

Der Fahrgast- wechsel im öffentlichen Personenverkehr

Dissertation ETH Nr. 10630
vorgelegt von
Ulrich Weidmann
dipl. Bauing. ETH/SIA

Schriftenreihe des IVT Nr. 99
Zürich, Mai 1994

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Anlass für die Arbeit	1
1.11	Ausgangslage	1
1.12	Bisherige Forschungsarbeiten am IVT	1
1.2	Ziel der Arbeit	2
1.3	Umfang der Untersuchung und Abgrenzung	2
1.4	Vorgehen, Struktur der Arbeit	3
1.5	Zeitlicher Ablauf	3
2	Gesetzmässigkeiten des Fahrgastwechsels	5
2.1	Der Fahrgastwechsel im System des öffentlichen Verkehrs	5
2.11	Komponenten des Systems öffentlicher Verkehr	5
2.12	Der Fahrgastwechsel als Vorgang und sein Zusammenhang mit den Systemkomponenten	6
2.13	Der Fahrgastwechsel als Teilprozess des Linienbetriebs	8
2.2	Die Fahrgastwechselzeit an einer Einzeltüre	14
2.21	Einstieg mit geordneten Fahrgästen	14
2.22	Einstieg mit ungeordneten Fahrgästen und Richtungsverkehr	15
2.23	Einstieg mit ungeordneten Fahrgästen und Gegenverkehr	26
2.24	Streuungen	28
2.3	Die Fahrgastwechselzeit eines Kurses	31
2.31	Fahrgastwechsel bei gleichmässiger Systemauslastung	31
2.32	Fahrgastwechsel bei ungleichmässiger Systemauslastung	34
2.33	Fahrgastwechsel bei ungleichmässiger Systemauslastung und Streuungen bei den Fahrgastwechselzeiten der Türen	46
2.34	Fahrgastwechsel bei ungleichmässiger Systemauslastung sowie Streuungen bei den Fahrgastwechselzeiten der Türen und Türbenützungen	49
2.4	Die Fahrgastwechselzeit einer Fahrt	53
2.41	Türleistungsfähigkeit und mittlere Fahrgastwechselzeit unabhängig von Fahrgastwechselzahl	53
2.42	Variable mittlere Fahrgastwechselzeit	54
2.43	Berücksichtigung der Fahrzeugbesetzung	56
2.44	Streuungen der Gesamtfahrgastwechselzeit	59
3	Beschreibung der beteiligten Systemkomponenten	60
3.1	Fahrgast	60
3.11	Eigenschaften der Fahrgäste	60
3.12	Bewegungsablauf, Energieverbrauch und Leistungsfähigkeit	71
3.13	Geschwindigkeitsverhalten der Fussgänger	80
3.2	Feste Anlagen	86
3.21	Höhenlage des Perrons	86
3.22	Lage der Zu- und Abgänge, Ausstattung des Perrons	90
3.23	Leistungsfähigkeit der Fussgängeranlagen	93
3.3	Fahrzeug	99
3.31	Grundkomponenten eines Fahrzeuges und Abmessungen	99
3.32	Elemente der fahrgastbezogenen Grundkomponente	104
3.33	Fahrzeugkonzepte	112
3.4	Linienbetrieb	133
3.41	Fahrgastverhalten	133
3.42	Betriebsauslegung und Haltezeiten im ungestörten Betrieb	138
3.43	Gestörter Betrieb	150

4	Stand der Erkenntnisse zum Fahrgastwechsel	161
4.1	Überblick über die Untersuchungen	161
4.11	Einbezogene Literatur und Gliederung des Abschnittes	161
4.12	Schwerpunkte der bisherigen Arbeiten	161
4.2	Einflussgrößen auf die Fahrgastwechselzeit	163
4.21	Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre	163
4.22	Einflussgrößen am Türsystem	164
4.23	Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt	165
4.3	Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre	165
4.31	Mittelwerte	165
4.32	Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen	168
4.33	Streuung der Fahrgastwechselzeiten	182
4.4	Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse	182
4.41	Relative Türbelastung	182
4.42	Einfluss der Türzahl	183
4.43	Fahrgastverteilung und Ungleichförmigkeit	184
4.44	Einfluss der Türauslastung	193
4.45	Erfahrungswerte und überschlägige Berechnung	193
5	Methodik und Umfang der eigenen Untersuchungen	197
5.1	Umfang der eigenen Untersuchungen	197
5.11	Zielgrößen und Eignung der bisherigen Untersuchungen	197
5.12	Festlegung der näher untersuchten Zielgrößen	198
5.13	Wahl der Methodik	198
5.2	Fahrgastwechselzeit an Einzeltüre	199
5.21	Art und Umfang der Messungen	199
5.22	Die Messungen im einzelnen	201
5.23	Auswertemethodik	209
5.3	Fahrgastwechselzeit am Türsystem	209
5.31	Messungen im praktischen Betrieb	209
5.32	Entwicklung des Computerprogrammes ACoST.NeXT	210
5.4	Fahrgastwechselzahlen einer Fahrt	214
5.41	Messfahrten	214
5.42	Vorgehen und Umfang	214
5.5	Verteilung der Fahrgäste im Fahrzeug	215
5.51	Zweck	215
5.52	Vorgehen und erfasste Fahrzeuge	215
6	Die Fahrgastwechselzeit	218
6.1	Überblick über die Einflussgrößen und Zusammenhänge	218
6.11	Einleitung	218
6.12	Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre	219
6.13	Fahrgastwechselzeit eines Kurses	224
6.14	Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt	229
6.2	Die Leistungsfähigkeit der Einzeltüre	233
6.21	Zweckmässige Kenngrößen	233
6.22	Erwartungswerte und Streuungen	233
6.23	Abhängigkeit von den Einflussfaktoren	244
6.24	Zusammenfassende Beziehung für die Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre	257
6.3	Leistungsfähigkeit des Türsystemes	258
6.31	Zweckmässige Kenngrößen	258
6.32	Mittelwerte	259
6.33	Abhängigkeit von den Einflussfaktoren	266
6.34	Streuungen	278
6.35	Zusammenfassende Beziehung für die Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse	281

6.4	Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt	282
6.41	Berechnung der Fahrgastwechselzeit einer Fahrt	282
6.42	Standardisierte Häufigkeitsverteilung der Fahrgastwechselzahlen	283
6.43	Zusammenfassung der Berechnung der Fahrgastwechsel- und Haltezeit einer ganzen Kursfahrt	286
6.5	Folgerungen für die beteiligten Systemkomponenten	289
6.51	Fahrgast	289
6.52	Feste Anlagen	293
6.53	Fahrzeug	296
6.54	Betrieb	305
7	Kurzfassung	318
7.1	Problemstellung	318
7.11	Ziele der Forschungsarbeit	318
7.12	Stand der bisherigen Kenntnisse	318
7.13	Eigene Untersuchungen	319
7.2	Die Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre	320
7.21	Modell	320
7.22	Überblick über die Einflussfaktoren	320
7.23	Erwartungswert und Streuung	321
7.24	Abhängigkeit von den Einflussfaktoren	321
7.3	Die Fahrgastwechselzeit eines Kurses	323
7.31	Modell	323
7.32	Überblick über die Einflussgrössen	324
7.33	Erwartungswert und Streuung	324
7.34	Abhängigkeit von den Einflussfaktoren	324
7.4	Die Fahrgastwechselzeit einer Kursfahrt	325
7.41	Einflussgrössen	325
7.42	Standardisierte Häufigkeitsverteilung der Fahrgastwechselzahlen	326
7.5	Wertung der Forschungsergebnisse	327
A	Anhang	329
A.1	Literaturverzeichnis	329
A.2	Begriffe im Zusammenhang mit der Fahrgastwechselzeit	349
A.3	Zusammenstellung der Abkürzungen	351
A.31	Masseinheiten	351
A.32	Kurzzeichen der verwendeten Grössen	351
A.33	Verschiedene Abkürzungen	355
A.4	Tabellen zu den Systemkomponenten	357
A.41	Abgrenzung und Beschreibung der Levels-of-Service im Fussgängerverkehr	357
A.42	Latenzzeiten I und II sowie gesamte feste Haltezeitanteile gemäss verschiedenen Quellen	359
A.5	Tabellen zu den bisherigen Erkenntnissen über den Fahrgastwechsel	360
A.51	Zeitbedarf für verschiedene Abfertigungarten	360
A.52	Mittlere Fahrgastwechselzeit gemäss verschiedenen Quellenangaben	361
A.6	Tabellen zu den eigenen Messungen	363
A.61	Regressionsgleichungen der spezifischen Türleistungsfähigkeiten	363
A.62	Spezifische Türleistungsfähigkeiten für bestimmte Grössen des Fahrgastwechsels	364

Meiner lieben Martina

Vorwort

Die Optimierung des Betriebes öffentlicher Linienverkehrsmittel gehörte seit der Gründung des IVT 1975 zu den Forschungsschwerpunkten des Fachbereiches öffentlicher Verkehr. Die Anstrengungen konzentrierten sich vorerst auf die vertiefte Analyse der Gesetzmässigkeiten des Linienbetriebes mit seinen Störungskumulationsprozessen einerseits sowie auf Betriebsleitsysteme und zugehörige Dispositionsstrategien andererseits. Etwas später begann die Entwicklung von Betriebssimulationsprogrammen.

Bei all diesen Arbeiten war zu unterscheiden zwischen dem Geschehen während der Fahrt - Trassierung, Traktion, Störeinflüsse aller Art - und dem Fahrgastwechsel an den Haltestellen. Zu ersterem lag eine umfangreiche Literatur vor, die es zu verarbeiten und zu ergänzen galt, während zum Fahrgastwechsel nur bruchstückweise Unterlagen ohne Zusammenhänge verfügbar waren. Zudem war seit langem klar, dass die Gestaltung von Haltepunkten und Fahrzeugen von grossem Einfluss auf die Fahrgastwechsellvorgänge ist und dass auch die Strukturierung der Fahrgäste nach Alter, Behinderungen, Gepäck etc. zu berücksichtigen sei.

Die bekannten Lücken im Kenntnisstand rund um den Fahrgastwechsel wurden akzentuiert durch die Entwicklung von Dispositionshilfen in der Betriebsleittechnik sowie von Fahrzeugen mit tiefliegendem Wagenboden; - oft zulasten höherer Kosten und ungünstiger Türverteilung.

Deshalb erhielt Dipl. Ing. Ulrich Weidmann nach seinem Eintritt in das IVT 1988 den Auftrag, die Problematik des Fahrgastwechsels im umfassenden Sinne und mit Einbezug der relevanten festen und beweglichen Anlagen zu untersuchen. Herr Weidmann hat sich dieser Aufgabe mit grossem Einsatz und Fachwissen angenommen und während der ganzen Bearbeitungszeit engen Kontakt zur Praxis gepflegt, welche auch sehr bald auf die Teilresultate zurückgriff. Der Ertrag aus diesen Expertisen sowie ein Forschungskredit der ETH ermöglichten eine sehr breite Studie, die Herr Weidmann mit einer Dissertation abschloss und die inhaltlich mit dem hier vorliegenden Institutsbericht weitgehend übereinstimmt.

Die Resultate der Abklärungen geben neue, wesentliche Einblicke in Vorgänge, Einflussfaktoren und Zusammenhänge beim Fahrgastwechsel und liefern Impulse vor allem für die Fahrzeuggestaltung, die verschiedene bisherige Annahmen widerlegen und bereits Eingang in die Praxis gefunden haben.

Prof. Heinrich Brändli

Einleitung

Im Jahre 1987 erhielt der Verfasser als Hilfsassistent am Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT) von Prof. Heinrich Brändli, Inhaber des Lehrstuhles für öffentlichen Verkehr, den Auftrag, frühere Untersuchungen zum Fahrgastwechsel zu sichten. Es zeigte sich dabei, dass auf verschiedene Fragen, insbesondere im Zusammenhang mit der an Aktualität gewinnenden Niederflurtechnik, keine befriedigende Antwort gegeben werden konnte.

Nach dem Diplom eröffnete Herr Prof. Brändli dem Autor die Möglichkeit, als Assistent des IVT die Thematik vertieft zu bearbeiten und die vorliegende Dissertation auszuführen. Sein Einsatz in den zuständigen Gremien führte dazu, dass die ETH Zürich dem Institut einen entsprechenden Forschungsauftrag erteilte und die benötigten finanziellen Mittel freigab. Die von ihm gewährte Freiheit in der Ausführung der Arbeit haben ausserdem sehr motivierend gewirkt. Herr Dr. Ing. Adolf Müller-Hellmann, Geschäftsführer Technik des Verbandes der Deutschen Verkehrsunternehmungen VDV in Köln, hat sich nicht nur spontan zum Korreferat bereiterklärt, sondern er hat sich auch die Mühe genommen, den Verfasser zu wiederholten längeren und vertieften Besprechungen zu empfangen. Die dabei erhaltenen Anregungen waren dem Verfasser eine wertvolle Hilfe. An erster Stelle gilt deshalb mein Dank meinem Referenten Herrn Prof. Heinrich Brändli und meinem Korreferenten Herrn Dr. Adolf Müller-Hellmann.

Mehrmals wurden Messfahrten bei Verkehrsunternehmungen durchgeführt. Dabei durfte der Verfasser ausnahmslos die grosse Zuvorkommenheit der zuständigen Organe geniessen. Ein besonderer Dank geht diesbezüglich stellvertretend an die Herren Eric Grasset (Transports Publics Genevois), Régis Hennion (SEMITAG Grenoble), Gerhard Meier (Deutsche Bundesbahn, Bundesbahndirektion München), Helmut Iffländer (Betriebschef der Basler Verkehrsbetriebe), Mathias Handschin (Generaldirektion der Schweizerischen Bundesbahnen, Direktion Zugförderung und Werkstätten) und Walter Gabathuler (Schindler Waggon AG Pratteln/Altenrhein).

Mit den umfassenden Literaturrecherchen wurde die Bibliothek der ETH Zürich und insbesondere ihre Zweigstelle an der ETH Hönggerberg nicht unbeträchtlich beansprucht. Für die dennoch stets freundliche Bedienung danke ich den betreffenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ganz herzlich. Ein besonderer Dank richtet sich an die Herren Informatik-Ingenieure Dr. Peter Brunner und Markus Montigel, welche mich mit viel Geduld bei der Anwendung der Informatikmittel unterstützt haben. Nur mit ihrer Hilfe war es möglich, diese Arbeit ohne Beanspruchung von Sekretariatsdiensten zu verfassen. Herr Montigel war zudem federführend bei der Informatik-Semestearbeit der Herren Peter Remmele und Bernhard Seybold. Ihr aussergewöhnlicher Einsatz und ihr Sinn für anwenderorientierte Software haben im effizienten Computerprogramm ACoST. NeXT zur Berechnung von Fahrgastwechselzeiten gemündet. Erst damit waren viele Aussagen der vorliegenden Dissertation möglich. Ein beträchtlicher Teil der Abbildungen schliesslich stammt aus der Hand von Frau Bernadette Häberling, für deren sorgfältige Arbeit ich vielmals danke. Zuletzt, dafür aber ganz besonders herzlich, danke ich meinen Eltern, ohne deren vielfältigen Leistungen im Hintergrund ich diese Arbeit nicht hätte verfassen können.

Zusammenfassung

Der öffentliche Linienverkehr hat im Verkehrsgeschehen Europas, vor allem in jenem der grossen Agglomerationen, bereits einen hohen Stellenwert, der aufgrund der verkehrspolitischen Zielvorgaben der meisten Länder noch gesteigert werden soll. In den Entwicklungsländern sind zudem Siedlungskonzentrationen von bisher unbekannter Dimension im Entstehen, deren Erschliessung ohne leistungsfähige öffentliche Linienverkehrsmittel nicht denkbar ist. Probleme grundsätzlicher und praktischer Art in der Planung und im Betrieb des öffentlichen Linienbetriebes bereiten nach wie vor der Fahrgastfluss und die Fahrgastwechselzeit.

Die Fahrgastwechselzeit hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, so von der Zahl der Fahrgäste, welche einen Kurs an einer bestimmten Haltestelle besteigen oder verlassen, von der Zahl und der Breite der Fahrzeugtüren, der Höhendifferenz zwischen Wagenboden und Perron, dem Alter der Fahrgäste und dem Zweck ihrer Reise, der Tageszeit, der Auslastung des Fahrzeuges usw. Die Studie setzte sich zum Ziel, Modelle zu formulieren, um die Fahrgastwechselzeit zuverlässig vorherzusagen, unterschiedliche Fahrzeugkonzepte zu vergleichen und den Fahrgastfluss auf dem Perron und im Fahrzeug zu optimieren.

Das Literaturstudium zu dieser Arbeit umfasst rund 600 Einzeltitel. Experimentell wurden die Fahrgastwechselzeiten und die Benützung der Fahrzeugtüren bei verschiedenen ausgewählten Fahrzeugtypen im praktischen Betrieb gemessen. Einbezogen wurden Fahrzeuge von Fernbahnen und Vorortbahnen, Strassenbahnfahrzeuge und Autobusse, sowohl mit konventioneller Wagenbodenhöhe, als auch Niederflurfahrzeuge. Auf dieser Basis wurde ein Computerprogramm entwickelt, welches es gestattet, die Fahrgastwechselzeit je nach Fahrzeugkonzept und Einstiegsgestaltung mittels wahrscheinlichkeitstheoretischer Gesetzmässigkeiten allgemein zu berechnen.

Als Ergebnis der Untersuchungen ist es gelungen, die Einflussgrössen zu typisieren und deren Wirkung auf die Fahrgastwechselzeit qualitativ und quantitativ zu erfassen. Tageszeit- und fahrgastabhängige Einflüsse wirken sich demnach nicht unwesentlich auf die Dauer des Fahrgastwechsels aus. Die Leistungsfähigkeit der Fahrzeugtüren ist linear von ihrer Breite abhängig. Je breiter eine Türe ist, desto grösser wird aber auch die relative Streuung der Fahrgastwechselzeit, bezogen auf den Mittelwert. Durch einen ebenerdigen Einstieg lässt sich die Fahrgastwechselzeit gegenüber einem Treppeneinstieg um rund 40 % vermindern. Die Leistungsfähigkeit des Türsystems eines Fahrzeuges oder Zuges ist in erster Näherung gleich der Summe der Leistungsfähigkeiten der Einzeltüren. Die Effizienz des Türsystems sinkt indessen mit wachsender Zahl der Türen und mit steigender Streuung an der Einzeltüre. Die Verlängerung der Fahrgastwechselzeit infolge ungleichmässiger Verteilung der Fahrgäste auf die Türen wird quantifiziert. Zur Vorausberechnung der Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt wird aufbauend auf diesen Erkenntnissen ein einfaches Schätzverfahren entwickelt.

Abschliessend werden Folgerungen bezüglich der am Fahrgastwechsel beteiligten Systemkomponenten Fahrgast, feste Anlagen, Fahrzeug und Betrieb abgeleitet. Es wird nachgewiesen, dass bei gegebener Gesamttürbreite mit vielen schmalen Türen kürzere Fahrgastwechselzeiten erreicht werden als mit wenigen breiten. Es wird gezeigt, unter welchen Umständen dank günstiger Einstiegsverhältnisse ein Kurs eingespart werden kann und in welchem Ausmass gleichzeitig die Stabilität des Linienbetriebes verbessert wird.

Summary

Public transport in Europe and mainly in the big cities already has a high importance. The aims of the transportation policies in most of the countries tend to strengthen this good position in the transportation market even more. In third world countries towns are growing so big, that their developing is getting more and more impossible without effective public transport. In the design and the operation of public transport systems the passenger flow and the passenger service time are still problematical.

Passenger service time depends upon many factors, such as the number of passengers boarding and alighting at a specific station, the number and the width of the doors and the height of the vehicle floor above platform, the age of the passengers and the purpose of their trips, the time of day, the vehicle load etc. The objective of this investigation was to provide information on the passenger flow and to formulate the mathematical models in order to predict passenger service time with high reliability, to evaluate different vehicle designs and to optimize passenger flow.

Together with literature studies, which included more than 600 separate publications, measurements of passenger boarding/alighting time and of the use of the doors on different rolling stock were taken (Intercity trains, mass transit vehicles, tramways and buses, with conventional door distribution and carriage floor height, as well as recently developed rolling stock with low-level access and unusual door arrangements). In addition to this a computer program was developed, based upon the theory of probability, which made it possible to calculate the passenger service time for any type of vehicle and for any kind of entrance.

The investigation was successful in typifying qualitatively the influences on passenger service time and to quantify the main effects. It is shown that the time of day and the features of the passengers concerned are essential to the time passenger flow needs for passing the vehicle entrances. The capacity of a single entrance is a linear function of its width. But the larger the entrance is, the more the scattering of passenger service time grows, related to its mean value. Low floor vehicles allow to shorten passenger service time by about 40 % of that of a traditional vehicle entry with three steps. The capacity of the vehicle or train entrance system is approximately equal to the sum of the capacities of all single entrances. Though the more numerous the entrances are and the bigger the scattering of passenger service time is, the lower the efficiency of the whole system gets. Furthermore, the study gives quantitative information about the effects on passenger service time unevenly distributed passengers have. Based upon this knowledge of passenger flow a simple method to estimate the sum of passenger service times of a run between two terminals is presented.

The final part of the study deals with the conclusions relating to the components of the public transport system, which participate in passenger flow processes, i. e. the passengers themselves, the installations, the vehicles and the operating. Calculations prove that - given a certain amount of total entrance width of a vehicle - passenger service time is the shorter, the more entrances there are and the narrower each of them is. It is shown that under certain circumstances there can be savings in tramways or buses thanks to the low floor technology. Moreover, it is also shown to what extent the stability of operation is improved, if the passenger service time is shortened.

