarfsbahnsteig festgesetzt. In diesem Fall wird das Minimum der gemessenen Einfahrzeiten (27 s) von der Ankunftszeit auf dem Wendegleis abgezogen. Die *Tabelle 4* zeigt die charakteristischen Größen der Ankunftsfolgezeiten der Linien.

Abb. 8 zeigt die beobachteten Ankunftsfolgezeiten und die theoretischen Verteilungen. Die Überprüfung der Anpassung der beobachteten Zufallsgrößen zur Erlang- und Normal-Verteilungen wurde durchgeführt. Leider sind die Anpassungstests negativ. Die Ursachen können in der nicht genügend großen Stichprobe oder in den extrem großen Schwankungen im Betriebsablauf liegen. Die zweite Theorie wird durch die im Abschnitt 2.3 erörterten Verteilungen unterstützt (Verteilungen der Zugfolgezeiten nach dem Fahrplan, siehe *Abb. 4*). Die Anpassungstest bei der Verteilung der 2-fachen Zugfolgezeiten ist positiv, also die beobachteten Werte stimmen mit den theoretischen Verteilungen gut überein.

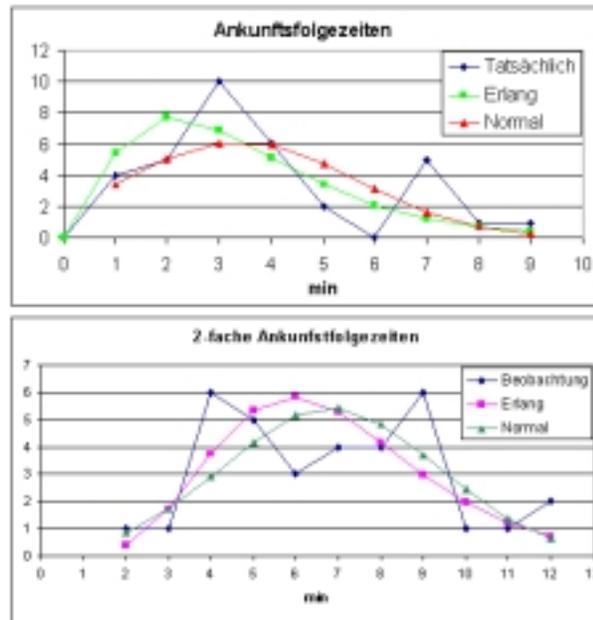


Abb. 8. Verteilungen der Ankunftszeiten

2.5.3. Wartezeiten und Warteschlange der Züge am Bedarfsbahnsteig

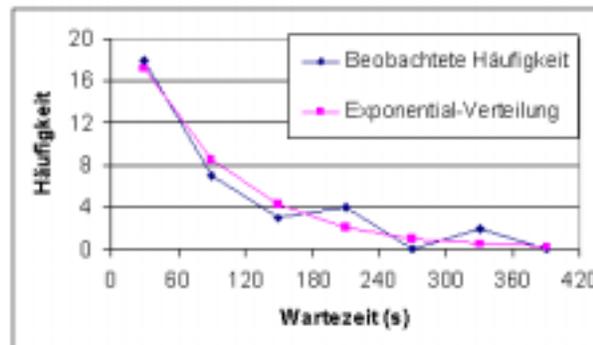


Abb. 9. Verteilung der Wartezeiten am Bedarfsbahnsteig

Aus der Ankunftszeit $t_{An,B}$ und Abfahrtszeit $t_{Ab,B}$ der Züge am Bedarfsbahnsteig sind die Wartezeiten sofort abzuleiten. Der Mittelwert der Wartezeiten beträgt 85,38 s. Die Wartezeiten stimmen hinreichend mit der Exponential-Verteilung über-

ein, weil der Variationskoeffizient Vt_{Warte} der Wartezeiten 1,09 nahezu gleich 1,0 ist, und auch der χ^2 -Anpassungstest ist gelungen, wie es in *Abb. 9* gezeigt wird.

Die Wartewahrscheinlichkeit der Züge ist 74%, das heißt das 74% aller ankommenden Züge mußten am Bedarfsbahnsteig anhalten. Knapp 12% aller ankommenden Züge mußten am Bedarfsbahnsteig als zweiter wartender Zug auf Einfahrt auf das Wendegleis warten. Die mittlere Warteschlange EL_w ist 0,85 Zug. Das bedeutet, wenn eine Warteschlange vor dem Endpunkt existierte, bildete im Mittel 0,85 Zug die Warteschlange.