1 Einführung

1.1 Anlass für die Arbeit

1.1.1 Ausgangslage

Der öffentliche Linienverkehr hat in Europa und namentlich in der Schweiz einen grossen Stellenwert, der aufgrund verkehrspolitischer Zielvorgaben noch gesteigert werden soll. Die räumlichen Verhältnisse und die Belastung unserer Umwelt gestatten es nicht, die Infrastruktur des Individualverkehrs auf jenen Stand zu bringen, welcher dem Bedürfnis nach individueller Mobilität entsprechen würde. In den Entwicklungsländern mit ihrer rasanten Bevölkerungsentwicklung und der voranschreitenden Verstädterung sind zudem Siedlungskonzentrationen von bisher unbekannter Dimension und Dichte im Entstehen. Deren Erschliessung ist ohne leistungsfähige Massenverkehrsmittel undenkbar, sollen nicht schwerwiegende wirtschaftliche und soziale Nachteile in Kauf genommen werden. Ein Motorisierungsgrad, wie er in den Industriestaaten bereits üblich ist, ist nicht verkraftbar.

Letztlich ist es somit die Knappheit an Ressourcen wie Boden oder Energie sowie an Elementen der Lebensqualität wie saubere Luft, Ruhe, Sicherheit und wohnliches Umfeld, welche dem öffentlichen Verkehr hoher Leistungsfähigkeit und insbesondere dem Schienenverkehr in Städten und Ballungsräumen zentrale Aufgaben erhalten oder verschaffen wird. Öffentlicher Verkehr mit hoher Leistungsfähigkeit bedeutet Linienbetrieb, der die wichtigste Produktionsart öffentlicher Personenverkehrsleistung ist. Er ist in Bau, Betrieb und Unterhalt aufwendig und entsprechend hoch sind die Anforderungen der Betreiber an dessen Wirtschaftlichkeit. Die Fahrgäste ihrerseits vergleichen den angebotenen Komfort, die Geschwindigkeit und die Kosten mit dem Individualverkehr, welcher in den zurückliegenden Jahrzehnten fahrzeug-, anlagen- und preisseitig grosse Fortschritte gemacht hat.

Eine Problemstelle im System des öffentlichen Linienverkehrs bilden die Fahrzeugeinstiege. Der Teilproduktionsprozess "Fahrgastwechsel" gehört zu den Beförderungszeitkomponenten mit den bedeutendsten zeitlichen Streuungen und mit der schlechtesten Kalkulierbarkeit. Im Gegensatz dazu beherrscht man beispielsweise die quantitative Erfassung der Fahrzeit mittels der Traktionsrechnung gut. Der Fahrgastwechsel ist somit ein Schwachpunkt der Betriebsplanung, welcher naturgemäss bei Systemen mit kurzen Fahrtlängen - also im Nahverkehr - besonders in Erscheinung tritt.

1.1.2 Bisherige Forschungsarbeiten am IVT

Das Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH) beschäftigt sich bereits seit geraumer Zeit mit Fragen der Betriebsplanung und Betriebsführung im Nahverkehr. Vorarbeiten dazu leistete Dr. Walter Berg mit seiner Dissertation "Innerbetriebliche Gesetzmässigkeiten des öffentlichen Linienbetriebes" (ETH-Dissertation Nr. 6905, 1982 [34]). Darin werden bereits einige Ansätze zum Fahrgastwechsel formuliert. Aufbauend auf den Arbeiten von Berg bezweckt die Arbeit von dipl.Ing. Helmut Iffländer ein Verfahren, das die Auswirkungen unvermeidbarer Fahrplanabweichungen kurzfristig kalkulierbar und prognostizierbar macht. Bei diesen Arbeiten, aber auch bei der Beurteilung neuartiger Fahrzeugkonzepte (Niederflurfahrzeuge) stellte sich heraus, dass die Zusammen-

hänge des Fahrgastwechsels (Abhängigkeit von den verschiedenen Einflussgrößen, Gesetzmässigkeiten) noch nicht hinreichend bekannt und quantifiziert sind. Es wurde deshalb beschlossen, diesem Problemkreis eine eigene Untersuchung zu widmen.

1.2 Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit soll dazu dienen, den Fahrgastwechsel sowie seine Zusammenhänge und Gesetzmässigkeiten zu erkennen und auf der Basis allgemeiner Parameter zu quantifizieren. Die Erkenntnisse sollen es erlauben, zu folgenden Problemstellungen Aussagen zu machen:

- *Fahrplangestaltung:* Bei gegebenen Fahrzeugen und Anlagen ist ein Fahrplan aufgrund der bekannten oder erwarteten Anzahl Ein- und Aussteiger zu konzipieren. Formeln für die Fahrgastwechselzeit sollen Erwartungswerte für die entsprechenden Haltezeitanteile liefern. Im weiteren soll sich der Einfluss unterschiedlicher Fahrzeugtypen auf die Beförderungszeit abschätzen lassen.
- *Betriebsleittechnik:* Liegen Angaben über den aktuellen Besetzungsgrad eines Kurses und Erfahrungen über den Fahrgastwechsel je Haltestelle vor, so soll sich der Zeitanteil des Fahrgastwechsels kurs- und haltestellenspezifisch vorherbestimmen lassen. Dies ist namentlich dann interessant, wenn die Fahrgastwechselzeiten infolge einer starken Auslastung des Kurses unverhältnismässig ansteigen und dispositive Massnahmen notwendig werden.
- *Fahrzeuggestaltung und Haltestelleninfrastruktur:* Aus den Abhängigkeiten der Fahrgastwechselzeit sollen sich Anforderungen an die Fahrzeugkonzeption formulieren und gegen andere Anforderungen, zum Beispiel nach einer hohen Anzahl Sitzplätze, abwägen lassen. Es muss möglich sein, verschiedene Fahrzeugkonfigurationen bezüglich Haltezeiten miteinander zu vergleichen, ohne dass dafür Versuche durchgeführt werden müssen.

Die Resultate der Arbeit sollen in praxisnahen Richtlinien zusammengestellt und einfach zugänglich gemacht werden.

1.3 Umfang der Untersuchung und Abgrenzung

Die Arbeit beschränkt sich im wesentlichen auf den Fahrgastwechsel bei Abfertigungsmethoden ohne Billettverkauf an einer Fahrzeugtüre. Diese Einschränkung ist gerechtfertigt, da hochbelastete Systeme künftig mit Sicherheit eine vollautomatisierte Fahrgastabfertigung durch ortsfeste Billettautomaten und einen hohen Anteil von Sichtkartenbesitzern aufweisen werden. In der Schweiz ist dies bereits seit Jahren der Fall. Der Billettverkauf durch den Fahrer wird künftig nur noch eine kleine Rolle spielen. Halten wird sich diese Abfertigungsform bei schwach belasteten Angeboten wie Überlandbuslinien und Bahnnebenlinien, welche im Einmannbetrieb bedient werden. Weder wird hier die Fahrgastwechselzeit einen relevanten Anteil der Fahrzeit beanspruchen (grosse Haltestellenabstände) noch sind die vom Nahverkehr bekannten Aufschaukelungen

einer Störung auch nur ansatzweise zu erwarten. Lediglich gestreift werden daher die verschiedenen Abfertigungsarten und deren Einfluss auf die Fahrgastwechselzeit. Das Verkehrsaufkommen und insbesondere die Zahl der Fahrgäste an den Haltestellen sei gegeben. Ausserdem geht die vorliegende Studie nicht näher auf die Beförderung von Mobilitätsbehinderten im öffentlichen Verkehr sowie auf Sicherheitsfragen im Zusammenhang mit der Einstiegsgestaltung ein. Die Einstiege werden somit bewusst nur aus einer bestimmten Sicht, nämlich jener der Betriebsabwicklung, betrachtet, dies in voller Anerkennung der Tragweite der übrigen genannten Problemkreise. Diese verdienen aber gerade deshalb eigene Untersuchungen.

1.4 Vorgehen, Struktur der Arbeit

Die Untersuchung geht von einer Systembetrachtung des öffentlichen Linienverkehrs aus. In einem einleitenden Abschnitt werden die beim Fahrgastwechsel auftretenden Teilprozesse und Gesetzmässigkeiten allgemein dargestellt und deren Zusammenhang mit den Systemkomponenten des öffentlichen Personenverkehrs aufgezeigt (Kapitel 2). Anschliessend werden die beteiligten Systemkomponenten mit ihren relevanten Eigenschaften beschrieben (Kapitel 3). Ein Überblick über die bereits in der Fachliteratur veröffentlichten Erkenntnisse zu den Gesetzmässigkeiten des Fahrgastwechsels dient als Basis für die Abschätzung der Wissenslücken (Kapitel 4). Die aufgrund dieser Analyse durchgeführten eigenen Untersuchungen werden nach Umfang und Methodik dargestellt (Kapitel 5). Mit Hilfe von Literaturangaben und der eigenen Untersuchungen werden die einzelnen Gesetzmässigkeiten quantifiziert und abschliessend die aus der gesamten Arbeit gewonnenen Schlussfolgerungen bezüglich der Systemkomponenten dargestellt (Kapitel 6). Für das Verständnis des Fahrgastwechselvorganges, seiner Gesetzmässigkeiten und der daraus abzuleitenden Folgerungen genügt die Lektüre der Abschnitte 2 und 6. Die Abschnitte 3 bis 5, welche die Herleitung beziehungsweise die Begründung der Zahlenwerte enthalten, können übersprungen werden. Der Abschnitt 7 fasst die wesentlichen Punkte zusammen und soll als Leitfaden durch die Untersuchung dienen.

1.5 Zeitlicher Ablauf

Im Jahre 1984 wurde von H. Müller und H. Amacker am IVT das "Konzept einer Untersuchung über Phänomene des Fahrgastwechsels im ÖPNV" erarbeitet [344]. Die Untersuchung sollte sowohl Eisenbahnfahrzeuge als auch Tramwagen umfassen. Namentlich sollte die Ablieferung eines Gelenktram-Prototyps der Genfer Verkehrsbetriebe in Niederflurbauart sowie der geplante S-Bahn-Betrieb auf der Glattalstrecke der SBB zu detaillierten Untersuchungen genutzt werden. Das Konzept enthielt eine Anzahl von Hypothesen. Zusätzlich wurde bei verschiedenen Stellen mittels einer Umfrage das Interesse an einer Beteiligung an den Arbeiten abgeklärt. Bereits vorher, nämlich Mitte 1984, hatten die Genfer Verkehrsbetriebe erste eigene Messungen durchgeführt.

Es zeigte sich, dass viele der Hypothesen erst nach Ablieferung der Serienfahrzeuge in Genf angegangen werden konnten. Deshalb und aufgrund anderweitiger Belastung ruhten die Arbeiten bis im März 1987. Damals wurde geprüft, welche der aufgeworfenen Fragen mit den Genfer Messungen beantwortet werden konnten und welche zusätzlichen Untersuchungen durchzuführen waren. Mittlerweile nahm 1987 die Niederflur-Strassenbahn Grenoble (F) ihren Betrieb auf und im Oktober 1988 konnten deshalb in Genf (26./27.10.) und Grenoble (27./28.10.) eigene umfangrei-

che Fahrgastwechselformen durchgeführt werden. Die Resultate wurden im Zwischenbericht vom Januar 1989 festgehalten. Es zeigte sich dabei klar, dass die bisherigen Untersuchungen die Beantwortung der gestellten Fragen nicht gestatteten.

Aus diesem Grund beantragte das IVT am 27. Februar 1989 bei der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich einen entsprechenden Forschungskredit für weiterführende Arbeiten. Die Bewilligung erfolgte am 9. Juni 1989. Eine zweite Messserie konnte im Zusammenhang mit Versuchsfahrten von Doppelstockwagen auf dem Netz der S-Bahn München zwischen dem 12. und 14. Juni 1989 folgen. Die Resultate wurden im zweiten Zwischenbericht vom November 1989 zusammengestellt. Die Versuchsfahrten eines Niederflur-Gelenkbusses von MAN auf dem Netz der Basler Verkehrsbetriebe im Frühjahr 1990 ermöglichten eine dritte Messserie an einer weiteren Fahrzeugkategorie. Am 23. und 24. April wurden der Niederflurbus und zwei konventionelle Trolleybusse im Auftrag der Basler Verkehrsbetriebe von Messpersonal begleitet. Der zugehörige dritte Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben datiert vom Juli 1990.

Die Aufarbeitung der Fahrgasteigenschaften während des Jahres 1991 mündete im Institutsbericht Nr. 90 "Transporttechnische Eigenschaften der Fussgänger" vom Januar 1992 beziehungsweise in der erweiterten zweiten Auflage vom März 1993. Die Literaturrecherchen zum Fahrgastwechsel und zu den beteiligten Systemkomponenten des öffentlichen Verkehrs beanspruchten das Jahr 1992. Im Jahr 1993 schliesslich liessen sich die Messreihen durch die Untersuchungen des IVT vom 16. Januar 1993 an der S-Bahn-Linie S7 in Zürich, durch eine solche der SBB an deren Einheitswagen IV zwischen dem 3. und 14. Juni 1993 sowie durch die Maquettenversuche der SBB und SWP vom 24. Juni 1993 wertvoll ergänzen. Letztere Untersuchungen wurden durch das IVT fachlich begleitet. Ebenfalls 1993 erfolgten die Schlussergebnisse der Messungen und die Redaktion der Arbeit.

2 Gesetzmässigkeiten des Fahrgastwechsels

2.1 Der Fahrgastwechsel im System des öffentlichen Verkehrs

2.1.1 Komponenten des Systems öffentlicher Verkehr

Der öffentliche Personenverkehr stellt ein Leistungsangebot zur Ortsveränderung von Personen mit vorausbestimmter örtlicher und zeitlicher Verfügbarkeit bereit. Dieses kann von jedermann aufgrund vorgegebener Beförderungsbestimmungen beansprucht werden, fasst verschiedene Einzelnachfragen zusammen und schliesst den Zwang zum Selbstfahren aus [67]. Der grundsätzliche Unterschied zum Individualverkehr ist somit die Stellung des Konsumenten. Beim öffentlichen Verkehr ist entweder Fahrpersonal oder ein automatisches Verkehrsmittel nötig. Beides ist kostspielig und zwingt zur Massenproduktion mit grossen Transportgefässen und diskreten Bedienungszeiten. Die grossen Transportgefässe wiederum führen zu aufwendigen Infrastrukturen, die den Marktzugang erschweren. Unabhängig vom Verkehrsmittel sind zur öffentlichen Beförderung von Personen folgende Komponenten erforderlich:

- Marketing
- Betriebsplanung und Betriebsführung
- Fahrzeuge
- Feste Anlagen
- Organisations- und Finanzierungsstrukturen
- Personal



Abb. 2-1: Die Komponenten des öffentlichen Verkehrs.

Mit dem Fahrgastwechsel stehen in unterschiedlicher Weise das Marketing, der Betrieb, die Fahrzeuge und die festen Anlagen im Zusammenhang. Er ist für eine Verkehrsunternehmung somit ein Schnittstellenproblem.

2.12 Der Fahrgastwechsel als Vorgang und sein Zusammenhang mit den Systemkomponenten

2.12.1 Der Fahrgastwechsel als Vorgang

Zur Beanspruchung einer öffentlichen Verkehrsleistung bewegt sich der Fahrgast von seiner Warteposition, die er vor der Einfahrt des Kurses innehatte, zur Einstiegstüre, durchquert diese und sucht sich im Innern des Fahrzeuges einen Platz. Am Ende der Fahrt verlässt er das Transportgefäss wieder. Der einzelne Fahrgastwechsel ist ein einfacher Vorgang und beansprucht pro Person wenig Zeit. Die grosse Summe der Fahrgastwechsel hingegen lässt ihn zu einem relevanten Teilprozess in der Produktion werden. Er weist zudem eine Vielzahl von Abhängigkeiten und daher grosse stochastische Streuungen auf, welche erhebliche Unregelmässigkeiten verursachen.

Im betrieblichen Sinn besteht der Fahrgastwechsel zwar lediglich darin, dass sich Fahrgäste durch den Querschnitt mindestens einer Türe des Fahrzeuges bewegen. Zur quantitativen Beschreibung müssen indessen alle betroffenen Systemkomponenten in die Betrachtung einbezogen werden, da sie im Zu- und Nachlauf auf dem Perron und im Fahrzeug sowie das Verhalten der Fahrgäste, insbesondere deren Geschwindigkeit, mitbestimmen. Der Fahrgastwechsel unterliegt den Charakteristiken der Fahrgäste, der Konzeption und den Abmessungen der festen Anlagen und der Bauart der Fahrzeuge (passive Abhängigkeit). Er wirkt mit seinem Zeitbedarf und seinen Schwankungen seinerseits auf den Betriebsablauf ein und ist damit Bestandteil von dessen Gesetzmässigkeiten (aktive Abhängigkeit).

Die beim Fahrgastwechsel beteiligten Elemente der Anlagen und des Fahrzeuges lassen sich grundsätzlich in Speicher und Durchgänge unterteilen. Die Speicher sind gekennzeichnet durch ihre Speicherkapazität, die Kenngrösse der Durchgänge ist ihre Leistungsfähigkeit. Tritt eine Funktionsmischung auf, so muss der zur Verfügung stehende Raum auf die beiden Funktionen aufgeteilt werden.

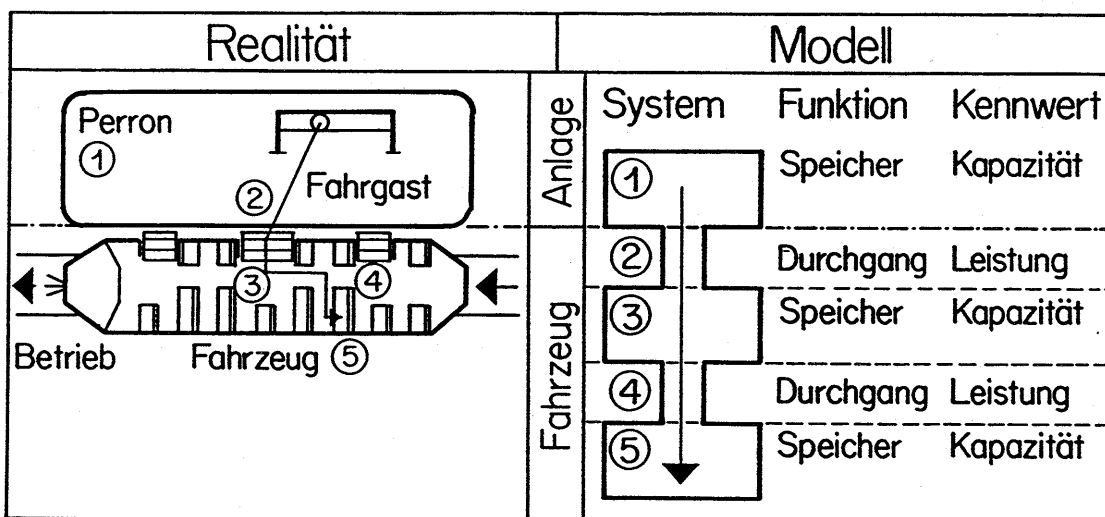


Abb. 2-2: Komponenten des öffentlichen Verkehrs, welche den Fahrgastwechsel betreffen oder vom Fahrgastwechsel betroffen sind.

2.12.2 Stellenwert des Fahrgastwechsels im System des öffentlichen Verkehrs

2.12.21 Fahrgastwechsel und Fahrgast

Allein auf dem Netz der Zürcher Verkehrsbetriebe wird über zwei Millionen Mal pro Tag ein Fahrzeug bestiegen oder verlassen. Dabei überwinden alle Fahrgäste zusammen eine Höhendifferenz von rund 1.5 Millionen Höhenmetern. Jeder Fahrgastwechsel vermindert den Komfort und verlängert die Reisezeit. Im Nahverkehr mit seinen geringen Beförderungsweiten fällt die Qualitäts- und Geschwindigkeitseinbusse besonders stark ins Gewicht, denn für fünf Minuten Fahrzeit muss der Fahrgast etwa die gleiche Hubarbeit aufwenden wie für eine fünfstündige Fahrt in einem Eurocity-Zug. Zum nahezu unüberwindlichen Hindernis kann der Einstieg für Mobilitätsbehinderte werden. Zwar unterscheiden sich deren Mobilitätsbedürfnisse grundsätzlich nicht von jenen der Nichtbehinderten, doch sind ihre Anforderungen an das Transportmittel um ein Vielfaches höher. Gar nicht zur Benützung klassischer öffentlicher Verkehrsmittel sind Rollstuhlfahrer in der Lage. Intensive Bestrebungen richten sich daher vor allem darauf, diesbezüglich Abhilfe zu schaffen.

2.12.22 Fahrgastwechsel und feste Anlagen

Von den festen Anlagen sind für den Fahrgastwechsel das Perron und seine Zu- und Abgänge relevant. Bei Systemen im Strassenraum trifft dies hingegen nicht zu. Die Grösse der Warteraumfläche bestimmt die Dichte der wartenden Fahrgäste. Die Zu- und Abgänge schliesslich beeinflussen die Verteilung der Fahrgäste auf die Türen des Fahrzeuges. Im strassengebundenen öffentlichen Verkehr kann das Perron mit dem Trottoir identisch sein oder überhaupt fehlen. Hingegen sind die Anlagen von Eisenbahnen, S-Bahnen und U-Bahnen mit ihren Zu- und Abgängen, Warteräumen und Räumen für Angebote wie Fahrausweiserwerb, Verpflegung etc. aufwendiger ausgestaltet. Das Perron ist charakterisiert durch die Höhe über Schienenoberkante, die Warteraumlänge und Warteraumtiefe, die Zugänge sowie die Installationen. Bei strassenverkehrsunabhängigen Systemen kann die Perronhöhe ohne Probleme den Bedürfnissen nach einem optimalen Einstieg angepasst werden.

2.12.23 Fahrgastwechsel und Fahrzeug

Das Fahrzeug ist das Resultat eines Optimierungsprozesses, innerhalb dessen grosszügig bemessene und gut verteilte Einstiege ohne Höhendifferenz nur eine von vielen Zielgrössen darstellt. Die Optimierung unterliegt Randbedingungen, die zum Teil vom System selbst gesetzt werden, zum Teil von der Umgebung aufgezwungen werden. Gerade im strassengebundenen Kurzstreckenverkehr, bei welchem dem Fahrgastwechsel ein besondere Stellenwert zukommt, ist der Optimierungsspielraum am stärksten eingeengt.

Als ideal werden die Fahrgäste nur die Einstiegshöhe Null betrachten. Versuche mit tiefen Einstiegen sind deshalb bereits mehrere Jahrzehnte zurückzuerfolgen. Das Interesse blieb aber aus kommerzieller Sicht infolge der faktischen Monopolstellung klein und ein betrieblicher Nutzen war nicht zu erwarten, solange der Fahrausweis beim stationären Schaffner oder beim Fahrer erworben werden musste. Dies änderte sich, als vor etwa 25 Jahren beginnend in der Schweiz die Umstellung auf Billettautomaten an den Haltestellen eingeleitet und die Beschleunigung des Fahrgastwechsels durch konstruktive Massnahmen zur Zielgrösse wurde. Pionierdienste haben die Genfer Verkehrsbetriebe 1984 und die Stadtbahn Grenoble 1987 geleistet. Innert weniger Jahre entstand daraufhin eine grosse Zahl technisch höchst unterschiedlicher Konstruktionen mit dem

Ziel, einen Teil oder die Gesamtheit des Wagenbodens möglichst tief anzuordnen. Begünstigt wird eine rasche Marktdurchdringung, weil die Einführung bei hohem Kundennutzen etappenweise, ohne Anpassung der festen Anlagen und ohne massive Mehrkosten möglich ist. Erkennbar wird aber auch, dass der Tiefeinstieg zu Einschränkungen in der Konzeption der Fahrzeuge führt, welche die Vorteile zunichte zu machen drohen: Die Beschleunigung des Fahrgastwechsels an den einzelnen Türen wird oftmals mit einer kleineren Anzahl Türen und einer ungleichmäßigen Türverteilung erkauft.

2.12.24 Fahrgastwechsel und Betrieb

Für den Betreiber eines öffentlichen Verkehrssystems bedeutet die Aufenthaltszeit an den Haltestellen nicht nur eine Reduktion der Umlaufgeschwindigkeit des Rollmaterials und damit ein Absinken der Produktivität, sondern wegen mangelhafter Kalkulierbarkeit auch eine ständige Quelle von Fahrplanabweichungen. Er ist daran interessiert, diese Verlustzeiten und Störungen zu minimieren, solange die zu erzielenden Einsparungen über allfälligen Mehrkosten liegen. Besonders bedeutsam ist dies im Nahverkehr, da hier eine Störung infolge des fahrplanunabhängigen Fahrgastzustromes weiter anwächst und andere Kurse in Mitleidenschaft zieht.

Die folgende Bemerkung von [26] trifft heute sicher nicht (mehr) zu: "Bei öffentlichen Nahverkehrsmitteln ohne eigenen Verkehrsraum ... sinken die Fahr- und Reisegeschwindigkeiten in den Hauptverkehrsstunden in den Innenstädten auf Fussgängergeschwindigkeit ab. Bei ihnen ist es müssig, über Bruchteile von Minuten, die zum Fahrgastwechsel benötigt werden, Untersuchungen anzustellen." Im Gegenteil: Mit der steigenden Bevorzugung des öffentlichen Verkehrs und der verbesserten Betriebsleitetechnik wächst der relative Anteil der Fahrgastwechselzeit. In ähnlicher Weise verdient die Haltezeit aber auch bei Eisenbahnsystemen, welche nach dem Knotenpunkt-konzept betrieben werden, vermehrte Beachtung. Die Züge sind in ein starres Fahrplangebilde eingepasst und eine verlängerte Haltezeit muss durch einen entsprechenden Fahrzeitgewinn auf den benachbarten Strecken teuer kompensiert werden.

2.13 Der Fahrgastwechsel als Teilprozess des Linienbetriebes

2.13.1 Die Umlaufzeit als Produktionsgrösse

Die häufigste Form öffentlicher Personenverkehrsleistungen ist der Linienbetrieb, bei welchem eine feste Folge von Haltestellen zu bestimmten Zeiten von Fahrzeugen bedient wird. Er unterliegt der Streckengebundenheit, der Liniengebundenheit, der Haltestellengebundenheit und der Fahrplangebundenheit [65]. Zusammen mit dem im Nahverkehr und vermehrt auch im Fernverkehr üblichen Einsatz der Fahrzeuge als unveränderte Kompositionen in sich wiederholenden Umläufen ist der Produktionsprozess vollständig beschrieben. Zentrale Kennzahl in der Produktion öffentlicher Verkehrsleistungen im Linienbetrieb ist die Umlaufzeit als Zeitaufwand für die Absolvierung eines bestimmten sich wiederholenden Produktionsprogrammes. Sie setzt sich aus der Fahrzeit t_f , der Haltezeit t_h , den Verlustzeiten t_v und der Wendezeit t_w zusammen:

- *Fahrzeit:* Die Fahrzeit ist jene Zeit, während welcher ein Fahrzeug in Bewegung ist. Sie ist eine Funktion der Traktionsleistung des Fahrzeuges, des Adhäsionsgewich-

tes, des Reibungsbeiwertes, der Bremsleistung, der Höchstgeschwindigkeit und des Fahrerverhaltens.

- Haltezeit:** Die Zeit, während der ein Zug an einer Haltestelle steht, ist die Haltezeit. Sie beginnt zum Zeitpunkt des Anhalterucks, endet mit dem Anfahrdruck und setzt sich aus einem konstanten und einem variablen Anteil zusammen. Die Bedeutung des konstanten Anteils wird bestimmt durch die Zahl der Haltestellen, die Bauart des Türmechanismus sowie die Dauer und Verknüpfung der Teilprozesse beim Haltevorgang. Der variable Haltezeitanteil ist abhängig von der Fahrgastwechselzahl und der Leistungsfähigkeit des Türsystems. Die Summe aller Haltezeiten einer Fahrt bildet die *Gesamthaltezeit*.
- Verlustzeit:** Verlustzeiten treten infolge störungsbedingt verlangsamter Fahrweise oder infolge nicht vorgesehener Halte auf. Ein *Fahrzeitverlust* entsteht durch eine unplanmässige Verlangsamung der Fahrt, verursacht beispielsweise durch nahe am Gleis stehende Autokolonnen oder vorausfahrende langsamere Kurse. Kommt ein Kurs zwischen zwei Haltestellen zum Stehen, so spricht man von der *Streckenverlustzeit*. Sie umfasst nur den Zeitraum, während welchem sich der Kurs in Ruhe befindet und ihr Ausmass wird bestimmt durch die Häufigkeit von Störungsquellen auf der Strecke. Die *Haltestellenverlustzeit* schliesslich ergibt sich, wenn ein Kurs durch Lichtsignale oder den Individualverkehr am Verlassen der Haltestelle gehindert wird. Sie ist abhängig von der Zahl der Störeinflüsse bei der Haltestelle.
- Wendezeit:** An den Endhaltestellen werden bestimmte Reservezeiten - die *Wendezeiten* - zur Stabilisierung des Fahrplanes und für die Obliegenheiten des Personals vorgesehen. Die Grösse der Wendezeit bemisst sich nach der Störungsanfälligkeit der Strecke, den erforderlichen Handlungen des Personals wie Wechseln der Zielschilder, Wenden des Fahrzeuges etc., nach den gesetzlichen Bestimmungen betreffend Ruhezeiten sowie nach Kursfolgezeit, Linienlänge und Beförderungsgeschwindigkeit. Die Reserven zum Ausgleich von Unregelmässigkeiten können auch unterwegs angeordnet werden.

Unter der *Beförderungszeit* t_b versteht man den fahrplanmässigen Zeitbedarf zwischen zwei definierten Stationen. Sie umfasst die Fahrzeit, die Haltezeiten und die Verlustzeiten, nicht aber die Wendezeiten.

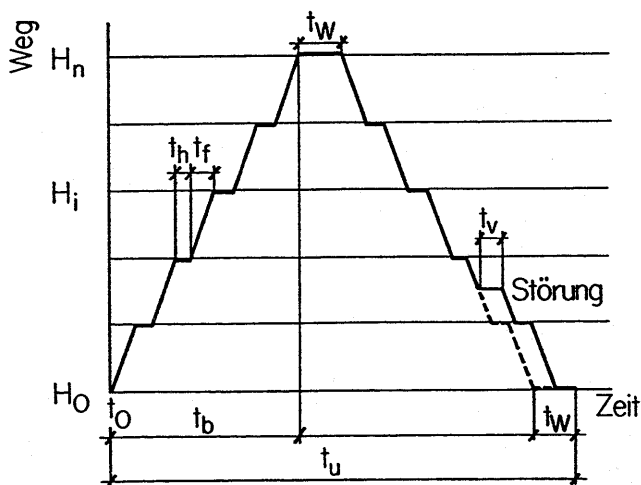
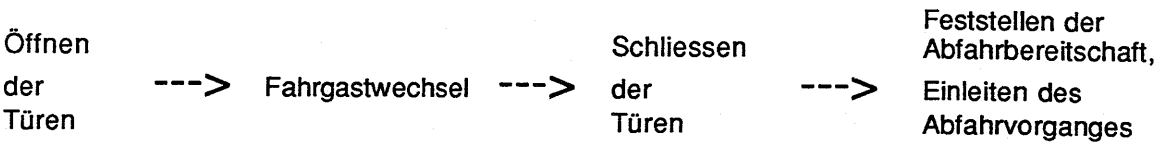


Abb. 2-3: Die Umlaufzeit und ihre Komponenten.

Bei gegebener Streckenlänge und unter sonst gleichen Bedingungen nehmen die Verlustzeiten und die Wendezeiten bei steigender Haltestellendichte tendenziell zu. Der feste Haltezeitanteil verlängert sich proportional zur Zahl der Haltestellen, die Fahrzeit unterproportional. Die variable Haltezeit wird leicht grösser, da der Fahrgastwechsel an den einzelnen Haltestellen kleiner wird und sich damit die spezifischen Werte pro Person verschlechtern. Die Bedeutung der gesamten Haltezeit für die Umlaufzeit nimmt insgesamt mit sinkender Haltestellendistanz rasch zu.

2.13.2 Die Elemente der Haltezeit

Der Halt an einer Haltestelle dient dem Ein- und Aussteigen von Fahrgästen sowie gegebenenfalls für Nebenaufgaben. Zu letzteren gehören namentlich der Gepäck- und Postumschlag. Unabhängig vom Verkehrsmittel treten folgende voneinander abhängige Teilprozesse auf:



Jeder dieser Teilvorgänge besteht in der Feststellung der Voraussetzungen zu deren Beginn, dem Vorgang selbst und der Feststellung des Abschlusses. Für die Ausgestaltung und gegenseitige Verknüpfung der Funktionen und Subfunktionen wurden viele Modelle entwickelt, sodass sich kein Standardablauf darstellen lässt. Namentlich unterscheiden sich die Abfertigungsverfahren, dies teilweise sogar innerhalb von derselben Verkehrsunternehmung.

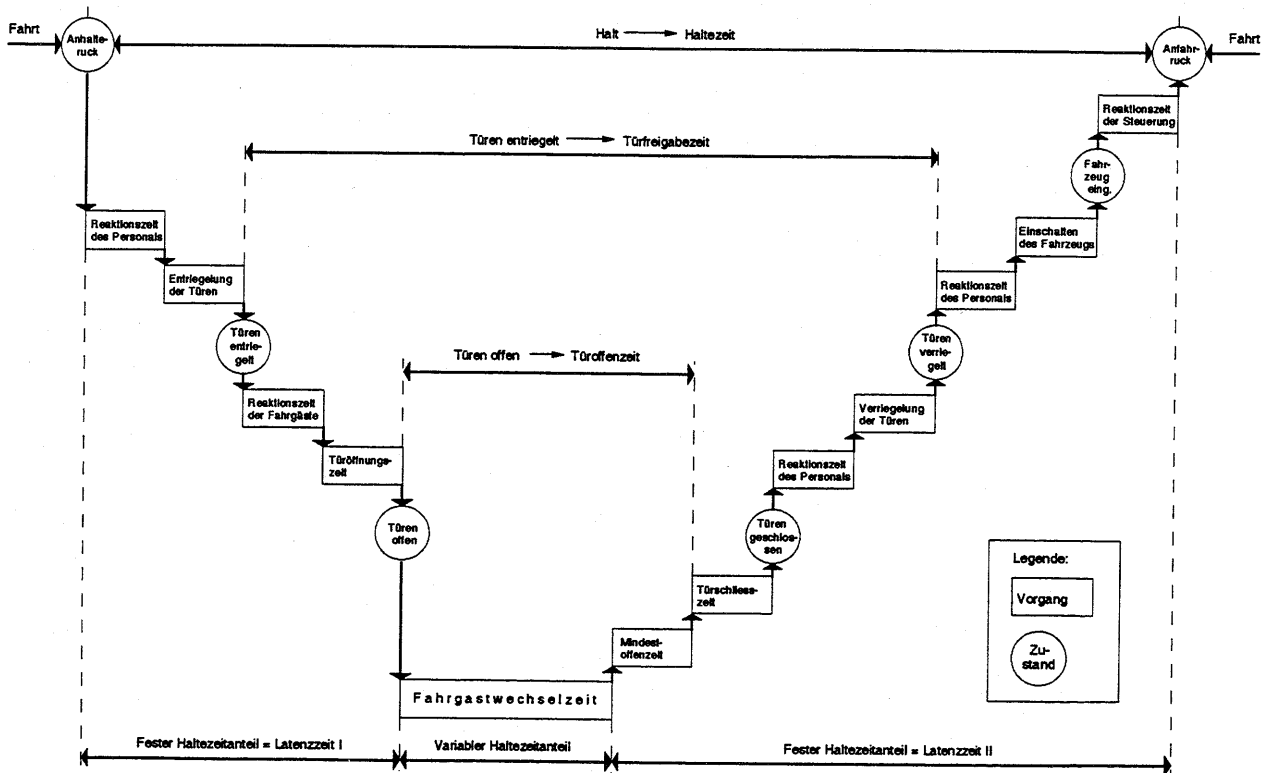


Abb. 2-4: Netzplan der Vorgänge beim Halt eines öffentlichen Personenverkehrsmittels an einer Haltestelle mit gegenseitigen Abhängigkeiten. Annahmen: Türfreigabe erst nach Anhalteruck, Türen schliessen nach Ablauf der Mindestoffenzeit selbsttätig, Abfahrt erst nach vollendeter Türschliessung.

2.13.3 Quantitative Beschreibung des Fahrgastwechsels

2.13.31 Begriffe

Zur Beschreibung der Fahrgastwechsels werden in dieser Arbeit folgende Begriffe verwendet:

- Die *Fahrgastzahl* ist die Summe der Fahrgäste, welche die Fahrt eines Linienkurses zwischen zwei Endstationen insgesamt oder auf einer Teilstrecke benützen. Sie entspricht der Summe aller Einsteiger oder Aussteiger.

$$(2-1) \quad F_K = \sum E_i = \sum A_i$$

wobei F_K Fahrgastzahl eines Kurses [P]
 E_i Einsteigende Fahrgäste an der Haltestelle i [P]
 A_i Aussteigende Fahrgäste an der Haltestelle i [P]

- Der *Auslastungsgrad* ist die Gegenüberstellung von aktueller Besetzung eines Fahrzeuges und maximalem definiertem Fassungsvermögen. Letzteres ist bis zu einem gewissen Punkt Ermessenssache und hängt namentlich mit dem gewährleisteten Komfort zusammen.

$$(2-2) \quad q_K = \frac{Q_K}{Q_{K,max}}$$

wobei q_K Auslastungsgrad des Kurses [-]
 Q_K Momentane Besetzung des Kurses [P/Kurs]
 $Q_{K,max}$ Maximales Fassungsvermögen des Kurses [P/Kurs]

- Die *Fahrgastwechselzahl* ist die Zahl der Fahrgäste, welche an einer bestimmten Haltestelle oder Türe ein- und aussteigen:

$$(2-3) \quad F = E + A$$

wobei F Fahrgastwechselzahl an einer Haltestelle oder Türe [P]

Die Summe aller Fahrgastwechselzahlen einer Fahrt wird als *Gesamtfahrgastwechselzahl* bezeichnet. Sie entspricht der doppelten Fahrgastzahl:

$$(2-4) \quad F_{tot} = \sum F_i = 2 \cdot F_K$$

wobei F_{tot} Gesamtfahrgastwechselzahl [P]

- Die *Fahrgastwechselzeit* ist die Zeitdauer, während welcher sich Fahrgäste durch den Querschnitt einer Türe bewegen. Die *mittlere Fahrgastwechselzeit* ergibt sich, indem die Fahrgastwechselzeit durch die Fahrgastwechselzahl dividiert wird. Sie kann auf eine bestimmte Türe oder ein ganzes Fahrzeug bezogen werden:

$$(2-5) \quad t_{h,fm} = \frac{t_{h,f}}{F}$$

wobei $t_{h,fm}$ Mittlere Fahrgastwechselzeit an einer Haltestelle oder Türe [s/P]
 $t_{h,f}$ Fahrgastwechselzeit an einer Haltestelle oder Türe [s]

Als Standardmass lässt sich die *spezifische Fahrgastwechselzeit* als Fahrgastwechselzeit pro Person unter Berücksichtigung der Türbreite definieren:

$$(2-6) \quad t_{h,fs} = \frac{t_{h,f} \cdot \sum l_{T,bi}}{F}$$

wobei $t_{h,fs}$ Spezifische Fahrgastwechselzeit [sm/P]
 $l_{T,bi}$ Breite der Türe i [m]

Die Summe aller Fahrgastwechselzeiten einer Fahrt bildet schliesslich die *Gesamtfahrgastwechselzeit*.

Bei der *Türleistungsfähigkeit* handelt es sich um den Kehrwert der mittleren Fahrgastwechselzeit. Sie gibt die Zahl der Fahrgäste an, welche pro Sekunde ein Fahrzeug besteigen oder verlassen können. Die Türleistungsfähigkeit kann auch auf eine einzelne Türe bezogen werden:

$$(2-7) \quad L = \frac{1}{t_{h,fm}} = \frac{F}{t_{h,f}}$$

wobei L Leistungsfähigkeit des Türsystems des ganzen Kurses oder einer bestimmten Türe [P/s]

Bezieht man die Türleistungsfähigkeit auf den lichten Querschnitt der Türe, so erhält man als Standardmass die *spezifische Türleistungsfähigkeit*. Sie ist der Kehrwert der spezifischen Fahrgastwechselzeit:

$$(2-8) \quad L_s = \frac{1}{t_{h,fs}} = \frac{F}{t_{h,f} \cdot \sum l_{T,bi}}$$

wobei L_s Spezifische Türleistungsfähigkeit [P/sm]

Die Zahl der Personen, welche in einem Referenzzustand auf eine Türe entfallen, wird als *Türbelastung* bezeichnet. Der Referenzzustand kann durch die Maximalauslastung oder durch einen anderen Auslastungsgrad definiert sein.

$$(2-9) \quad Q_T = \frac{F_R}{n_{T,K}}$$

wobei Q_T Türbelastung [P/Türe]
 F_R Anzahl der Fahrgäste im Referenzzustand [P]
 $n_{T,K}$ Anzahl der Türen pro Kurs [-]

Ein besseres Mass für die Beanspruchung des Türsystems stellt analog zur spezifischen Türleistungsfähigkeit die *spezifische Türbelastung* als Zahl der Personen im Referenzzustand bezogen auf die zur Verfügung stehende Türbreite dar:

$$(2-10) \quad Q_{T,s} = \frac{F_R}{\sum I_{T,bi}}$$

wobei $Q_{T,s}$ Spezifische Türbelastung [P/m]

Mit der Referenzauslastung des Fahrzeuges und der gesamten Türleistungsfähigkeit kann die *relative Türbelastung* $Q_{T,rel}$ berechnet werden:

$$(2-11) \quad Q_{T,rel} = \frac{F_R}{L}$$

wobei $Q_{T,rel}$ Relative Türbelastung [s]

$Q_{T,rel}$ entspricht gerade der Zeit, welche zum Austausch der F_R Fahrgäste bei optimaler Türausnutzung nötig ist.

2.13.32 Betrachtungsstufen der Fahrgastwechselzeit

Bei der Berechnung der Fahrgastwechselzeit sind drei Betrachtungsstufen zu unterscheiden:

- **1. Stufe = Fahrgastwechselzeit an der einzelnen Türe:** Die Fahrgastwechselzeit an einer Einzeltüre ist wesentlich für die Berechnung der Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse. Jede der Türen ist definiert durch ihren Anteil am Fahrgastwechsel des Kurses sowie durch den Erwartungswert und die Streuung ihrer spezifischen Leistungsfähigkeit. Die Zielgrößen der Stufe 1 sind die mittlere Fahrgastwechselzeit an einer Türe und die Streuung [s/P].
- **2. Stufe = Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses:** Ein Kurs verfügt zum Austausch der Fahrgäste meist über mehrere Türen, welche in der Regel freizügig verwendet werden können. Massgebend für die Dauer des Fahrgastwechsels eines Kurses ist die am längsten geöffnete Türe, welche nicht in jedem Fall mit der statistisch meistbelasteten identisch ist. Die Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses und deren Streuung [s] bilden die Zielgrößen der Stufe 2.
- **3. Stufe = Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt:** Die Summe der Fahrgastwechselzeiten aller Halte bildet die Gesamtfahrgastwechselzeit, welche in die einfache Fahrzeit beziehungsweise in die Umlaufzeit eingeht. Als Zielgrösse der Stufe 3 wird die Kenntnis der Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt [s] angestrebt.