2.5.4. Abfahrtsfolgezeiten der Züge

Die Abfahrtsfolgezeit $t_{Z,Ab}$ ist die Differenz der Abfahrtszeit zweier hintereinander abfahrenden Züge am Endpunkt. Die Abfahrtsfolgezeiten werden zur bedienungstheoretischen Bewertung des Betriebsablaufs nicht gebraucht (siehe *Tabelle 5*). Aber der Vergleich der Abfahrtsfolgezeiten mit den Ankunftsfolgezeiten zeigt die Rolle und die Wichtigkeit des Endpunktes im Betriebsablauf.

Tabelle 5. Abfahrtsfolgezeiten $t_{Z,Ab}$ und deren Streuungsmaße

Linie	$t_{Z,Ab,FP}$ [s]	$Et_{Z,Ab}$ [s]	$Dt_{Z,Ab}$ [s]	$Vt_{Z,Ab}$	$t_{Z,Ab,min}$ [s]	$t_{Z,Ab,max}$ [s]	N
19	600	601,75	27,89	0,05	553	647	12
49 –1	240	244,18	21,47	0,09	209	294	12
49 –2	360	351,73	21,49	0,06	311	389	12
49 –1, 2	300	300,21	58,91	0,20	209	389	24
19, 49	200	200,67	38,59	0,19	127	294	37

Die Streuung der Folgezeiten bei der Abfahrt ist deutlich kleiner als bei Ankunft, also der Endpunkt verkleinert die Schwankungen der Zugfolgezeiten nach jedem Wenden.

2.5.5. Wendezeiten der Züge am Endpunkt

Die Wendezeit $t_{Z,Ab}$ eines Zuges ist die Differenz seiner Ankunftszeit und Abfahrtszeit am Endpunkt.

Mit Verwendung der Gleichung (1) ist die Bedienungszeit aus den Wendezeiten und Ein- und Ausfahrtszeiten sofort abzuleiten. Es wird aber im nächsten Absatz gezeigt, daß die so berechnete Bedienungszeit eine wichtige Zeitdauer, die sog. Pufferzeit nicht umfaßt (siehe *Tabelle 6*).

Tabelle 6. Wendezeiten und deren Streuungsmaße

Linie	$t_{We,FP}$ [s]	Et_{We} [s]	Dt_{We} [s]	Vt_{We}	$t_{We,min}$ [s]	$t_{We,max}$ [s]	N
19	540	486,64	75,93	0,16	342	572	12
49 -1	180	216,75	70,68	0,33	151	364	12
49 -2	300	287,64	22,92	0,08	246	329	11
49 -1, 2	240	250,65	64,12	0,26	151	364	23
19, 49	340	331,51	131,19	0,40	151	572	35

2.5.6. Bedienungszeiten der Züge am Endpunkt

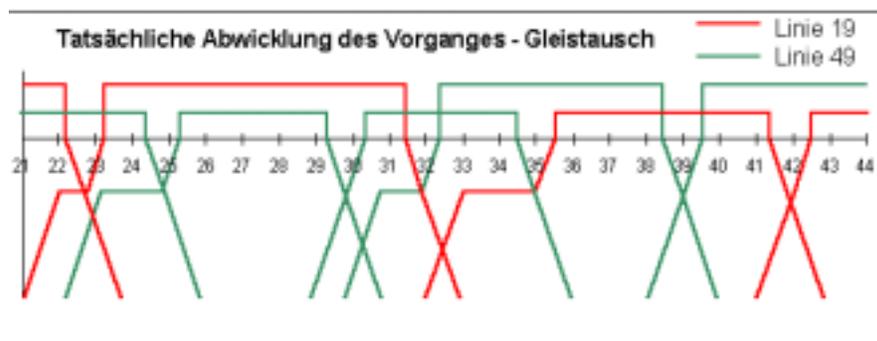


Abb. 10. Der tatsächliche Betriebsablauf an dem Straßenbahn-Endpunkt

Abb. 10 zeigt einen Teil des tatsächlichen Betriebsablaufes an dem Straßenbahn-Endpunkt. (Ein Zug der Linie 49 ist früher angekommen als der Zug der Linie 19, deshalb wurde das benutzte Wendegleis ausgetauscht.) Daraus ist es zu erkennen, daß die einzelnen Wendegleise in der Wirklichkeit nicht nur zur Verfügung der Züge einer bestimmten Linie stehen (im Gegensatz zur Festlegung im Abschnitt 2.3.).