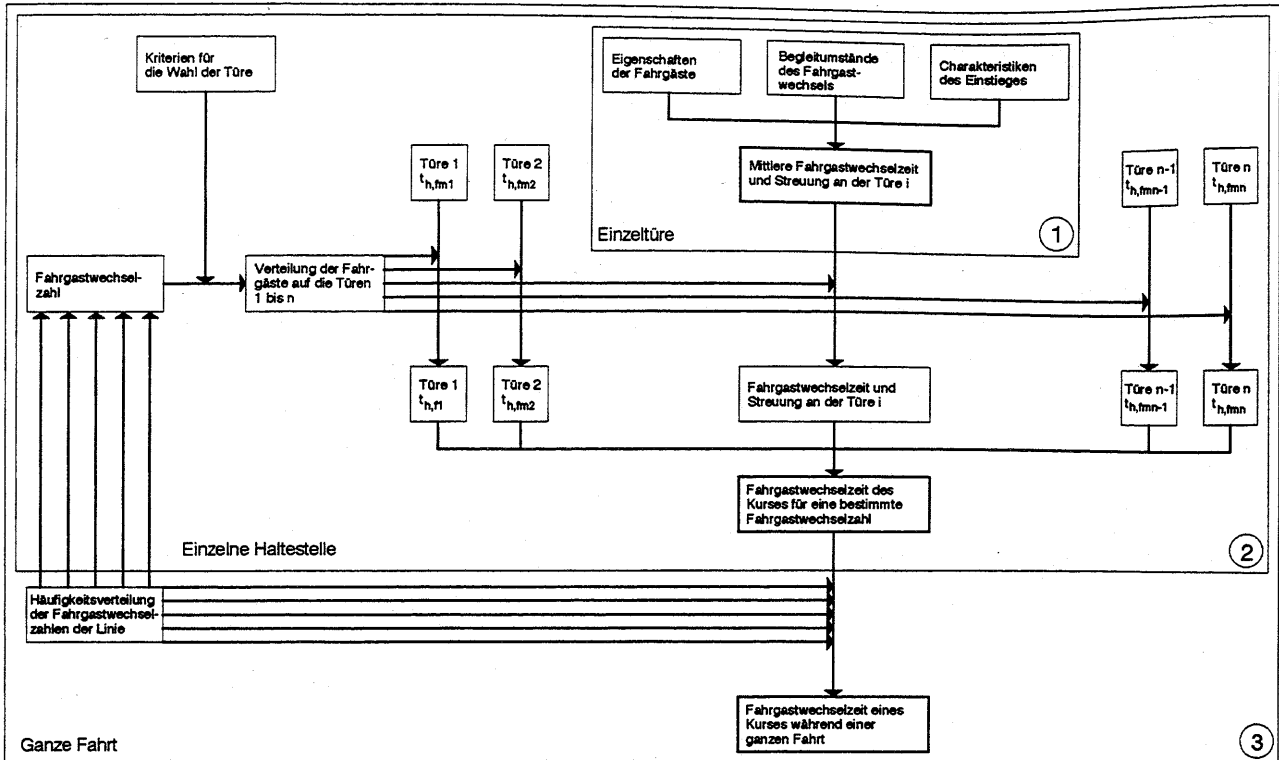


Abb. 2-5: Fahrgastwechselzeit an Einzeltür, bei ganzem Fahrzeug und während einer Fahrt.

2.2 Die Fahrgastwechselzeit an einer Einzeltüre

2.2.1 Einstieg mit geordneten Fahrgästen

2.2.1.1 Einstieg mit geordneten Fahrgästen und Richtungsverkehr

Eine Einzeltüre lässt sich in einem einfachen Modell als Engpass oder als Kurtreppe betrachten. Die Breite der Türe sei zunächst gleich derjenigen eines Fahrgastes oder einem ganzzahligen Vielfachen davon, die Fahrgäste warten aufgereiht vor der Fahrzeugtüre und können nach dem Durchqueren der Türe unbehindert abfließen. Ihre Horizontalgeschwindigkeit $v_{F,h}$ sei identisch, die Distanz untereinander betrage $l_{F,d}$ und jede Zeitlücke werde ausgenutzt. Die einzige Kapazitätsrestriktion verursacht der Türdurchgang mit seiner Leistungsfähigkeit L_T .

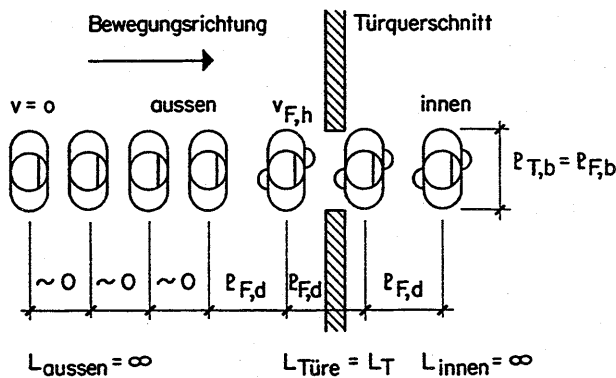


Abb. 2-6: Einfachstes Modell des Fahrgastwechsels: Die Fahrgäste warten aufgereiht vor der Türe und die Türbreite entspricht der Fahrgastbreite, welche für alle Fahrgäste identisch ist.

Damit benötigen F Personen zum Durchschreiten des Türquerschnittes die Zeit $t_{h,f}$:

$$(2-12) \quad t_{h,f} = \frac{l_{F,d}}{v_{F,h} \cdot n_S} \cdot F = \frac{F}{L_T}$$

wobei	L_T	Leistungsfähigkeit der Türe [P/s]
	n_S	Zahl der Türspuren [-]
	$v_{F,h}$	Horizontalgeschwindigkeit der Fahrgäste [m/s]
	$l_{F,d}$	Horizontaldistanz zwischen den Fahrgästen [m/P]

Die Leistungsfähigkeit errechnet sich folgendermassen:

$$(2-13) \quad L_T = n_S \cdot \frac{v_{F,h}}{l_{F,d}}$$

2.21.2 Einstieg mit geordneten Fahrgästen und Gegenverkehr

Bei Gegenverkehr an derselben Türe ändert sich gegenüber dem Fall des Richtungsverkehrs grundsätzlich nichts. Steht nur eine Spur zur Verfügung, so verlaufen die beiden Prozesse nacheinander. Andernfalls kann das Ein- und Aussteigen gleichzeitig erfolgen.

2.22 Einstieg mit ungeordneten Fahrgästen und Richtungsverkehr

2.22.1 Überblick

Das einfache Modell weicht wesentlich von der Realität ab:

- Die Türbreite ist nicht identisch mit der Breite der Fahrgäste oder einem ganzzahligen Vielfachen.
- Die Breite der Fahrgäste variiert.
- Die Fahrgäste sind im Warteraum unstrukturiert verteilt.
- Im Fahrzeuginnern und gelegentlich auch auf dem Perron treten Rückstauerscheinungen auf.
- Die Fahrgäste sind nicht gleich schnell.
- Es werden nicht alle Zeilücken ausgenützt.

Die Beschreibung muss deshalb erweitert werden, wobei folgende Fälle zu unterscheiden sind:

- Durchgang ohne Kapazitätsrestriktionen im Zu- oder Nachlauf
- Durchgang mit Kapazitätsrestriktion im Zulauf zum Türquerschnitt
- Durchgang mit Kapazitätsrestriktion im Nachlauf des Türquerschnittes
- Durchgang mit Kapazitätsrestriktionen im Zu- und Nachlauf des Türquerschnittes

Die Kapazitätsrestriktionen umfassen sämtliche Einflüsse, welche limitierend auf die Leistungsfähigkeit des Einstiegssystems wirken. Sie können durch die Anlagen hervorgerufen werden oder dadurch, dass eine zur Verfügung stehende Kapazität systematisch nicht ausgeschöpft wird. In

der Regel erfährt der Einsteigevorgang eine Kapazitätsrestriktion im Zulauf, da sich die Fahrgäste zuerst zur Türe bewegen müssen. Im Zulauf des Aussteigevorganges versammeln sich die Fahrgäste meist schon vor dem Halt um die Türe, sodass die Leistungsfähigkeit hier besser ausgeschöpft wird. Die Behinderung des Nachlaufes im Fahrzeug und teilweise auf dem Perron ist abhängig von den Platzverhältnissen. Bei einem ungünstigen Verhältnis von Abflusskapazität und Türkapazität kann auch bei kleiner Auslastung des Fahrzeuges eine Behinderung des Einsteigevorganges durch Rückstau auftreten. Die Kapazitätsrestriktionen des Aussteigevorganges sind kleiner als beim Einstieg und eine Nachlaufbehinderung entsteht nur bei sehr grosser Fahrgastdichte auf dem Perron.

2.22.2 Einstieg ohne äussere Kapazitätsrestriktionen

Ein allgemeiner Einstieg ohne äussere Kapazitätsrestriktion unterscheidet sich vom einfachen Modell grundsätzlich nur dadurch, dass die Breite des Durchganges nicht einem ganzzahligen Vielfachen der Fahrgastbreite entspricht.

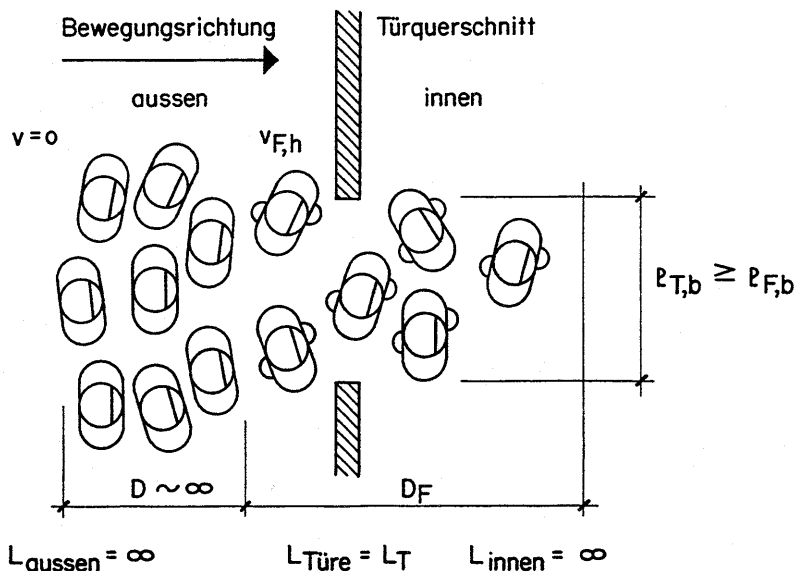


Abb. 2-7: Fahrgäste warten ungeordnet, aber in nächster Nähe des Einstieges und letzterer weist eine grössere Breite auf als die Fahrgäste.

Bei einer Fahrgastwechselzahl F errechnet sich die Fahrgastwechselzeit auch hier zu:

$$(2-14) \quad t_{h,f} = \frac{F}{L_T}$$

An die Stelle des Horizontalabstandes $l_{F,d}$ zwischen den Fahrgästen tritt aber bei der Berechnung der Einstiegsleistungsfähigkeit die Dichte D_F des Fahrgaststromes und an die Stelle der Zahl der Türspuren die lichte Türbreite $l_{T,b}$:

$$(2-15) \quad L_T = D_F \cdot v_{F,h} \cdot l_{T,b}$$

wobei D_F Dichte des Fahrgaststromes [P/m^2]
 $l_{T,b}$ Türbreite [m]

Das Produkt von Dichte und Geschwindigkeit ergibt die spezifische Leistungsfähigkeit:

$$(2-16) \quad L_s = D_F \cdot v_{F,h}$$

wobei L_s Spezifische Leistungsfähigkeit der Türe [P/ms]

Die Türleistungsfähigkeit beträgt ausgedrückt mit dieser spezifischen Leistungsfähigkeit:

$$(2-17) \quad L_T = L_s \cdot l_{T,b}$$

2.22.3 Einstieg mit Kapazitätsrestriktion im Zulauf

2.22.31 Zuströmfunktionen zur Türe

Die Fahrgäste verteilen sich mit der Fahrgastdichte $D_{F,W}$ auf der Wartefläche. Die Warteraumfläche wird begrenzt durch Gebäudeteile oder die Fahrzeugwände, Einrichtungs- und Ausstattungsgegenstände sowie durch die Grenze zum Einzugsgebiet benachbarter Türen.

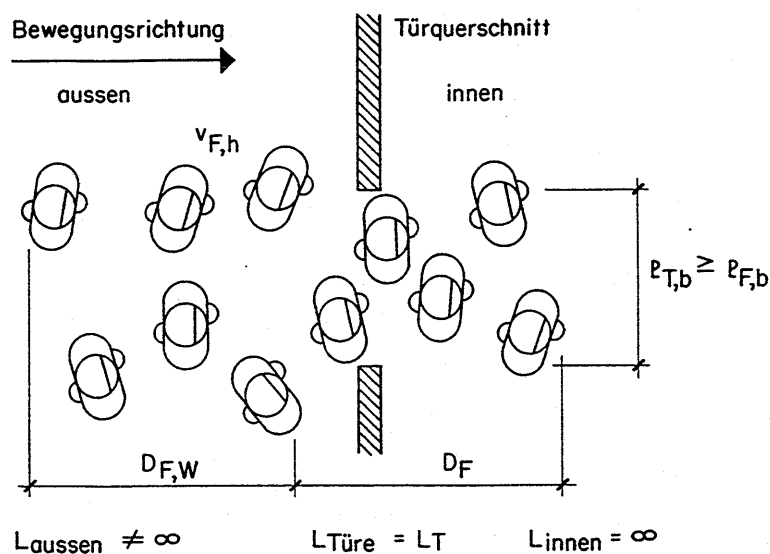


Abb. 2-8: Fahrgäste warten mit einer bestimmten Dichteverteilung auf einer Wartefläche und müssen sich zuerst zur Türe bewegen.

Bis zur Einstiegstüre müssen die Fahrgäste einen Weg l_r zurücklegen:

$$(2-18) \quad l_r = \sqrt{l_x^2 + l_y^2}$$

wobei l_r Zugangsweite eines Fahrgastes zur Einstiegstüre [m]
 l_x Abstand des Fahrgastes von der Türachse [m]
 l_y Abstand des Fahrgastes von der Fahrzeugwand [m]

Diese Distanz überwindet der Fahrgast in der Zeit t_z :

$$(2-19) \quad t_z = \frac{l_r}{v_{F,h}}$$

wobei t_z Zuströmzeit; Gehzeit eines Fahrgastes zur Fahrzeugtüre [s]

Sind die Fahrgastgeschwindigkeiten identisch, so lassen sich die näherungsweise halbkreisförmigen Isochronen der Zeit $t_{z,i}$ berechnen, innerhalb derer die Fahrgäste zur Türe gelangen. Für die Zahl der Fahrgäste in einem bestimmten Distanzbereich $l_{r,i}$ bis $l_{r,k}$ gilt:

$$(2-20) \quad F_{r,i,k} = \int_{l_{r,i}}^{l_{r,k}} \int_{\phi_1}^{\phi_2} D_{F,W}(l_r, \phi) \cdot l_r d\phi dl_r$$

wobei $F_{r,i,k}$ Zahl der Fahrgäste im Abstand $l_{r,i}$ bis $l_{r,k}$ von der Türe [P]
 $l_{r,i}, l_{r,k}$ Entfernungen von der Türe [m]
 ϕ Öffnungswinkel des Einzugsgebietes [-]
 $D_{F,W}$ Fahrgastdichte im Warteraum in Funktion des Abstandes l_r von der Türe und des Winkels ϕ [P/m²]

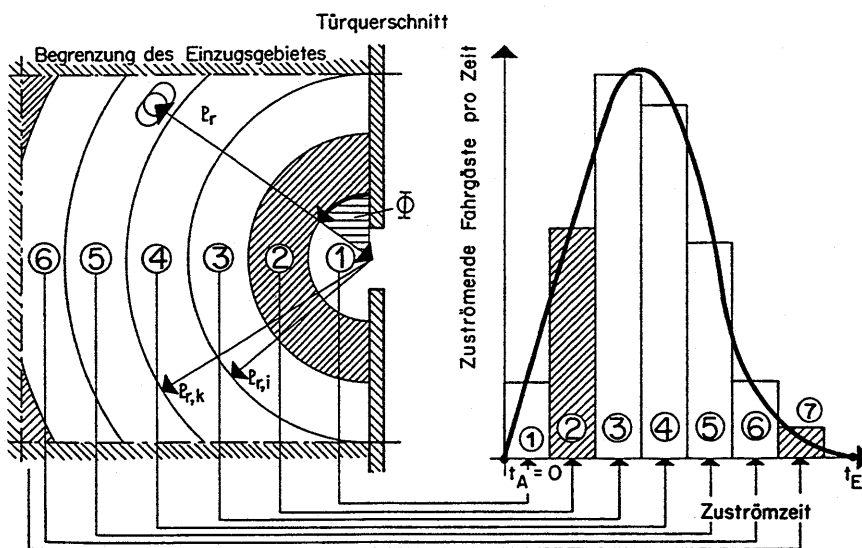


Abb. 2-9: Links: Isochronen und Begrenzung des Einzugsgebietes einer Fahrzeugtüre; Definition der Grössen. Rechts: Verlauf des Zustromes der Fahrgäste zu einer Türe bei Gleichverteilung der Fahrgäste und identischer Horizontalgeschwindigkeit.

Die Form des Warteraumes und die Verteilung der Fahrgäste ist stark variabel, sowohl in Funktion des Abstandes l_r als auch des Öffnungswinkels ϕ . Es wird im folgenden von einem halbkreisförmigen Warteraum mit $\phi = 180^\circ = \pi$ ausgegangen. Etwas detaillierter sollen die Fälle der gleichmässigen sowie der linear mit l_r abnehmenden Fahrgastdichte betrachtet werden. Bei konstanter Fahrgastdichte im Warteraum ist sie $D_{F,W}$ für jedes l_r . Nimmt sie von der Türe bis zu einem Grenzdiameter $l_{r,g}$ linear auf Null ab, so beträgt sie im Abstand l_r noch:

$$(2-21) \quad D_{F,W}(l_r) = D_{F,Wmax} \cdot \left(1 - \frac{l_r}{l_{r,g}}\right)$$

wobei $D_{F,Wmax}$ Maximale Fahrgastdichte im Warteraum [P/m²]
 $l_{r,g}$ Grenzradius, ausserhalb dessen keine Fahrgäste warten [m]

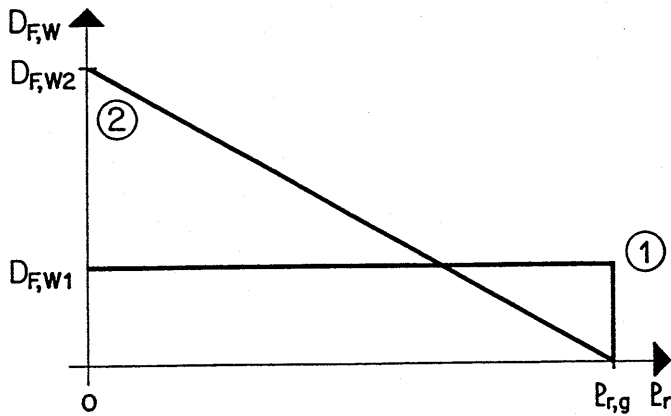


Abb. 2-10: Beispielhaft untersuchte Fahrgastdichten im Warteraum in Funktion des Abstandes zur Türachse bei insgesamt gleicher Fahrgastwechselzahl.

Ist die Verteilung der Fahrgäste bezüglich ϕ konstant und ist ϕ voraussetzungsgemäss gleich π , so errechnet sich die Zahl der Fahrgäste im Abstand l_r allgemein zu:

$$(2-22) \quad f(l_r) = \pi \cdot l_r \cdot D_{F,W}(l_r) \cdot dl_r$$

wobei $f(l_r)$ Zahl der Fahrgäste im Abstand l_r von der Türe [P/m]

Bei gleichmässiger Dichte $D_{F,W}$ beträgt die Zahl der Fahrgäste zwischen den Isochronen $l_{r,i}$ und $l_{r,k}$:

$$(2-23) \quad F_{r,i,k} = \pi \cdot \int_{l_{r,i}}^{l_{r,k}} D_{F,W} \cdot l_r \, dl_r = \frac{\pi}{2} \cdot D_{F,W} \cdot (l_{r,k}^2 - l_{r,i}^2)$$

Nimmt die Fahrgastdichte mit zunehmendem Abstand linear ab, so ergibt sich die Zahl der Fahrgäste zwischen den Abständen $l_{r,i}$ und $l_{r,k}$ zu:

$$(2-24) \quad F_{r,i,k} = \pi \cdot \int_{l_{r,i}}^{l_{r,k}} D_{F,max} \cdot \left(1 - \frac{l_r}{l_{r,g}}\right) \cdot l_r \, dl_r = \frac{\pi}{6} \cdot D_{F,max} \cdot (l_{r,k}^2 - l_{r,i}^2)$$

Bei identischer Zuströmgeschwindigkeit leitet sich direkt die Zahl der in einem Zeitintervall dt im Abstand t von der Türe wartenden Fahrgäste ab:

$$(2-25) \quad F(t) = \pi \cdot v_{F,h}^2 \cdot D_{F,W}(t) \cdot t \, dt$$

wobei $F(t)$ Zahl der in einem Zeitintervall dt im Abstand t wartenden Fahrgäste [P/s]

Die Zuströmfunktion $f(t)$ ist die Ableitung von $F(t)$ nach der Zeit:

$$(2-26) \quad f(t) = \frac{F(t)}{dt} = \pi \cdot v_{F,h}^2 \cdot D_{F,W}(t) \cdot t$$

wobei $f(t)$ Fahrgastzuströmfunktion zur Türe [P/s]

Der Zustrom endet, wenn das Einzugsgebiet der Türe zum Grenzzeitpunkt t_g erschöpft ist. Für gleichmässig verteilte Fahrgäste lautet die Zuströmfunktion:

$$(2-27) \quad f(t) = \pi \cdot D_{F,W} \cdot v_{F,h}^2 \cdot t$$

Nimmt die Fahrgastdichte linear ab, so wird die Zuströmfunktion $f(t)$ zu:

$$(2-28) \quad f(t) = \frac{\pi \cdot D_{F,max}}{l_{r,g}} \cdot (v_{F,h}^2 \cdot l_{r,g} \cdot t - v_{F,h}^3 \cdot t^2) = \frac{\pi \cdot v_{F,h}^2 \cdot D_{F,max}}{t_g} \cdot (t_g \cdot t - t^2)$$

wobei t_g Grenzzeit; Zeitpunkt, zu welchem der entfernteste Fahrgast bei der Türe eintrifft [s]

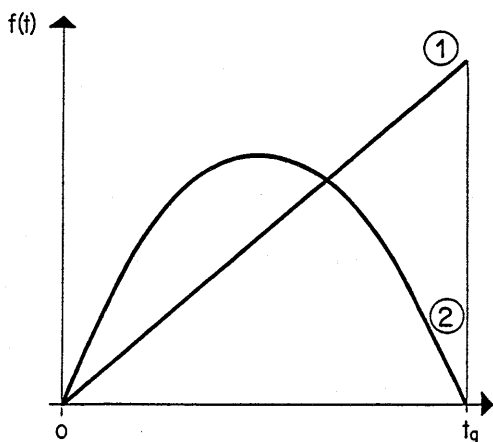


Abb. 2-11: Zuströmfunktionen bei gleichmässiger (1) und linear abnehmender (2) Fahrgastverteilung im Warteraum bei insgesamt gleicher Fahrgastwechselzahl.

2.22.32 Fahrgastwechselzahl

Die Zahl der insgesamt zuströmenden Fahrgäste F ist gleich dem Integral über die Zuströmfunktion:

$$(2-29) \quad F = \int_{t_A}^{t_E} f(t) dt$$

wobei t_A Anfangszeitpunkt des Fahrgastzustromes [s]
 t_E Endzeitpunkt des Fahrgastzustromes [s]

Der Anfang des Fahrgastzustromes ist mit dem Zeitpunkt $t = 0$ bestimmt. Das Ende $t_E = t_g$ ergibt sich durch den letzten Fahrgast, welcher bei der Türe eintrifft und welcher definitionsgemäss in einer Distanz $l_{r,g}$ zur Türe gewartet hat. Bei gleichmässiger Fahrgastdichte im Warteraum ist F :

$$(2-30) \quad F = \frac{\pi}{2} \cdot D_{F,W} \cdot v_{F,h}^2 \cdot t_g^2$$

Bei linearer Abnahme beträgt F entsprechend:

$$(2-31) \quad F = \frac{\pi}{6} \cdot D_{F,max} \cdot v_{F,h}^2 \cdot t_g^2$$

Fall	Verteilung der Fahrgäste		Verteilungsfunktion $D_{F,W}(l_r/\Phi)$	Zuströmfunktion $f(t)$		Fahrgastwechselzahl F
	in Funktion l_r	in Funktion Φ		analytisch	graphisch	
1		wie 5 bis 7	$D_{F,1} = \text{const.}$	$\pi \cdot D_{F,1} \cdot v_{F,h}^2 \cdot t$		$\frac{\pi}{2} \cdot D_{F,1} \cdot v_{F,h}^2 \cdot t_g^2$
2		wie 5 bis 7	$D_{F,2} \cdot \left(1 - \frac{l_r}{l_{r,g}}\right)$	$\frac{\pi \cdot D_{F,2} \cdot v_{F,h}^2}{t_g} \cdot (t_g \cdot t - t^2)$		$\frac{\pi}{6} \cdot D_{F,2} \cdot v_{F,h}^2 \cdot t_g^2$
3		wie 5 bis 7	$D_{F,3} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{l_{r,g}} \cdot l_r\right)$	$\pi \cdot v_{F,h}^2 \cdot D_{F,3} \cdot t \cdot \sin\left(\frac{\pi}{t_g} \cdot t\right)$		$D_{F,3} \cdot v_{F,h}^2 \cdot t_g^2$
4		wie 5 bis 7	$D_{F,4} \cdot \frac{l_r}{l_{r,g}}$	$\pi \cdot v_{F,h}^2 \cdot D_{F,4} \cdot \frac{t^2}{t_g}$		$\frac{\pi}{3} \cdot D_{F,4} \cdot v_{F,h}^2 \cdot t_g^2$
5	wie 1 bis 4		$D' = \text{const.}$	—	—	Faktor 1,00
6	wie 1 bis 4		$D'(\Phi) = \frac{2 \cdot D'}{\pi} \cdot \Phi$	—	—	Faktor 0,50
7	wie 1 bis 4		$D'(\Phi) = D' \cdot \sin \Phi$	—	—	Faktor 0,64

Abb. 2-12: Überblick über ausgewählte Fahrgastverteilungen, die zugehörigen Zuströmfunktionen und die Fahrgastwechselzahlen. Durch eine zweckmässige Kombination der Fälle 1 bis 4 mit den Fällen 5 bis 7 lassen sich verschiedenartige Fahrgastverteilungen approximieren.

Da die wenigsten Fahrgäste abzuschätzen vermögen, wo die Türen eines einfahrenden Kurses zum Stehen kommen, setzen sie sich erst mit dessen Anhalteruck in Bewegung. Zudem wahren die Fahrgäste häufig einen Sicherheitsabstand von der Perronkante und damit vom Fahrzeug (Verteilungen 3 oder 4, kombiniert mit 6 oder 7). Diese Fahrgäste müssen zunächst eine Wegstrecke zur gewählten Türe zurücklegen, wofür sie eine bestimmte Zeit benötigen. Die Zuströmfunktionen zeigen, dass dadurch eine Verzögerung des Einsteigevorganges auftritt, sofern nicht vorgängig der Standort der Türe angezeigt wird (Verteilungen 1, 3 oder 4).

2.22.33 Ablauf des Fahrgastwechselforganges und Ausschöpfungsgrad

Dem Fahrgastzustrom steht die Türleistungsfähigkeit zur Verfügung. Ist der Fahrgastzustrom genau gleich gross wie die Türleistungsfähigkeit, so wird diese voll ausgeschöpft und es entstehen keine Wartezeiten. In der Regel wird allerdings der Zustrom entweder kleiner oder grösser sein. Übersteigt der Zustrom die Verarbeitungskapazität der Türe, so ist diese zwar voll ausgenützt, die Türe aber überlastet und es tritt ein Rückstau auf. Ist der Zustrom jederzeit kleiner als die Türleistungsfähigkeit, so wird letztere nie ausgeschöpft.

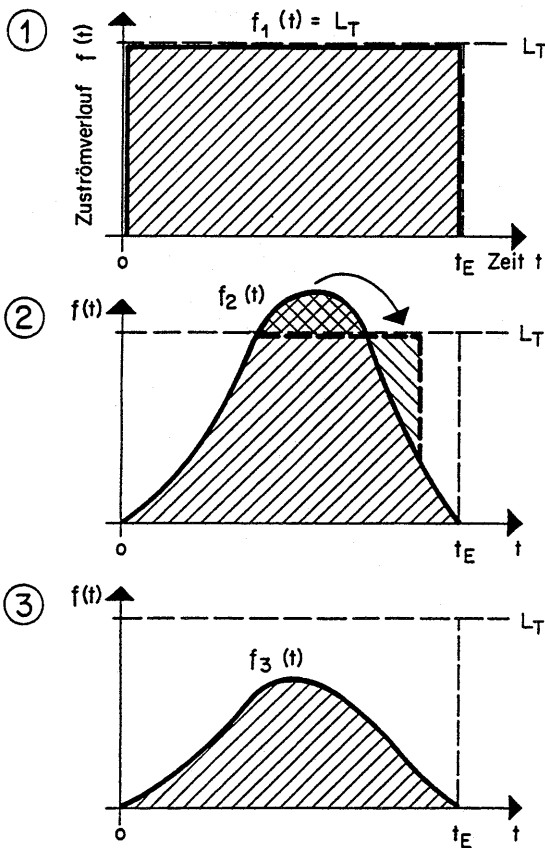


Abb. 2-13: Zuflussverlauf und Leistungsfähigkeit der Türe. Fall 1: Der Zustrom ist konstant und identisch mit der Leistungsfähigkeit der Türe. Fall 2: Der Zustrom ist zeitweise grösser und zeitweise kleiner als die Leistungsfähigkeit der Türe; es entsteht ein Rückstau. Fall 3: Der Zustrom überschreitet die Leistungsfähigkeit der Türe nie. Entgegen der obigen Darstellung kann es im Fall 2 bei sehr starkem Andrang zur Verkeilung der Fahrgäste vor der Fahrzeugtüre kommen, wodurch die Leistungsfähigkeit des Durchganges abgemindert wird.

Solange der Zustrom bei starkem Andrang grösser ist als der Abfluss, wächst die Zahl der vor der Türe wartenden Fahrgäste an. Liegt der Zustrom wieder unter der Leistungsfähigkeit der Türe, so wird die Warteschlange abgebaut. Für das Ende des Fahrgastwechsels wird nun entweder der Zustrom der Fahrgäste oder der Abbau der Warteschlange massgebend. Der Fahrgastzustrom ist massgebend, wenn der Rückstau abgebaut ist, bevor der letzte Fahrgast bei der Türe eintrifft. Ist die Warteschlange sehr gross, so endet der Fahrgastzustrom, bevor der Fahrgastwechsel abgeschlossen ist.

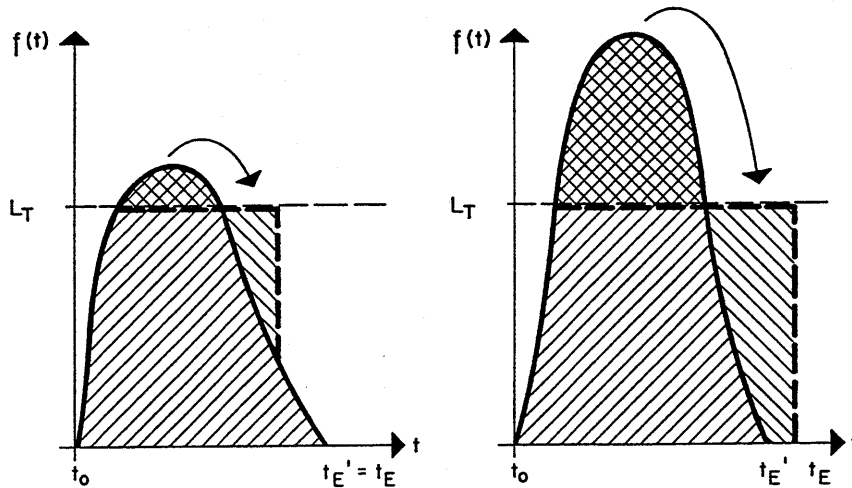


Abb. 2-14: Fahrzeugeinstieg mit Rückstau. Links: Fahrgastzustrom ist massgebend für Ende des Fahrgastwechsels; kleiner Fahrgastrückstau. Rechts: Rückstau ist massgebend für Ende des Fahrgastwechsels; grosser Fahrgastrückstau.

Der maximale Rückstau wird in jenem Moment erreicht, in welchem der Fahrgastzustrom die Türleistungsfähigkeit wieder unterschreitet.

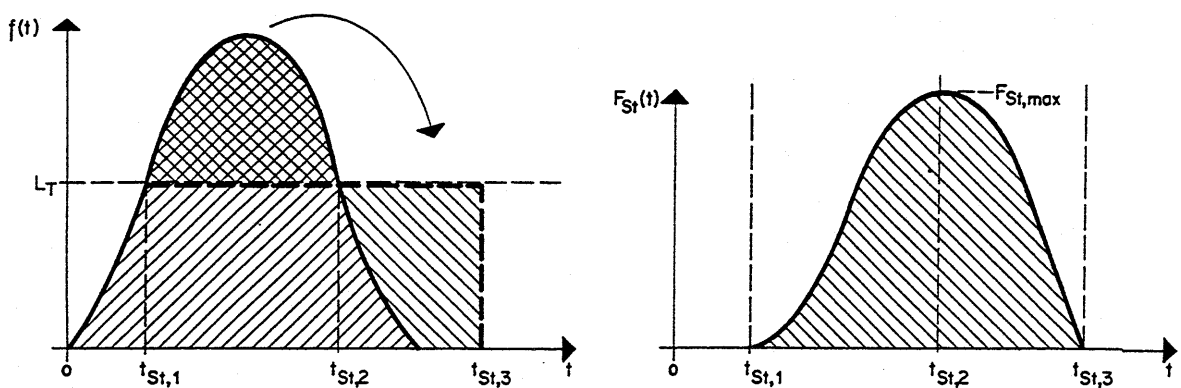


Abb. 2-15: Rückstau an der Türe und maximale Grösse des Rückstaus.

Die maximale Grösse des Rückstaus lässt sich folgendermassen ermitteln:

$$(2-32) \quad F_{St,max} = \int_{t_{St,1}}^{t_{St,2}} f(t) dt - L_T \cdot (t_{St,2} - t_{St,1})$$

wobei $F_{St,max}$ Maximaler Fahrgastrückstau [P]
 $t_{St,1}$ Zeitpunkt des Beginns des Fahrgastrückstaus [s]
 $t_{St,2}$ Zeitpunkt, in welchem das Maximum des Rückstaus erreicht ist beziehungsweise Zeitpunkt, ab welchem der Zustrom kleiner wird als die Türleistungsfähigkeit [s]

Aus der Gegenüberstellung von Fahrgastzustrom und theoretisch verarbeitbarer Fahrgastmenge errechnet sich der Ausschöpfungsgrad $q_{L,T}$:

$$(2-33) \quad q_{L,T} = \frac{F}{L \cdot (t_E - t_A)} = \frac{\int_{t_A}^{t_E} f(t) dt}{L \cdot (t_E - t_A)}$$

wobei $q_{L,T}$ Ausschöpfungsgrad der Türleistungsfähigkeit mit $0 \leq q_{L,T} \leq 1$ [-]

Der Ausschöpfungsgrad ist am grössten, wenn der Rückstau vor dem Einstieg das Ende des Fahrgastwechsels bestimmt. In diesem Fall ist die Türleistungsfähigkeit bis zum Abschluss des Fahrgastwechselvorganges voll ausgenutzt. Lediglich im Anlauf des Fahrgastwechselvorganges geht ein kleiner Teil der Leistungsfähigkeit verloren.

2.22.4 Einstieg mit Kapazitätsrestriktion im Nachlauf

Der entgegengesetzte Fall von Abschnitt 2.22.3 tritt auf, wenn im Zulauf keine Kapazitätsrestriktion besteht, der Nachlauf aber behindert wird.

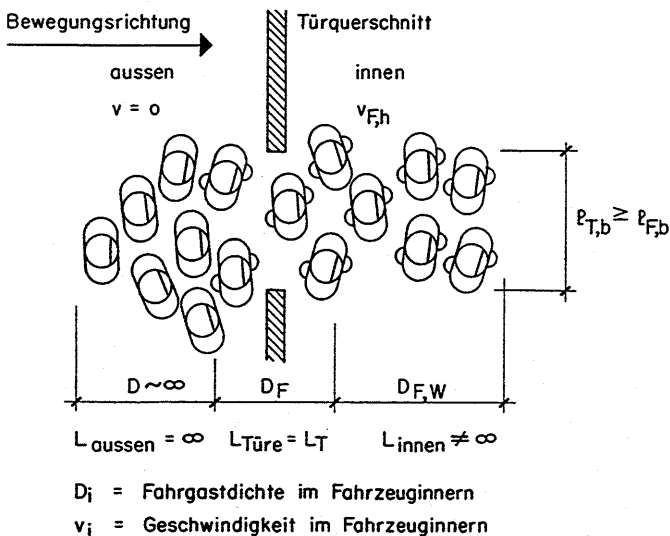


Abb. 2-16: Einsteigevorgang mit unbeschränkter Kapazität im Zulauf und beschränk-variabler Kapazität im Nachlauf.

Dem Fahrgastweiterfluss dienen die Fahrzeuggänge oder die Treppen in andere Fahrzeuggeschosse. Wird die Nachlaufkapazität allein durch die Leistungsfähigkeit L_V dieser Anlagenteile bestimmt, so ist die dadurch verursachte Kapazitätsbeschränkung während des Fahrgastwechsellvorganges konstant. Die gesamte Leistungsfähigkeit der Verbindungselemente ist dann gleich der Summe der Einzelleistungsfähigkeiten $L_{V,i}$. Analog zu den Fahrzeugeinstiegen lassen sich letztere mittels ihrer Breiten und ihrer spezifischen Leistungsfähigkeit errechnen:

$$(2-34) \quad L_V = \sum L_{s,i} \cdot l_{V,bi}$$

wobei L_V Leistungsfähigkeit aller Verbindungselemente vom Türraum zu den Aufenthaltsbereichen im Fahrzeug [P/s]
 $L_{s,i}$ Spezifische Leistungsfähigkeit des Verbindungselementes i [P/sm]
 $l_{V,bi}$ Nutzbare Breite des Verbindungselementes i [m]

Bei Fahrzeugen mit Funktionsmischung der Stehplatzbereiche als Durchgangs- und Stauräume werden im Gegensatz dazu die dem Abfluss der Fahrgäste dienenden Flächen mit fortschreitendem Einsteigevorgang zunehmend von stehenden Fahrgästen beansprucht, sodass die Zirkulation im Fahrzeuginnern behindert und die Nachlaufkapazität herabgesetzt wird. Die Kapazitätsbeschränkung im Nachlauf ist dann abhängig vom momentanen Besetzungsgrad des Fahrzeuges. Sie steigt während des Einsteigevorganges an beziehungsweise sinkt während des Aussteigevorganges ab.

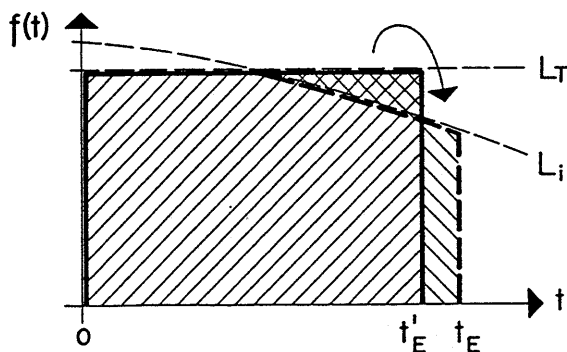


Abb. 2-17: Gegenüberstellung von Türleistungsfähigkeit und Leistungsfähigkeit des Nachlaufes L_i bei beschränkter und abnehmender Nachlaufkapazität, Rückstau.

2.22.5 Einstieg mit Kapazitätsrestriktion im Zu- und Nachlauf

Sind weder Zu- noch Nachlauf in ihrer Kapazität unbegrenzt, so tritt eine Kombination der beiden erwähnten Fälle mit dreifacher Restriktion der Leistungsfähigkeit des Systems durch Zulaufkapazität, Türkapazität und Nachlaufkapazität auf.

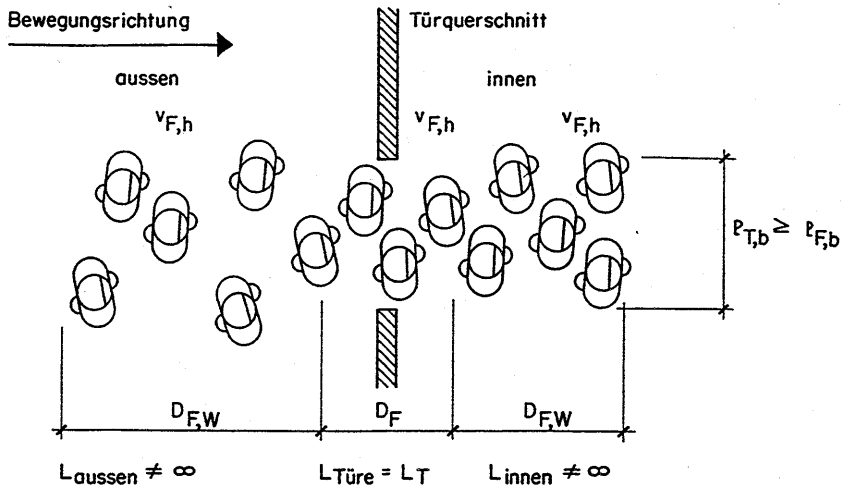


Abb. 2-18: Einsteigevorgang mit beschränkter Kapazität gemäss Zuströmfunktion im Zulauf und beschränkt-variabler Kapazität im Nachlauf.

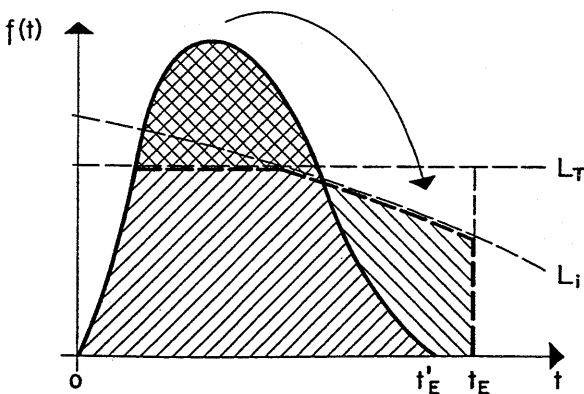


Abb. 2-19: Gegenüberstellung von Zulaufkapazität, Türleistungsfähigkeit und Leistungsfähigkeit des Nachlaufes bei beschränkter Zulaufkapazität und abnehmender Nachlaufkapazität; Rückstau.

Die restriktivste der drei Bedingungen bestimmt die Leistungsfähigkeit des Systems. So verläuft im Nahverkehr das Aussteigen dank breiter Türen schnell und ist abgeschlossen, bevor sich allzu viele Einsteiger um die Türe versammelt und die Nachlaufkapazität auf dem Perron massgeblich herabgesetzt haben. Im Fernverkehr benötigt der Aussteigevorgang wegen enger Türen und der Behinderung der Fahrgäste durch Gepäck mehr Zeit, sodass sich die Einsteiger um die Türe gruppieren können und die Aussteiger behindern. Da die Gänge im Fernverkehr in der Regel nicht als Stehplatzflächen verwendet werden, ist dagegen die Nachlaufkapazität, im Gegensatz zum Nahverkehr, meist nicht eingeschränkt und das Einsteigen läuft zügig ab. Bei sehr grossem Fahrgastwechsel und hohem Gepäckanteil entsteht indessen auch hier ein Rückstau durch Fahrgäste, indem diese beim Bezug ihrer Sitzplätze den Gang versperren.