Mit Verwendung der Gleichung (1) ist die Bedienungszeit aus den Wendezeiten und Ein- und Ausfahrtzeiten sofort abzuleiten. Aber diese berechnete Bedienungszeit umfaßt die Fahrstraßenbildungszeit und die Reaktionszeit der Fahrzeugfahrer der einfahrenden Züge nicht. Diese Pufferzeit entsteht dann, wenn zwei Straßenbahnzüge sofort hintereinander aus- und einfahren. Der ausfahrende Zug verläßt den Weichenbereich, aber der einfahrende Zug kann nicht gleichzeitig einfahren.

Die Berechnung der Bedienungszeit, die auch die sog. Pufferzeit umfaßt, ist mit Bildung von sog. Ketten durchzuführen. Die Ketten entstehen aus sofort hin-

tereinander aus- und einfahrenden Straßenbahnzügen am Endpunkt. Diese Ketten zerreißen, wenn kein Zug am Bedarfsbahnsteig auf Einfahrt wartet. Wenn kein Bruch wäre (das bedeutet, daß immer ein Zug auf Einfahrt wartet), dann gäbe es zwei lange Ketten entsprechend der zwei Wendegleise. Die Straßenbahnketten werden (wenn möglich) in drei Elemente gespalten, damit die Bedienungszeiten mit den folgenden Gleichungen berechnet werden können. Die Bedienungszeit des i -ten Zuges ist

$$t_{\text{Bed},i,a} = t_{\text{Ab},i,W} - t_{\text{Ab},i-1,W}, \quad (11)$$

$$t_{\text{Bed},i,b} = t_{\text{Ab},i+1,B} - t_{\text{Ab},i,B}, \quad (12)$$

$$t_{\text{Bed},i} = \frac{t_{\text{Bed},i,a} + t_{\text{Bed},i,b}}{2}. \quad (13)$$

$t_{\text{Ab},n,B}$ Abfahrtszeitpunkt des n -ten Zuges am Bedarfsbahnsteig (wenn der Zug früher dort hielt)

$t_{\text{Ab},n,W}$ Abfahrtszeitpunkt des n -ten Zuges auf einem Wendegleis

$t_{\text{Bed},n}$ Bedienungszeit des n -ten Zuges am Endpunkt.

In diesem Fall bilden die Züge $(i - 1)$, i und $(i + 1)$ eine Straßenbahnkette.

Tabelle 7. Bedienungszeiten und deren Streuungsmaße

Linie	$t_{\text{Bed},Fp}$ [s]	Et_{Bed} [s]	Dt_{Bed} [s]	Vt_{Bed}	$t_{\text{Bed},\text{min}}$ [s]	$t_{\text{Bed},\text{max}}$ [s]	N
19	600	579	51,77	0,09	461	646,5	9
49 - 1, 2	300	299,81	64,73	0,22	209	426	20
19, 49	400	386,42	134,90	0,35	209	646,5	33

Die Ergebnisse der aus den Straßenbahnketten berechneten Bedienungszeiten zeigt die *Tabelle 7*.

2.6. Bewertung des Betriebsablaufs

2.6.1. Verkehrswert und Auslastungsgrad des Bedienungssystems

Die ersten Angaben über alle Bedienungssysteme sind die Größe des Verkehrswertes und der Auslastungsgrad.

Das Verhältnis der Erwartungswerte der Bedienungszeiten t_{Bed} und Ankunftszeiten $t_{Z,\text{An}}$ heißt Verkehrswert ρ .

$$\rho = \frac{Et_{\text{Bed}}}{Et_{Z,\text{An}}}. \quad (14)$$

Im untersuchten Fall ist der Verkehrswert

$$\rho = \frac{386,42}{204,41} = 1,89. \quad (15)$$

Der Verkehrswert ρ stellt die mittlere Anzahl der arbeitender Kanäle dar. Es ergibt sich, daß mindestens zwei Bedienungskanäle, d. h. Wendegleise notwendig sind.