2.23 Einstieg mit ungeordneten Fahrgästen und Gegenverkehr

2.23.1 Einstieg mit Kapazitätsrestriktion im Zulauf

Treten an einem Fahrzeugeinstieg die Fahrgastströme in beiden Richtungen gleichzeitig auf, so lässt sich die Vielfalt der möglichen Ablaufformen folgendermassen eingrenzen:

- Grenzfall 1:** Der Fahrgastwechsel erfolgt gleichzeitig in beiden Richtungen (parallel). Die Flächen und der Türquerschnitt müssen auf die beiden Bewegungsrichtungen aufgeteilt werden. Entsprechend der für beide Vorgänge reduzierten Kapazität erstreckt sich deren Abschluss gegenüber dem Richtungsverkehr.

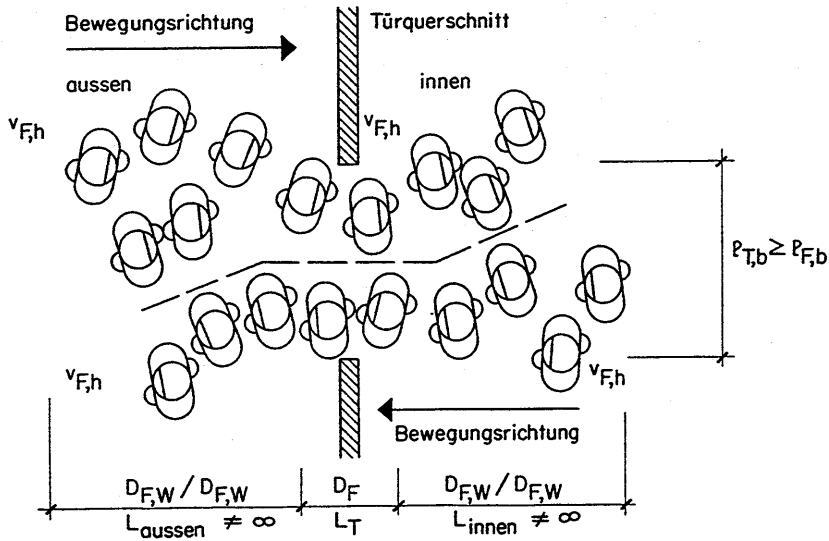


Abb. 2-20: Fahrzeugeinstieg mit Gegenverkehr bei gleichzeitigem Verlauf des Fahrgastwechsels in beiden Richtungen.

- Grenzfall 2:** Der Fahrgastwechsel verläuft für die beiden Richtungen getrennt beziehungsweise nacheinander (seriell). In diesem Fall dient beiden Richtungen je die volle Türleistungsfähigkeit, doch setzt der zweite Fahrgastwechsellvorgang erst ein, wenn der erste vollständig abgeschlossen ist. Der Zeitaufwand für den gesamten Fahrgastwechsel entspricht der Summe der beiden Einzelvorgänge an der gleichen Türe.

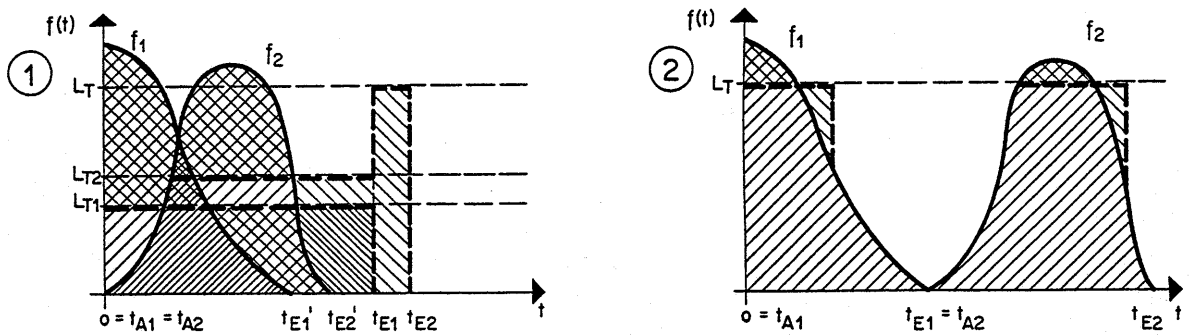


Abb. 2-21: Fahrgastwechsel mit Gegenverkehr und beschränkter Kapazität im Zulauf. Fall 1: Gleichzeitiger Ablauf von Einsteigen und Aussteigen; parallel. Fall 2: Getrennter Ablauf von Einsteigen und Aussteigen; seriell.

2.23.2 Einstieg mit Kapazitätsrestriktion im Zu- und Nachlauf

Bei Gegenverkehr können gegenseitige Behinderungen der Ein- und Aussteigerströme auftreten, welche sich in ihrer Art je nach Grenzfall unterscheiden. Läuft der Fahrgastwechsel gemäss Grenzfall 1 gleichzeitig ab, so werden beide Ströme solange behindert, als nicht einer der beiden Vorgänge abgeschlossen ist. Beim Einsteigevorgang überlagern sich dabei die Behinderungen durch den Gegenverkehr und die Rückstauerscheinungen durch die Einsteiger. Im Grenzfall 2 wird der Aussteigevorgang - welcher in der Regel als erster abläuft - durch die wartenden Einsteiger konstant behindert. Die Einsteiger hingegen betreten ein leeres Fahrzeug und erst die Rückstauerscheinungen führen zu einer Verzögerung.

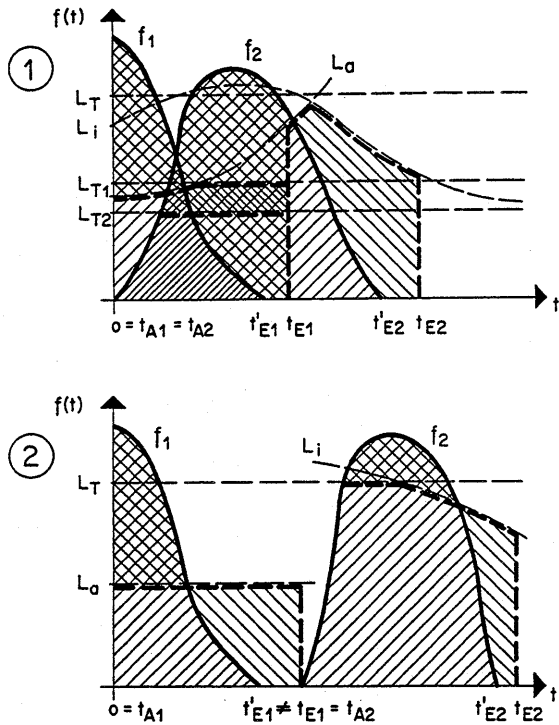


Abb. 2-22: Modell für den Fahrgastwechsel mit Gegenverkehr und beschränkter Kapazität im Zu- und Nachlauf. Fall 1: Gleichzeitiger Ablauf von Einsteigen und Aussteigen; parallel. Fall 2: Getrennter Ablauf von Einsteigen und Aussteigen; seriell. Im Fall 2 verläuft die Einsteigerkurve steiler, da die Fahrgäste genügend Zeit haben, um sich während des Aussteigevorganges um die Türe zu gruppieren.

2.24 Streuungen

2.24.1 Die Fahrgastwechselzeit als Zufallsvariable

Selbst bei gegebenen Fahrgastwechselzahlen und Einstiegsverhältnissen führen der unterschiedliche Zustrom zur Türe, damit verbunden der Ausschöpfungsgrad des Türsystems und die Unterschiede in der Zusammensetzung der Fahrgastgruppen zur Streuung der spezifischen Fahrgastwechselzeit. Letztere und die daraus abgeleiteten Grössen sind damit keine Konstanten, sondern Zufallsvariablen und die Angabe eines Mittelwertes ist für die weiteren Überlegungen unzureichend. Die Zufallsvariable $T_{h,fs}$ der spezifischen Fahrgastwechselzeit kennzeichnet sich primär durch einen Erwartungswert $t_{h,fs}$, eine Standardabweichung $\sigma_{h,fs}$, eine Verteilungsfunktion $P(\tau)$ und eine Dichte $p(x)$. Es gilt allgemein:

$$(2-35) \quad P(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} p(x) dx$$

wobei τ Bestimmter Wert der spezifischen Fahrgastwechselzeit [sm/P]
 $P(\tau)$ Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen $T_{h,fs}$
 $p(x)$ Dichte der Zufallsvariablen $T_{h,fs}$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert innerhalb der Grenzen τ_1 und τ_2 liegt, beträgt:

$$(2-36) \quad P[\tau_1 < T_{h,fs} < \tau_2] = P(\tau_2) - P(\tau_1) = \int_{\tau_1}^{\tau_2} p(x) dx$$

Der Erwartungswert schliesslich lautet:

$$(2-37) \quad E[T_{h,fs}] = t_{h,fs} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot p(x) dx$$

2.24.2 Ausgewählte symmetrische und asymmetrische Verteilungen

Ist die in der Praxis beobachtete Verteilung der spezifischen Fahrgastwechselzeiten symmetrisch, so kann sie mit der Normalverteilung beschrieben werden. Deren Dichte beträgt:

$$(2-38) \quad p(\tau) = \frac{1}{\sigma_{h,fs} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\alpha}$$

$$(2-39) \quad \alpha = -\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\tau - t_{h,fs}}{\sigma_{h,fs}} \right)^2$$

wobei $t_{h,fs}$ Erwartungswert der spezifischen Fahrgastwechselzeit [sm/P]
 $\sigma_{h,fs}$ Standardabweichung der spezifischen Fahrgastwechselzeit [sm/P]

Für eine symmetrische Verteilung der Fahrgastwechselzeit spricht die Vielzahl der Faktoren, welche unabhängig voneinander auf den Fahrgastwechsel einwirken. Zu erwarten ist allerdings eher eine schiefe Wahrscheinlichkeitsverteilung, da keine negativen Werte vorkommen können und Ausreisser im hohen Bereich zu beobachten sind (alte Leute, Nachzügler). Der Beschreibung einer schiefen Verteilung kann die Erlang-k-Funktion dienen. Sie weist eine positive Schiefe sowie keine Werte im negativen Bereich auf. In allgemeiner Form lautet sie:

$$(2-40) \quad P(\beta) = e^{-k \cdot \beta} \cdot \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(k \cdot \beta)^n}{n!}$$

mit:

$$(2-41) \quad k = \left(\frac{t_{h,fs}}{\sigma_{h,fs}} \right)^2$$

und:

$$(2-42) \quad \beta = \frac{\tau}{t_{h,fs}}$$

wobei $P(\beta)$ Verteilungsfunktion einer bestimmten spezifischen Fahrgastwechselzeit, ausgedrückt mit dem Verhältnis zwischen Fahrgastwechselzeit und deren Erwartungswert [-]

Die Erlang-k-Funktion verlangt ein ganzzahliges Verhältnis zwischen Mittelwert und Standardabweichung (Parameter k). Je grösser k ist, desto symmetrischer ist die resultierende Verteilung und desto mehr nähert sie sich der Normalverteilung an. Bei $k = 1$ dagegen entspricht die Erlang-Verteilung der Exponentialverteilung. Mit k wird somit die Form der Kurve bestimmt. Von den drei Grössen $t_{h,fs}$, $\sigma_{h,fs}$ und k sind deren zwei variabel, während die dritte Grösse durch die beiden anderen festgelegt ist. Im Normalfall wird man daher mit der Erlang-Funktion nur eine Näherung des Sachverhaltes darstellen können.

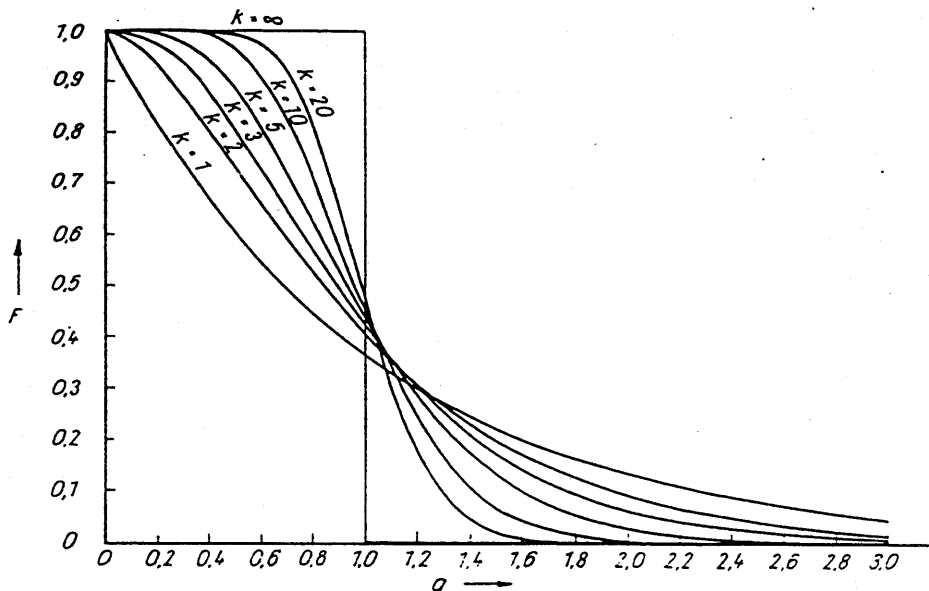


Abb. 2-23: Erlang-k-Funktion, Verteilungsfunktion verschiedener Werte von k [540].

Von praktischem Interesse sind in diesem Zusammenhang die Werte $k = 2$ und $k = 3$, welche gleichzeitig den Extremfall der Schiefe darstellen. Die Dichte der Erlang-k-Funktion mit $k = 2$ lautet:

$$(2-43) \quad p(\beta) = 4 \cdot \beta \cdot e^{-2 \cdot \beta}$$

Die Dichte von $k = 3$ ist entsprechend:

$$(2-44) \quad p(\beta) = \frac{27}{2} \cdot \beta^2 \cdot e^{-3 \cdot \beta}$$

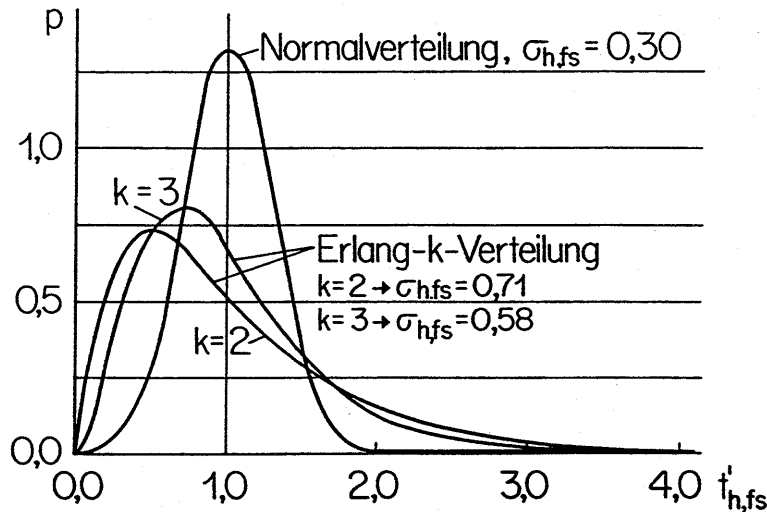


Abb. 2-24: Dichte von Verteilungen der spezifischen Fahrgastwechselzeit am Beispiel eines Mittelwertes von 1.0 sm/P; Normalverteilung sowie Erlang-k-Funktion mit $k = 2$ und $k = 3$.

2.3 Die Fahrgastwechselzeit eines Kurses

2.3.1 Fahrgastwechsel bei gleichmässiger Systemauslastung

2.3.1.1 Gleichmässigkeit der Türbelastung

Ein Linienkurs besteht aus einem einzelnen Fahrzeug oder einer Fahrzeuggruppe und verfügt in der Regel über mehrere Einstiege. Der Begriff des Kurses stammt aus dem Nahverkehr, wird hier aber allgemein verwendet. An einer Haltestelle möchte ein Teil der Fahrgäste den Kurs verlassen, während eine bestimmte Personenzahl auf die Mitfahrt wartet. Dem Austausch der F Fahrgäste dienen dabei die $n_{T,K}$ Türen des Kurses:

$$(2-45) \quad n_{T,K} = \sum_{i=1}^{i=n} n_{T,i}$$

wobei $n_{T,K}$ Zahl der nutzbaren Türen des Kurses [-]
 $n_{T,i}$ Nutzbare Türzahl des Fahrzeuges i [-]

Diese $n_{T,K}$ Türen verfügen zusammen über eine lichte Breite von $l_{T,bK}$, welche der Summe aller Türbreiten $l_{T,bi}$ entspricht:

$$(2-46) \quad l_{T,bK} = \sum_{i=1}^{i=n} l_{T,bi}$$

wobei $l_{T,bK}$ Lichte Breite aller Türen des Kurses [m]
 $l_{T,bi}$ Lichte Breite der Türe i [m]

Ein Kurs besitzt im weiteren eine nominelle Türleistungsfähigkeit als Summe der Erwartungswerte der einzelnen Türleistungsfähigkeiten.

$$(2-47) \quad L_{T,K} = \sum_{i=1}^{i=n} L_{T,i}$$

wobei $L_{T,K}$ Nominelle Leistungsfähigkeit des Türsystems eines Kurses [P/s]
 $L_{T,i}$ Leistungsfähigkeit der Türe i [P/s]

Ist die spezifische Leistungsfähigkeit aller Türen gleich, so beträgt $L_{T,K}$:

$$(2-48) \quad L_{T,K} = l_{T,bK} \cdot L_s$$

Da in erster Näherung angenommen werden kann, dass sich die Fahrgastwechselabläufe an den einzelnen Türen gegenseitig nicht beeinflussen, kann von einer reinen Parallelschaltung der n Einstiege ausgegangen werden. Das System ist vollkommen gleichmässig ausgelastet, wenn sich die Fahrgäste proportional zur zugehörigen Leistungsfähigkeit auf die einzelnen Türen verteilen. Es gilt dann:

$$(2-49) \quad F_i = F \cdot \frac{L_{T,i}}{L_{T,K}}$$

wobei F_i Fahrgastwechselzahl der Türe i [P]

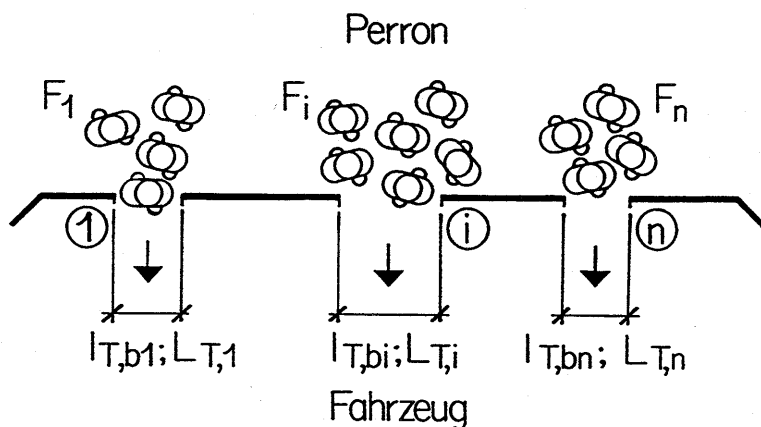


Abb. 2-25: Einfachstes Modell des Fahrgastwechsels eines Kurses. Die Fahrgäste verteilen sich entsprechend der jeweiligen Türleistungsfähigkeit auf die n Einstiege.

2.31.2 Berechnung der Fahrgastwechselzeit

Streuen die spezifischen Fahrgastwechselzeiten an den einzelnen Türen nicht, sondern entsprechen sie immer genau dem Mittelwert $t_{h,fs}$, so dauert der Fahrgastwechsel nunmehr an jeder Türe

gleich lang und errechnet sich sowohl für die Einzeltüre wie auch für das ganze Türsystem folgendermassen:

$$(2-50) \quad t_{h,f} = \frac{F_i}{L_{T,i}} = \frac{F}{L_{T,K}}$$

Die nominelle mittlere Fahrgastwechselzeit eines Kurses $t_{h,fm}$ ist gerade der Kehrwert der nominellen Türleistungsfähigkeit:

$$(2-51) \quad t_{h,fm} = \frac{1}{L_{T,K}} = \frac{t_{h,f}}{F}$$

wobei $t_{h,fm}$ Nominelle mittlere Fahrgastwechselzeit des Kurses [s/P]

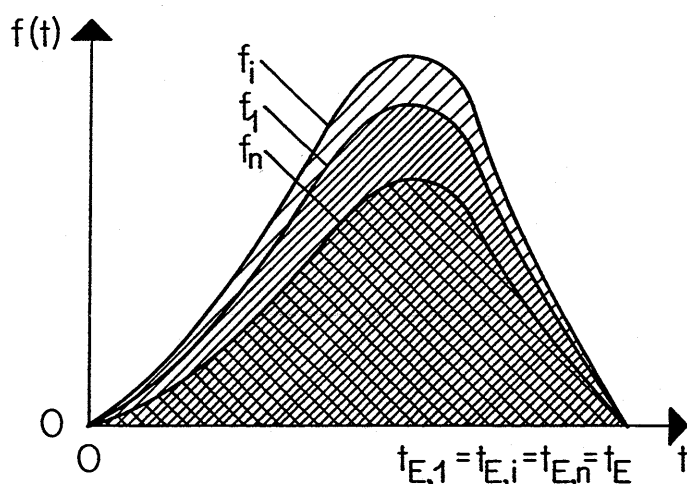


Abb. 2-26: Zeitlicher Verlauf der Fahrgastwechselströme am Kurs, wobei der Fahrgastwechsel überall gleichzeitig beginnt und infolge der Proportionalität von Fahrgastwechselzahl und Türverteilung auch überall gleichzeitig endet.

Mit der Fahrgastwechselzahl F und der Leistungsfähigkeit des Türsystems $L_{T,K}$ kann nun die relative Türbelastung $Q_{T,rel}$ als einfacher Vergleichswert für die Beanspruchung der Türsysteme verschiedener Kurse ermittelt werden:

$$(2-52) \quad Q_{T,rel} = \frac{F}{L_{T,K}}$$

wobei $Q_{T,rel}$ Relative Türbelastung [s]

Je höher $Q_{T,rel}$ ist, desto grösser wird auch die Fahrgastwechselzeit ausfallen. Ist die Fahrgastwechselzeit eines bestimmten Kurses für eine Fahrgastwechselzahl F bekannt, so lassen sich mit Hilfe von $Q_{T,rel}$ die Fahrgastwechselzeiten anderer Kurse grob abschätzen:

$$(2-53) \quad t_{h,f2}(F) = t_{h,f1}(F) \cdot \frac{Q_{T,rel2}}{Q_{T,rel1}}$$

wobei	$t_{h,f1}(F)$	Fahrgastwechselzeit des Kurses 1 bei einem Fahrgastwechsel F [s]
	$t_{h,f2}(F)$	Fahrgastwechselzeit des Kurses 2 bei einem Fahrgastwechsel F [s]
	$Q_{T,rel1}$	Relative Türbelastung des Kurses 1 [s]
	$Q_{T,rel2}$	Relative Türbelastung des Kurses 2 [s]

Die nominelle mittlere Fahrgastwechselzeit wird in der Regel deutlich übertroffen, denn der Fahrgastwechsel an den einzelnen Türen endet nur selten gleichzeitig. Verantwortlich dafür sind die unausgeglichene Benützung der Türen und die Streuung der Türleistungsfähigkeiten. Ihre Bedeutung liegt aber darin, dass sie einen unteren Grenzwert bildet. Am ehesten sind obige Annahmen bei sehr grossen Fahrgastwechselzahlen erfüllt, wenn Fahrgäste von überlasteten auf benachbarte Türen ausweichen und sich das Fahrgastverhalten dadurch homogenisiert. Dieses Verhalten der Fahrgäste ist allerdings von der Art der Türverriegelung abhängig, indem die Bereitschaft zum Ausweichen auf andere Türen bei Fahrzeugen mit Zwangsschliessung klein bleiben wird.

2.32 Fahrgastwechsel bei ungleichmässiger Systemauslastung

2.32.1 Ursachen einer ungleichförmigen Systemauslastung

Die Systemauslastung ist ungleichmässig, wenn die relative Türbelastung $Q_{T,rel i}$ nicht für alle Türen i eines Kurses gleich ist. Verursacht wird die Ungleichmässigkeit durch deterministische und stochastische Prozesse. Zu den deterministischen Ursachen gehört eine systematische Ungleichverteilung der wartenden Fahrgäste im Warteraum infolge unterschiedlicher Attraktivität der Teilflächen:

- *Zugangsverhältnisse* mit Fussgängerstreifen, Treppen, Lifts, Abschränkungen und Rampen. Wartende Fahrgäste verweilen gerne in der Nähe ihrer Zugangsstellen.
- *Haltestellenausstattung* mit Wartehallen, Informationsmittel, Billettautomaten, Kiosk und Sitzgelegenheiten. Diese Ausrüstungsgegenstände weisen eine besondere Attraktivität für wartende Fahrgäste auf.
- *Platzverhältnisse* mit Engnissen, welche die Warteraumfläche einer Türe auf dem Perron einschränken.

Es überlagert sich als stochastischer Einfluss die Zufälligkeit, mit welcher sich ein Fahrgast an einer bestimmten Stelle der Wartefläche aufhält und mit welcher er eine Türe des Fahrzeuges auswählt. Wesentlich ist, dass für die Beurteilung der Qualität der Türverteilung nicht die Fahrgastwechselzahl pro Türe (Türbelastung $Q_{T,i}$), sondern die Fahrgastwechselzahl bezüglich der zur Verfügung stehenden Leistungsfähigkeit (relative Türbelastung $Q_{T,rel i}$) massgebend ist. Dies bedeutet, dass Ungleichförmigkeitsmasse für die Türverteilung oder für die Fahrgastverteilung auf dem Perron für sich allein keine Aussagekraft haben.

2.32.2 Türbeanspruchung durch Einsteiger

2.32.21 Verteilung der Fahrgäste im Warteraum und Wahl der Türen

Der Warteraum wird entweder durch die Abmessungen der Haltestelleninsel beziehungsweise die Mauern bei unterirdischen Haltestellen begrenzt oder aber es bildet sich in einer gewissen Distanz zur Haltekante eine natürliche Grenze, ausserhalb derer sich keine wartenden Fahrgäste aufhalten. Charakterisiert ist der Warteraum durch die Lage seiner Zugänge, seine Länge $l_{w,l}$, seine Breite $l_{w,b}$, seine Fläche A_W , die Haltestellenausrüstung und allfällige Einbauten. Die Fahrgastdichte im Warteraum beträgt bei Gleichverteilung der Fahrgäste:

$$(2-54) \quad D_{F,W} = \frac{E}{A_W}$$

wobei	$D_{F,W}$	Dichte der wartenden Fahrgäste [P/m^2]
	E	Anzahl der wartenden Einsteiger [P]
	A_W	Fläche des Warteraumes [m^2]

Wird eine Haltestelle von mehreren Linien bedient, so ist die Gesamtzahl der wartenden Fahrgäste nicht mehr identisch mit E , sondern grösser. E ist dann zu ersetzen durch E_{tot} und auf den einzelnen Kurs entfällt nur die Einsteigerzahl E_i :

$$(2-55) \quad E_i = q_{F,i} \cdot E_{tot}$$

wobei	E_{tot}	Gesamtzahl der an einer Haltestelle wartenden Fahrgäste [P]
	E_i	Zahl der Fahrgäste, welche an einer bestimmten Haltestelle auf einen Kurs der Linie i warten [P]
	$q_{F,i}$	Anteil der Fahrgäste der Linie i an der Gesamtzahl der Fahrgäste [-]

Sind die Fahrgäste im Warteraum nicht gleichverteilt, so muss ihre Dichte durch eine Dichtefunktion $D_{F,W}(x,y)$ beschrieben werden. Deren Verlauf lässt sich mit Linien gleicher Dichte darstellen. Erhöhte Fahrgastkonzentrationen bilden sich bis zu jenem Dichtegrad, welcher von den Fahrgästen nicht mehr akzeptiert wird.

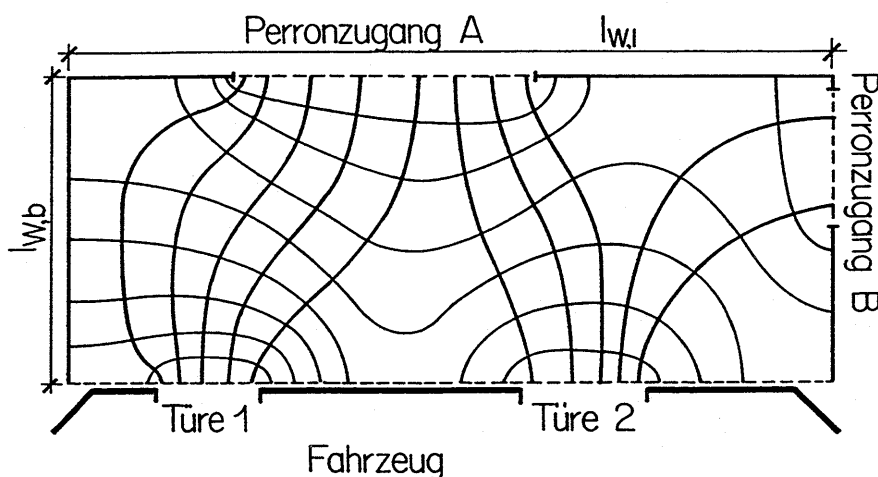


Abb. 2-27: Mögliche Verteilung von Fahrgästen auf einer Haltestelle, dargestellt mit Linien gleicher Dichte und mutmasslicher Weg der Fahrgäste zur Einsteigtüre in Analogie zu Potentiallinien.

Vor dem Einsteigen wählen die Fahrgäste eine Türe zur Benützung aus. Sind die Türen in ihrer Benützung in jeder Beziehung gleichwertig und liegen gute Platzverhältnisse im Fahrzeug vor, so haben die Fahrgäste keinen Anlass, eine andere als die nächstliegende Türe zu benützen. Andernfalls weichen die Fahrgäste von dieser Verhaltensweise ab. Die Eignungsunterschiede können in folgenden Gruppen zusammengefasst werden:

- Bestimmte Türen sind mit *Benützungseinschränkungen* belegt, indem sie nur für das Ein- oder Aussteigen zugelassen sind. Bei kommerzieller Abfertigung müssen die Fahrgäste ohne Fahrausweis oder sogar alle Fahrgäste eine bestimmte Türe benützen.
- Die Türen können sich *baulich unterscheiden*, beispielsweise in ihrer lichten Breite oder der Höhendifferenz. Gebrechliche Menschen werden eine Türe mit niedriger Einstiegshöhe und Personen mit Gepäck oder Kinderwagen eine breite Türe wählen.
- Bei *zweiklassigen Bahnsystemen* steigen die Fahrgäste meist direkt in die Fahrzeuge ihrer Klasse ein, da ein Durchqueren des Zuges während der Fahrt unangenehm und zum Teil sogar unmöglich ist. Das gleiche gilt für die Raucher- und Nichtraucherabteile.
- Ein Teil der Fahrgäste sucht sich die Türe bereits im Hinblick auf einen *kurzen Fussweg an der Zielhaltestelle* aus.
- Bei starken Fahrgastwechseln oder bei hoher Fahrzeugbesetzung entstehen *Rückstauerscheinungen*. Ein Teil der Fahrgäste weicht auf benachbarte, weniger benützte Türen aus.

2.32.22 Belastung der Türen

Die in der Praxis auftretenden Situationen sind vielfältig und müssen durch eine Grenzwertbetrachtung mit vollkommen uneingeschränkt und vollkommen eingeschränkt benutzbaren Türen eingegrenzt werden. Geht man zunächst davon aus, dass alle Fahrgäste die nächstliegende Türe wählen, so ergibt sich die Fahrgastwechselzahl einer Türe sehr einfach als Zahl der einsteigewilligen Fahrgäste in deren Einzugsgebiet, wobei die Grenzen in der Mitte zwischen den Türachsen liegen:

$$(2-56) \quad E_i = \int_{y=0}^{y=l_{w,b}(x)} \int_{x_1}^{x_2} D_{F,W}(x, y) dx dy$$

wobei	$D_{F,W}(x,y)$	Dichtefunktion der wartenden Fahrgäste auf der Haltestelle [P/m ²]
	$l_{w,b}(x)$	Breitenfunktion der Wartefläche [m]
	x_1, x_2	Grenzen des Einzugsgebietes gegenüber anderen Türen [m]

Die Einsteigerdichtenfunktion pro Laufmeter Zug erhält man, indem man die Dichte $D_{F,W}(x,y)$ über die Perronbreite integriert:

$$(2-57) \quad D_{F,l}(x) = \int_{y=0}^{y=l_{w,b}(x)} D_{F,W}(x, y) dy$$

wobei	$D_{F,l}(x)$	Fahrgastdichte pro Länge der Haltekante [P/m]
-------	--------------	---

Der Mittelwert der Längsdichte entlang der Haltekante ist ein gutes Mass für die Stärke des zu erwartenden Fahrgastwechsels und damit für die ungefähre Beanspruchung des Türsystems:

$$(2-58) \quad D_{F,lm} = \frac{\int_0^{l_{W,l}} D_{F,l}(x) dx}{l_{W,l}}$$

wobei $D_{F,lm}$ Mittlere Längsdichte der Fahrgäste entlang der Haltekante [P/m]
 $l_{W,l}$ Länge des Warteraumes [m]

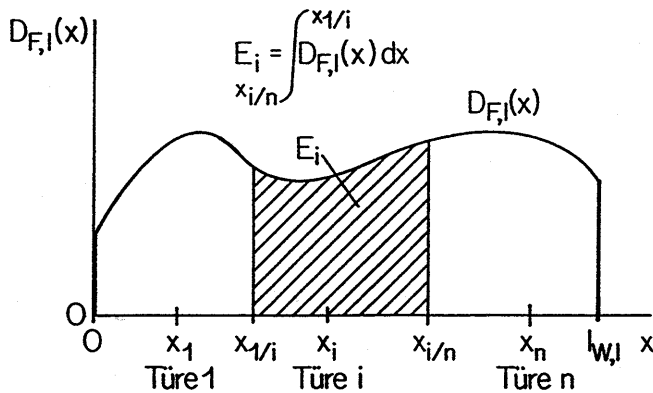


Abb. 2-28: Längsdichte der Fahrgäste entlang einer Haltekante und Einsteigerzahl der Türe i.

Mit einer mittleren Längsdichte $D_{F,lm}$ und einer maximalen Längsdichte $D_{F,lmax}$ lässt sich nun für die Haltestelle ein Ungleichförmigkeitsmass $q_{U,H}$ definieren, welches die Gleichmässigkeit der Belegung der Haltestelle angibt:

$$(2-59) \quad q_{U,H} = \frac{D_{F,lmax}}{D_{F,lm}}$$

wobei $q_{U,H}$ Ungleichförmigkeitsmass von Haltestellen [-]
 $D_{F,lmax}$ Maximale Fahrgastlängsdichte [P/m]

Nicht nur die Fahrgastdichteverteilung, sondern auch die Fahrgastlängsverteilung unterliegt grossen Streuungen, doch lässt sie sich auf einige Grundtypen zurückführen. Neben der Gleichverteilung sind Dreiecksverteilungen, Sinusverteilungen und Exponentialverteilungen von Belang. Diese Grundtypen leiten sich aus den Zugangsverhältnissen zur Haltestelle und aus der Zahl der Fahrgäste ab. Die grösste Fahrgastkonzentration ist in der Nähe der Perronzugänge zu erwarten. Bei nur wenigen Fahrgästen bildet sich eine exponentielle Fahrgastlängsverteilung heraus, welche sich mit zunehmender Fahrgastzahl über die Dreiecks- zur Sinus-Verteilung wandelt.

\overline{L}_0	Verteilungs- funktion graph.	Verteilungsfunktion analytisch	Gesamtzahl der Einsteiger
①		$D_{F,l}(x) = D_{F,lmax} = \text{const}$	$E = W,l \cdot D_{F,lmax}$
②		$D_{F,l1}(x) = \frac{x}{x_{max}} \cdot D_{F,lmax}$ $D_{F,l2}(x) = \frac{ W,l - x}{ W,l - x_{max}} \cdot D_{F,lmax}$	$E = \frac{ W,l }{2} \cdot D_{F,lmax}$
③		$D_{F,l}(x) = \frac{D_{F,lmax}}{2} \left[1 + \sin \left(\frac{\pi}{ W,l } \left(2x - \frac{ W,l }{2} \right) \right) \right]$	$E = \frac{ W,l }{2} \cdot D_{F,lmax}$
④		$D_{F,l1}(x) = \frac{D_{F,lmax}}{x_{max}^2} \cdot x^2$ $D_{F,l2}(x) = \frac{D_{F,lmax}}{x_{max}^2} (W,l - x)^2$	$E = D_{F,lmax} \left(\frac{2x_{max}}{3} - W,l + \frac{ W,l ^2}{x_{max}} \right)$

Abb. 2-29: Typisierung der Längsdichten der wartenden Fahrgäste an Haltestellen mit Extremwerten, Ungleichförmigkeitsmassen und Gesamtzahl der wartenden Fahrgäste.

Lässt sich eine Längsverteilung nicht mit einem der Grundtypen beschreiben, so eröffnet sich zusätzlich die Möglichkeit der Überlagerung verschiedener Verteilungen. Die Standardlastfälle müssen sich dabei nicht gezwungenermaßen über die ganze Warteraumlänge erstrecken. Das gesamte Einsteigervolumen E ist dazu so auf die Verteilungstypen i aufzuteilen, dass die Gesamtsumme der Einsteigerzahlen E_i aller überlagerten Verteilungen wiederum E ergibt. Bei dieser Überlagerung lässt sich zudem die relative Bedeutung der verschiedenen Perronzugänge berücksichtigen:

$$(2-60) \quad E = \int_{x_1}^{x_2} D_{F,l1}(x) dx + \dots + \int_{x_1}^{x_2} D_{F,li}(x) dx + \dots + \int_{x_1}^{x_2} D_{F,ln}(x) dx$$

wobei $D_{F,li}(x)$ Längsdichtevertelung des Typs i [P/m]

Eine trapezförmige Verteilung lässt sich beispielsweise durch Überlagerung zweier geeigneter Dreiecksverteilungen nachbilden. Die Längsdichtenverteilungen $D_{F,li}(x)$ ergeben sich aus der Einsteigersummenbedingung. Abschliessend ist zu kontrollieren, ob auf dem Perron nirgends die höchstzulässige Fahrgastdichte überschritten wird.

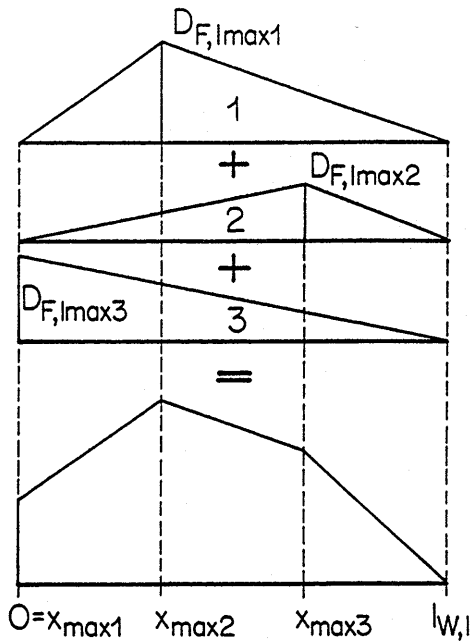


Abb. 2-30: Beispiel für die Überlagerung von Standardlastfällen der Längsverteilung von Einsteigern.

Liegen besondere Auswahlkriterien seitens der Fahrgäste vor, so ist eine allgemeine Darstellung nicht mehr möglich und die meistbelastete Türe muss fallweise ermittelt werden.

2.32.23 Folgen der Türbenützbarkeit für die Zuströmfunktion

Die Freizügigkeit oder Beschränktheit der Türbenützung entscheidet nicht nur über die Inanspruchnahme der einzelnen Durchgänge, sondern auch über die Länge der auftretenden maximalen Zugangswege:

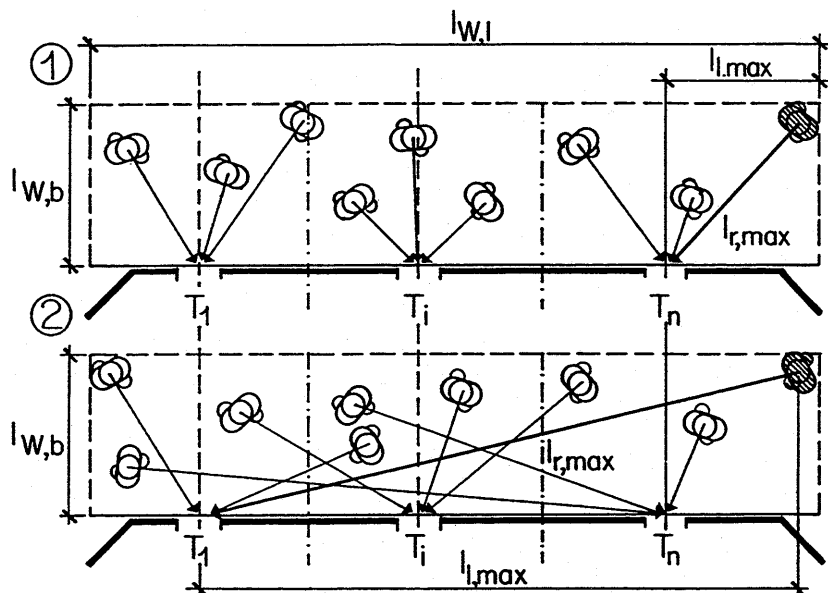


Abb. 2-31: Grenzwertbetrachtung bei der Türbenützung mit vollkommen freizügiger (oben) und vollkommen spezialisierter (unten) Türbenützung.

Die maximale Distanz $l_{r,max}$ bestimmt den Grenzzeitpunkt t_g , zu welchem der letzte einsteigewillige Fahrgast bei seiner Türe anlangt.

$$(2-61) \quad l_{r,max} = \sqrt{l_{W,b}^2 + l_{l,max}^2}$$

wobei	$l_{r,max}$	Maximale Zugangsdistanz eines Fahrgastes zur Einstiegstüre [m]
	$l_{W,b}$	Breite des Perrons an der massgebenden Stelle [m]
	$l_{l,max}$	Maximaler Abstand eines Fahrgastes von der Türachse [m]

Bei vollkommener Freizügigkeit entspricht der maximale Abstand eines Fahrgastes von der Türachse $l_{l,max}$ der Hälfte des maximalen Abstandes zweier Türachsen des Kurses beziehungsweise dem Zugangsweg am Fahrzeugende, falls dieser grösser ist. Bei den üblichen Massen öffentlicher Personenverkehrsmittel ist die Distanz $l_{r,max}$, welcher die Rolle der früher definierten Grenzdistanz $l_{r,g}$ zukommt, und damit auch die Zuströmzeit t_g aus der Grenzdistanz klein und die Zuströmfunktion nimmt einen steilen Verlauf. Bei einer Spezialisierung der Türen hingegen können $l_{r,max}$ und t_g hohe Werte annehmen, da $l_{l,max}$ so gross werden kann wie die Distanz von einem Perronende zur äussersten gegenüberliegenden Türe. Die Zuströmfunktion zur Türe verflacht, am stärksten jene der äussersten Türen des Kurses, da ein Teil der zugehörigen Fahrgäste fast die gesamte Kurslänge zurücklegen muss. Weniger betroffen sind die Türen in Kursmitte.