Der Auslastungsgrad jedes identischen Kanals ist

$$\eta_b = \frac{\rho}{s}. \quad (16)$$

Der Endpunkt hat zwei Wendegleise, die Anzahl der Bedienungskanäle ist daher $s = 2$. Der Auslastungsgrad ist

$$\eta_b = \frac{1,89}{2} = 0,945, \quad (17)$$

Die Größe des Auslastungsgrades η_b zeigt eine schlechte Qualität des Betriebsablaufes am Endpunkt. Obwohl der Auslastungsgrad kleiner als 1 ist, existieren Warteschlangen vor dem Endpunkt. Wenn die Ankunftszeiten und Bedienungszeiten deterministisch wären, würden keine Warteschlangen entstehen.

2.6.2. Leistungsverhalten des Bedienungssystems

Entsprechend der Kendall-Symbolik (allgemeine Gestalt A/B/s/m) wird der Endpunkt als Gi/Gi/2/ ∞ Bedienungssystem bezeichnet. Das bedeutet: Sowohl die Verteilung des Forderungsstroms als auch die Verteilung der Bedienungszeiten sind sog. general independent (unabhängig verteilt), 2 Bedienungskanäle existieren und der Warteraum ist unendlich groß.

Die klassischen bedienungstheoretischen Modelle geben grundsätzlich analytische Lösungen zu den Bedienungssystemen mit exponentialverteilten Ankunfts- und Bedienungszeiten. Das ist eine starke Restriktion im praktischen Umgang mit Bedienungssystemen.

Die Verallgemeinerung klassischer Lösungen spezieller Fälle nichtexponentialverteilter Ankunfts- und Bedienungszeiten ($Vt_{z,An} \neq 1$; $Vt_{Bed} \neq 1$) auf ein generelles Modell setzen tiefgehende und aufwendige Simulationsexperimente sowie Empfindlichkeitsuntersuchungen voraus. Die Lösungen sind oftmals Näherungsausdrücke (siehe [4]).

In [4] werden die folgenden Formeln ohne Ableitung zur Lösung der Gi/Gi/s/ ∞ -Systeme mitgeteilt. Zustandswahrscheinlichkeiten P_i (man bezeichnet den Zustand i des Systems mit der Zahl i der im System verweilenden Forderungen,

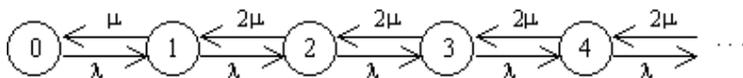


Abb. 11. Zustandsgraph des Bedienungssystems $s = 2, n = \infty$

siehe Abb. 11):

$$P_i \approx \begin{cases} \left[\sum_{i=0}^s \frac{\rho_i}{i!} + \frac{\rho^s \cdot \gamma \cdot \Phi}{s!(1-\Phi)} \right]^{-1} & \text{für } i = 0 \\ P_0 \frac{\rho^i}{i!} & \text{für } i = 1, 2, \dots, s \\ P_s \cdot \gamma \cdot \Phi^{i-s} & \text{für } i = s + 1, s + 2, \dots \end{cases} \quad (18)$$

mit

$$\Phi = \left(\frac{\rho}{s} \right)^\gamma < 1 \quad (19)$$

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{2} \cdot (C \cdot V^2 t_{\text{Bed}} + V^2 t_{Z, \text{An}}) \quad (20)$$

und

$$C = \begin{cases} 1 & \text{für } V^2 t_{Z, \text{An}} \geq 1 \\ \left(\frac{\rho}{s} \right)^{1-V^2 t_{Z, \text{An}}} (1 + V^2 t_{Z, \text{An}}) - V^2 t_{Z, \text{An}} & \text{für } V^2 t_{Z, \text{An}} \leq 1. \end{cases} \quad (21)$$

Die Ermittlung von Kenngrößen des Bedienungssystems aus den Zustandswahrscheinlichkeiten ergibt die folgenden Gleichungen.

Länge der Warteschlange L_w

$$EL_w \approx P_0 \frac{\rho \cdot \gamma \cdot \Phi}{s!(1-\Phi)^2} \quad (22)$$

Wartezeit t_{Warte}

$$Et_{\text{Warte}} = Et_{Z, \text{An}} \cdot EL_w \quad (23)$$

Verweilzeit t_{Verw}

$$Et_{\text{Verw}} = Et_{\text{Warte}} + Et_{\text{Bed}} \quad (24)$$

Wartewahrscheinlichkeit P_w

$$P_w = P_0 \frac{\rho^{s-1}}{(s-1)!} \frac{\gamma \cdot \Phi}{1-\Phi} \quad \text{für } V t_{Z, \text{An}} \neq 1; V t_{Z, \text{An}} > 0. \quad (25)$$

Tabelle 8. Vergleich der berechneten und beobachteten Werte der Kenngrößen des Bedienungssystems

Kenngröße	Berechneter Wert	Beobachteter Wert	Rel. Fehler
L_w	4,55 (4, 09 ... 5, 00)	0,85	4,35 (3, 81 ... 4, 88)
Et_{Warte}	929,84 s	85,38 s	9,89
Et_{Verw}	1316,26 s	471,8 s	1,79
P_w	90,88%	73,53%	0,24

Die Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten P_i und die Kenngrößen des Bedienungssystems wird nicht detailliert. Der Vergleich der berechneten und beobachteten Werte wird in der *Tabelle 8* gezeigt.

Die berechneten Werte stimmen mit den beobachteten Werten nicht überein. Alle berechneten Kenngrößen des Bedienungssystems sind schlechter als die Kenngrößen des beobachteten Vorganges. Die Ergebnisse des Modells beweisen größere Hindernisse im Betriebsablauf am Straßenbahn-Endpunkt. Die Kenngrößen des tatsächlichen Vorganges deuten mit ihren günstigeren Werten auf eine kleinere Zufälligkeit des Betriebsablaufes am Endpunkt als beim mit dem Modell abgebildeten Vorgang hin. Weitere Untersuchungen können mit Simulationsverfahren durchgeführt werden.

Eine wesentliche Ursache der Differenz besteht darin, daß die vom Fahrplan bestimmte Wendezeit in der Bedienungszeit inbegriffen ist. Bei verspätetem Eintreffen wird diese verkürzt. Das heißt, daß die Zugfolgezeit bei der Ankunft und die Bedienungszeit nicht unabhängig voneinander sind. Die Verkürzung der Bedienungszeit gerade im Fall von Unregelmäßigkeiten wirkt sich sehr positiv aus, was natürlich im Modell, das von der Unabhängigkeit von Ankunftszeiten und Bedienungszeiten ausgeht, nicht erfaßt werden kann.

3. Vorschläge zur Verbesserung der Qualität des Vorganges des Wendens

In diesem Abschnitt werden Lösungen zur Vermeidung des Qualitätsrückgangs am Straßenbahn-Endpunkt gesucht. Diese Lösungen sind durch die beobachteten Daten ohne Verwendung des erörterten Bedienungsmodells zu unterstützen.

3.1. Bau eines dritten Wendegleises

Der erste Vorschlag ist Bau eines neuen Wendegleises (*Abb. 12*). So hat der Straßenbahn-Endpunkt als Bedienungssystem drei Bedienungskanäle statt der bisherigen zwei Bedienungskanäle. Mit Verwendung der Gleichung (16) senkt sich

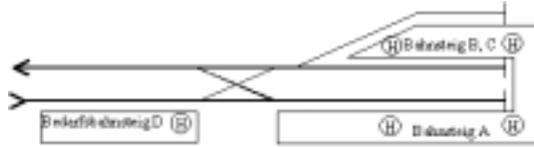


Abb. 12. Vorschlag zum Umbau des Straßenbahn-Endpunktes

der Auslastungsgrad der Wendegleise von 0,945 auf

$$\eta_b = \frac{1,89}{3} = 0,63. \tag{26}$$

Dieser Wert zeigt die Verbesserung der Qualität des Betriebsablaufes am Endpunkt an. Mit Hilfe der Gleichung (1) wird gezeigt, daß sich die mögliche Durchlaßfähigkeit (maximale Leistungsfähigkeit) C_M des umgebauten Endpunktes auf

$$C_M = \frac{60 \cdot 3}{3} = 60 \text{ [h}^{-1}\text{]} \tag{27}$$

vergrößert.

Tabelle 9. Wartewahrscheinlichkeit am vorhandenen und vorgeschlagenen Straßenbahn-Endpunkt

Länge der Warteschlange L_w	Wartewahrscheinlichkeit P_w
0	26,47%
1	61,76%
2	11,76%
Summe	100%
a) vorhandener 2-gleisiger Straßenbahn-Endpunkt	
Länge der Warteschlange L_w	Wartewahrscheinlichkeit P_w
0	88,24%
1	11,76%
Summe	100%
b) Vorgeschlagener 3-gleisiger Straßenbahn-Endpunkt	

Der Unterschied in der Wartewahrscheinlichkeit zwischen der vorhandenen 2-gleisigen und der vorgeschlagenen 3-gleisigen Endstation wird in Tabelle 9 dargestellt. Die Werte in Tabelle 9 b) kommen wie folgt zustande: aus $L_w = 0$ und

$L_w = 1$ in a) wird $L_w = 0$ in b), aus $L_w = 2$ in a) $L_w = 1$ in b). Auch diese Angaben zeigen die eindeutige Verbesserung des Betriebsablaufes.

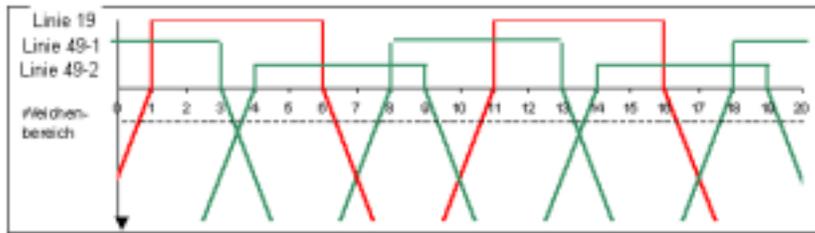


Abb. 13. Lage der geplanten 3-gleisigen Endstation

Zur Zeit liegt die Endstation neben dem Etele Platz auf einer einmündenden Straße neben der Fahrbahn. Der Querschnitt dieser Straße ist nicht genügend breit, um ein drittes Wendegleis einzubauen. Auf dem Etele Platz vor dem Empfangsgebäude des Bahnhofs Budapest-Kelenföld ist genügend freies Gelände vorhanden. Die Weiterführung der Straßenbahnstrecke und der Bau eines neuen Endpunktes wird vorgeschlagen (Abb. 13).

3.2. Veränderung des Fahrplans

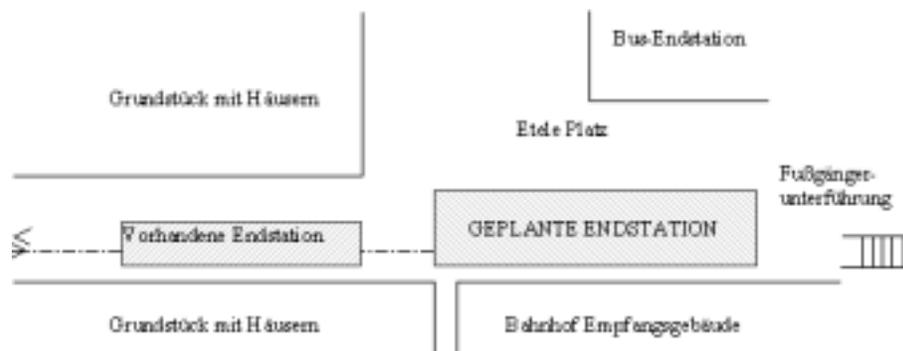


Abb. 14. Bildfahrplan mit veränderten Abfahrtszeiten (Vorschlag 1)

Im Fahrplan werden alle Abfahrtszeiten gegenüber dem derzeitigen Zustand um 4 Minuten früher gelegt. Diese Maßnahme kann nur am 3-gleisigen Endpunkt verwirklicht werden. Die Züge der Linie 49 benötigen zwei Wendegleise. Abb. 14 zeigt den veränderten Bildfahrplan.

Tabelle 10. Veränderung der Wendezeiten

Linie	Vorhanden	Vorschlag 1	Vorschlag 2
	T_{we} [min]	t_{we} [min]	t_{we} [min]
19	9	5	4
49-1	3	5	4
49-2	5	5	4
Summe	17	15	12

Der Vorteil dieser Veränderung ist die Verringerung der Summe der Wendezeiten und die gleichmäßigere Auslastung aller Wendegleise (siehe *Tabelle 10*). Nach Vorschlag 1 vergrößert sich die Summe der Wendezeiten der Linie 49 an diesem Endpunkt. Was am anderen Endpunkt passiert, wird hier nicht untersucht. Diese Möglichkeit zeigt mindestens den größeren Spielraum für die Fahrplankonstruktion. Wenn die Abfahrtszeiten noch um 1 Minute verschoben werden, vergrößert sich die Summe der Wendezeiten der Linie 49 am Endpunkt Etele Platz nicht. Aber in diesem Fall erfolgt am Ende jeder dritten Ankunft eine Abfahrt. Das heißt, ohne parallele Ein- und Ausfahrstraßen kann es zu häufigeren Verspätungsübertragungen kommen.

3.3. Verminderung der Abweichungen im Betriebsablauf

- a) Das Ziel ist eine Verbesserung der Pünktlichkeit der *Abfahrt* der Straßenbahnzüge am Endpunkt. Der Straßenbahn-Endpunkt hat ein Ausfahrtsignal, aber es wird wahrscheinlich nicht akkurat benutzt. Einerseits wird das Signal nicht rechtzeitig eingeschaltet, andererseits fahren die Fahrzeugfahrer trotz Aufleuchten des Signals 'Frei' nicht ab. Man muß auf die Vermeidung dieser zwei Erscheinungen achten.
- b) Das Ziel ist eine Verminderung der Schwankungen der *Ankunft* der Straßenbahnzüge am Endpunkt. Eine Lösung ist die Verminderung der Störungen auf der Strecke durch das Schaffen eines eigenen oder besonderen Bahnkörpers.

4. Zusammenfassung

Die Untersuchung der Leistungsfähigkeit und des Leistungsverhaltens eines Straßenbahn-Endpunktes basierte auf einer ausführlichen Beobachtung des Betriebsablaufs des Wendens an der Endstation.

Die Probleme im Vorgang des Wendens wurden klargelegt. Die Schwankungen des Betriebsablaufs bei der Ankunft und Abfahrt der Züge an der Endstation

führen unter Umständen zu Warteschlangen der Züge vor dem Endpunkt. Das ist ein eindeutiger Rückgang der Qualität des öffentlichen Verkehrs.

Mit Hilfe der Bedienungstheorie wurde der Vorgang des Wendens als Bedienungsvorgang und der Straßenbahn-Endpunkt als Bedienungssystem modelliert.

Die Ergebnisse der Modellierung des Wendens stimmen mit den Kenngrößen des beobachteten Vorganges nicht überein. Der tatsächliche Vorgang am Endpunkt ist weniger zufälliger als der mit dem analytischen Modell abgebildete Vorgang. Weitere Untersuchungen können mit einem Simulationsverfahren durchgeführt werden.

Aus den Ergebnissen der Verkehrsprüfung werden Vorschläge zur Vermeidung des Qualitätsrückgangs abgeleitet.

Literatur

- [1] RÜGER, S.: Transporttechnologie – städtischer öffentlicher Personenverkehr, Transpress, Berlin, 1986.
- [2] KÖVES-GILICZE, É. – PÁLMAI, G.: A városi tömegközlekedési vonalak fordulódőei elemzése matematikai statisztikai módszerekkel (Analyse der Umlaufzeiten der Linien in ÖPNV mit Methoden der mathematischen Statistik). *Közlekedéstudományi Szemle*, Budapest 1967, Heft 5 pp. 212–217.
- [3] Fahrplan der Straßenbahnlinie 19 und 49 des Budapester Verkehrsbetriebes (BKV Rt.), Gültig ab 1. 2. 1999.
- [4] FISCHER, K. – HERTEL, G.: Bedienstungsprozesse im Transportwesen, Transpress, Berlin, 1990.
- [5] MÜLLER, P. H. (Hrsg.): Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik – Lexikon der Stochastik, 5. Aufl., Akad.-Verl., Berlin, 1991.
- [6] NAGY, E. – SZABÓ, D. (Hrsg.): Városi Közlekedési Kézikönyv (Nachschlagewerk des städtischen Verkehrs) 2. Aufl., Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984.