2.32.3 Türbeanspruchung durch Aussteiger

2.32.31 Kriterien für die Wahl des Aufenthaltsortes

Ein Fahrzeug bietet dem Fahrgast Sitz- und Stehplätze an, wobei die Sitzplätze im Gegensatz zum Warteraum einen massgebenden Teil des Platzangebotes ausmachen. Eine Beschreibung der Verteilung der Fahrgäste auf die einzelnen Fahrzeugbereiche kann daher nicht wie beim Perron mit einer Dichtefunktion erfolgen. Die Fahrgastverteilung ist aus zweierlei Gründen von Belang:

1. Die Verteilung der Fahrgäste entscheidet über die Benützung der Türen.
2. Die Dichte der stehenden Fahrgäste im Türraum beeinflusst durch die Behinderung des Fahrgastwechsels die Fahrgastwechselzeit mit.

Bei der Wahl seines Aufenthaltsortes im Fahrzeug optimiert der Fahrgast seinen Gesamtkomfort. Besondere Gesichtspunkte werden bei älteren und gebrechlichen Menschen wirksam, welche zu wenig Kraft haben, um die grossen Längs- und Querbeschleunigungen beim Gehen und Stehen im fahrenden Kurs auszuhalten. Unterschiedlich sind aber auch die individuellen und momentanen Komfortwünsche der übrigen Fahrgäste, was den quantitativen Nachvollzug der Vorgänge im Fahrzeug weiter erschwert. Vereinfachend lassen sich insgesamt zwei Fahrgastgruppen bilden:

1. Gebrechliche und ältere Fahrgäste, welche auf einen Sitzplatz angewiesen sind.
2. Fahrgäste, welche in der Lage sind, sich längere Zeit stehend im Fahrzeug aufzuhalten.

Der Aufenthaltskomfort der letzteren Gruppe bemisst sich, sieht man von Unterschieden wie Lärm, Temperatur und Durchzug ab, nach dem Energieverbrauch zur Erlangung des Platzes und für den dortigen Aufenthalt. Der Energieaufwand zur Erreichung eines Platzes setzt sich aus jenem zur Überwindung von Horizontal- und Vertikaldistanzen zusammen. Grössere Vertikaldistanzen treten

nur bei Doppelstockwagen und bestimmten Niederflurfahrzeugen auf. Der Energieaufwand des Menschen beim Sitzen ist wesentlich kleiner als beim Stehen, weshalb die Sitzplätze für den Aufenthalt qualitativ überlegen sind.

$$(2-62) \quad W_{\text{tot}} = t_{\text{Bew}} \cdot w_{\text{Bew}} + t_{\text{Auf}} \cdot w_{\text{Auf}}$$

wobei	t_{Bew}	Bewegungszeit vom Einstieg zum Aufenthaltsort [s]
	t_{Auf}	Aufenthaltszeit am Aufenthaltsort [s]
	W_{tot}	Gesamter Energieaufwand des Fahrgastes bei der Fahrt [J]
	w_{Bew}	Spezifischer Energieverbrauch zur Fortbewegung [J/s]
	w_{Auf}	Spezifischer Energieverbrauch beim Aufenthalt [J/s]

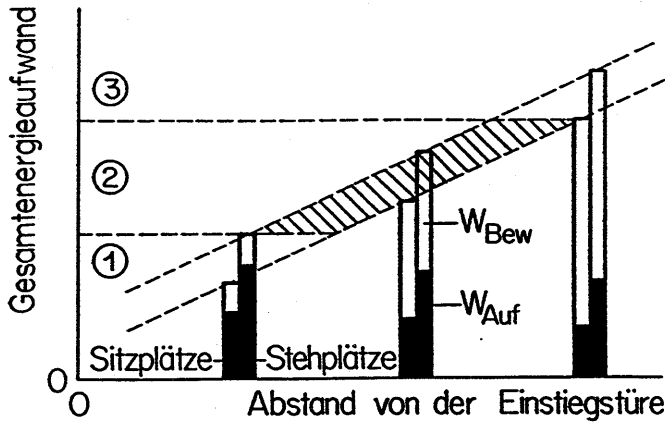


Abb. 2-32: Gesamtenergieaufwand für eine Fahrt in einem öffentlichen Verkehrsmittel an verschiedenen Stellen des Fahrzeuges unter der Annahme einer bestimmten Reisedauer. 1) Der Aufenthalt auf diesen Sitzplätzen hat einen kleineren Energieverbrauch zur Folge als auf dem energiegunstigsten Stehplatz. 2) Der Aufenthalt auf diesen Sitz- und Stehplätzen weist einen vergleichbaren Energieaufwand auf. 3) Auf allen Sitzplätzen liegt der Energieaufwand für den Fahrgast unter jenem auf den verbleibenden Stehplätzen. Die Relationen hängen vom Verhältnis zwischen dem Energieaufwand für das Bewegen, das Stehen und das Sitzen ab. Die Überlegungen gelten nur für Fahrgäste, welche sich längere Zeit stehend aufhalten können.

Dieser Gesamtenergieverbrauch lässt sich mit der Fahrtdauer des Fahrgastes t_f , der horizontal zurückzulegenden Distanz $l_{\text{Bew,h}}$, der Höhendifferenz $l_{\text{Bew,v}}$ sowie den zugehörigen Geschwindigkeiten $v_{F,h}$ und $v_{F,v}$ ausdrücken:

$$(2-63) \quad W_{\text{tot}} = \frac{2 \cdot l_{\text{Bew,h}}}{v_{F,h}} \cdot w_{\text{Bew,h}} + \frac{2 \cdot l_{\text{Bew,v}}}{v_{F,v}} \cdot w_{\text{Bew,v}} + \left(t_f - \frac{2 \cdot l_{\text{Bew,h}}}{v_{F,h}} - \frac{2 \cdot l_{\text{Bew,v}}}{v_{F,v}} \right) \cdot w_{\text{Auf}}$$

wobei	$w_{\text{Bew,h}}$	Spezifischer Energieverbrauch bei horizontaler Bewegung [J/s]
	$w_{\text{Bew,v}}$	Spezifischer Energieverbrauch bei vertikaler Bewegung [J/s]
	$l_{\text{Bew,h}}$	Horizontal zurückzulegende Distanz im Fahrzeug zwischen Einstieg und Platz [m]
	$l_{\text{Bew,v}}$	Zu überwindende Höhendifferenz im Fahrzeug zwischen Einstieg und Platz [m]
	t_f	Fahrzeit des Fahrgastes im Fahrzeug [s]
	$v_{F,h}$	Horizontalgeschwindigkeit des Fahrgastes [m/s]
	$v_{F,v}$	Vertikalgeschwindigkeit des Fahrgastes [m/s]

Der Energieanteil für das Erreichen des Platzes ist unabhängig von der Reiselänge, der Energieaufwand für den Aufenthalt dagegen wächst mit der Reisedauer linear an. Je grösser die Aufenthaltszeit im Fahrzeug ist, desto mehr fällt für den Fahrgast die Energieeinsparung durch einen Sitzplatz ins Gewicht und desto eher wird er dafür eine grössere Distanz zurücklegen. Das Attraktivitätsverhältnis der einzelnen Fahrzeugbereiche ist somit nicht konstant und je kürzer sich ein Fahrgast im Fahrzeug aufhält, desto geringer ist seine Bereitschaft, den unmittelbaren Türbereich zu verlassen. Deshalb ist im Kurzstreckenverkehr öfters zu beobachten, dass Stehplätze im unmittelbaren Türbereich einem Sitzplatz vorgezogen werden. Insgesamt werden zwar die Sitzplätze mit Vorliebe belegt, sie übernehmen aber bei kurzen Reisedistanzen und kleiner Fahrzeugauslastung nicht die volle Fahrgastzahl. Überschreitet die Reisedauer ein bestimmtes Mass, so wird das Stehen für alle Fahrgäste zu beschwerlich.

2.32.32 Besetzung der Fahrzeugbereiche

Allen Türen können die zugehörigen Fahrzeugbereiche zugeordnet werden. Diese Fahrzeugbereiche lassen sich in folgende Zonen einteilen:

- Türnahe Sitzplatzzonen
- Türferne Sitzplatzzonen
- Stauräume der Türen
- Weitere türnahe Stehplatzflächen
- Türferne Stehplatzflächen

Der Besetzungsverlauf der Fahrzeugbereiche wird neben der Attraktivität durch zwei weitere Einflüsse gesteuert:

1. Alle wartenden Fahrgäste werden an einer Haltestelle aufgenommen, bis die maximale Auslastung des Fahrzeuges erreicht ist.
2. Die Aufnahmefähigkeit der einzelnen Bereiche des Fahrzeuges ist begrenzt. Die Aufnahmefähigkeit der Sitzplatzbereiche entspricht gerade der Sitzplatzzahl. Diejenige der Stehplatzbereiche wird durch den akzeptierten Stehplatzbelegungsgrad begrenzt.

Die vier Einflussfaktoren - Angewiesensein auf einen Sitzplatz, Minimierung des Energieaufwandes, Beförderung aller Fahrgäste, Begrenzung der Aufnahmefähigkeit - ergeben für die Fahrzeugbereiche bestimmte Füllungskurven in Funktion der Gesamtzahl der im Fahrzeug befindlichen Fahrgäste. Jede Füllungskurve ist durch die Annäherung an das jeweilige Fassungsvermögen gekennzeichnet. Die Überlagerung aller Füllungskurven ergibt die Gesamtbesetzung. Zwischen den Fahrzeugbereichen besteht ein Attraktivitätsgefälle. Die attraktiveren Sitzplatzzonen sind als erste gesättigt und ihr Füllungsverlauf wird etwa durch die Logarithmus-Funktion beschrieben:

$$(2-64) \quad Q_i(Q_K) = Q_{i,sat} \cdot \log \left(9 \cdot \frac{Q_K}{Q_{K,max}} + 1 \right)$$

wobei $Q_{K,max}$ Maximales Fassungsvermögen [P]

Die Füllungskurven der weniger attraktiven Fahrzeugbereiche, also der Stehplatzbereiche, nehmen dagegen infolge der beschriebenen Einflüsse im allgemeinen einen logistischen Verlauf:

$$(2-65) \quad Q_i(Q_K) = \frac{Q_{i,sat}}{1 + e^{a-b \cdot Q_K}}$$

wobei	Q_i	Zahl der Fahrgäste im Fahrzeugbereich i [P]
	$Q_{i,sat}$	Sättigungsbesetzung des Fahrzeugbereiches i [P]
	Q_K	Gesamtbesetzung des Fahrzeuges [P]
	a	Konstante der logistischen Funktion [-]
	b	Konstante der logistischen Funktion [P ⁻¹]

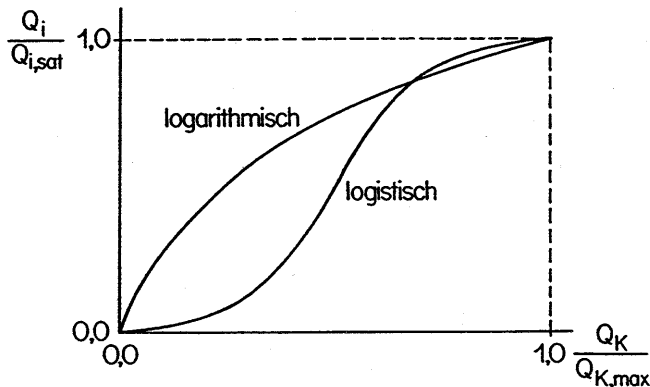


Abb. 2-33: Typische Füllungskurven von Fahrzeugbereichen: Logarithmischer Verlauf eines attraktiven Fahrzeugbereiches und logistischer Verlauf einer weniger attraktiven Zone, welche erst in Anspruch genommen wird, wenn attraktivere Fahrzeugbereiche bereits besetzt sind.

2.32.33 Kriterien für die Wahl der Türen und Türbenützung

Bevor vom Aufenthaltsort der Fahrgäste auf die von ihnen benützte Türe geschlossen werden kann, ist der Fahrgastausgleich im Fahrzeug zwischen über- und unterbelasteten Bereichen zu berücksichtigen, welcher eine Funktion des Grades der Überbelegung ist. In der Praxis bleibt er schwach, da die Fahrgäste eine kleine Überbelegung nicht als derart gravierend empfinden, dass sie deswegen ihren Platz im Fahrzeug wechseln würden. Insbesondere behalten jene Fahrgäste ihren Platz bei, welche sich bereits vor der Überfüllung im Fahrzeug befanden. Ihnen fehlt sogar oft die Kenntnis von freien Plätzen in einem anderen Teil des Kurses. Ausserdem ist es gerade bei Überfüllung kaum möglich, einen anderen Teil des Fahrzeuges aufzusuchen und bei vielen Nahverkehrsfahrzeugen bestehen zudem keine Übergangseinrichtungen. Die Wahl einer anderen als der nächstliegenden Türe ist bei den Aussteigevorgängen daher weniger ausgeprägt als beim Einsteigen.

2.32.4 Fahrgastwechselzeit und optimale Türverteilung

2.32.41 Fahrgastwechselzeit

Die Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses beginnt mit dem Durchqueren eines Türquerschnittes durch einen ersten Fahrgast und ist abgeschlossen, wenn sich durch keine der Türen

mehr ein Fahrgast bewegt. Fällt der Anfang des Fahrgastwechsels aller Türen zeitlich zusammen, so bestimmt die Türe mit der höchsten relativen Türbelastung das Ende des Fahrgastwechsels.

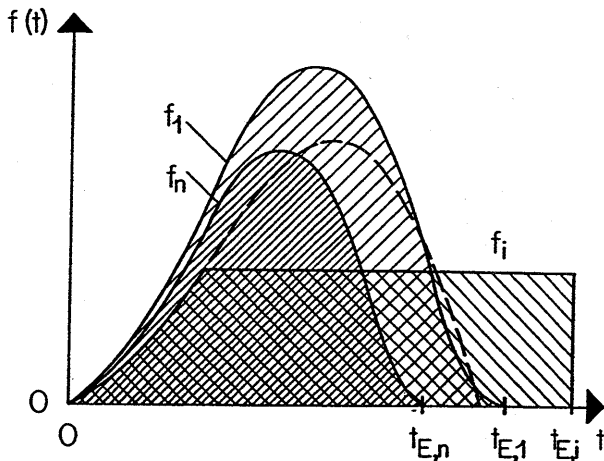


Abb. 2-34: Zeitlicher Verlauf der Fahrgastwechselströme am Kurs, wobei der Fahrgastwechsel überall gleichzeitig beginnt, aber infolge der ungleichmässigen Systemauslastung nicht gleichzeitig endet.

Treten bei den $t_{hf,si}$ der Türen voraussetzungsgemäss keine Störungen auf, so kann mittels der relativen Türbelastung $Q_{T,relmax}$ der meistbelasteten Türe sowie mit $Q_{T,rel}$ für das ganze Fahrzeug ein Ungleichförmigkeitswert $q_{U,T}$ für das Fahrzeug bestimmt werden:

$$(2-66) \quad q_{U,T} = \frac{Q_{T,relmax}}{Q_{T,rel}}$$

wobei $q_{U,T}$ Ungleichförmigkeitsmass der Türbelastung [-]
 $Q_{T,relmax}$ Maximal an einem Fahrzeug auftretende relative Türbelastung [s]
 $Q_{T,rel}$ Mittlere relative Türbelastung des Fahrzeuges [s]

Mittels dieses Ungleichförmigkeitswertes können verschiedene Fahrzeuge bezüglich ihres Betriebsverhaltens verglichen werden. Ausserdem lässt sich nun die nominelle Fahrgastwechselzeit $t_{h,f}$ um diese Ungleichförmigkeit korrigieren. Die effektive Fahrgastwechselzeit $t'_{h,f}$ wird dadurch zu:

$$(2-67) \quad t'_{h,f} = q_{U,T} \cdot t_{h,f} = q_{U,T} \cdot \frac{F}{L_{T,K}}$$

wobei $t'_{h,f}$ Effektive Fahrgastwechselzeit [s]

Entsprechend lässt sich auch eine effektive Türleistungsfähigkeit $L'_{T,K}$ mittels $L_{T,K}$ und $q_{U,T}$ ausdrücken:

$$(2-68) \quad L'_{T,K} = \frac{L_{T,K}}{q_{U,T}}$$

wobei $L'_{T,K}$ Effektive Leistungsfähigkeit des Türsystems bei ungleichmässiger Systemauslastung [P/s]

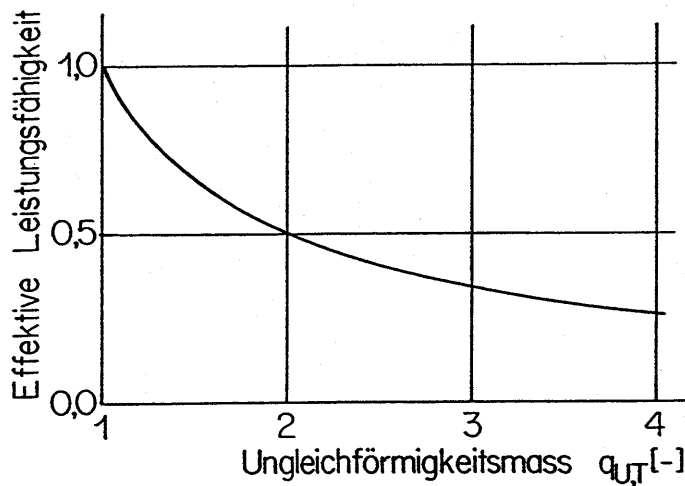


Abb. 2-35: Abnahme der effektiven Türleistungsfähigkeit in Abhängigkeit vom Ungleichförmigkeitswert $q_{U,T}$.

2.32.42 Optimale Türverteilung

Die Türen eines Kurses sind optimal verteilt, wenn $q_{U,T} = 1$ ist. Die Fahrgastwechselzahl muss sich damit im Verhältnis zur jeweiligen Türleistungsfähigkeit auf die Durchgänge verteilen:

$$(2-69) \quad Q_{T,rel} = \frac{F}{L} = \frac{F_i}{L_i} = Q_{T,reli}$$

Sind alle Türen eines Kurses gleich leistungsfähig, so verlangt dies eine gleichmässige Türverteilung. Umgekehrt muss eine ungleichmässige Türverteilung, welche sich aus der Grundrissgestaltung des Fahrzeuges aufdrängen kann, mit einer Anpassung der Türleistungsfähigkeit berücksichtigt werden. Durch entsprechende Anordnung der Perronzugänge und Einbauten ist ferner zu erreichen, dass sich die Fahrgäste möglichst bereits im Warteraum entsprechend aufhalten. Im weiteren muss das Platzangebot im Fahrzeug auf die aufzunehmende Fahrgastmenge abgestimmt sein, soll den Fahrgästen bei gegebener Gesamtbesetzung des Fahrzeuges in allen Fahrzeugbereichen der gleiche Aufenthaltskomfort gewährleistet werden:

$$(2-70) \quad Q_{K,rel} = \frac{Q_{K,max}}{L} = \frac{Q_{K,imax}}{L_i} = Q_{K,reli}$$

wobei	$Q_{K,rel}$	Relatives Fassungsvermögen des Kurses [s]
	$Q_{K,reli}$	Relatives Fassungsvermögen des Kursbereiches i [s]
	$Q_{K,max}$	Maximales Fassungsvermögen des Kurses [P]
	$Q_{K,imax}$	Maximales Fassungsvermögen des Fahrzeugbereiches i [P]

Diese Forderung wirkt sich namentlich auf das Verhältnis zwischen Sitzplätzen und Stehplatzflächen aus, deren Flächenbedarf pro Person sich stark unterscheidet.

2.33 Fahrgastwechsel bei ungleichmässiger Systemauslastung und Streuungen bei den Fahrgastwechselzeiten der Türen

2.33.1 Türleistungsfähigkeit als Zufallsgrösse

Die Fahrgastwechselzeiten an den einzelnen Türen sind in der Realität keine festen Werte, sondern folgen einer Wahrscheinlichkeitsfunktion. Diese ist gegeben durch den Mittelwert der Türbenützung F_i sowie den Erwartungswert $t_{h,fs}$, die Streuung $\sigma_{h,fs}$, die Verteilungsfunktion $P(t)$ und die Dichtefunktion $p(t)$ der spezifischen Fahrgastwechselzeit. Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrgäste bei Überlastung einzelner Türen nicht auf andere, weniger beanspruchte Türen ausweichen. Diese Annahme ist zulässig, denn öfters warten Fahrgäste lieber etwas länger auf das Einsteigen und nehmen den Aufenthalt in einem überfüllten Fahrzeugbereich in Kauf, als das Risiko einzugehen, dass sich die Ausweichtüre vor ihnen schliesst. Die Fahrgastwechselforgänge an den einzelnen Türen können mit diesen Vereinfachungen als statistisch unabhängig betrachtet werden, wobei das Resultat der Abschätzung auf der ungünstigen Seite liegt. Unterscheidet sich die Verteilungsfunktion der spezifischen Fahrgastwechselzeit für grosse und kleine Fahrgastwechsel sowie für die verschiedenen Türen nicht, so gilt:

$$(2-71) \quad P_i(\tau) = \frac{q_{F,T_i} \cdot F \cdot P_{sta}(\tau)}{l_{T,bi}}$$

wobei $P_i(\tau)$ Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzeit an der Türe i [s]
 q_{F,T_i} Anteil des Fahrgastwechsels an einer bestimmten Haltestelle, welcher auf die Türe i entfällt [-]
 $P_{sta}(\tau)$ Normverteilungsfunktion der spezifischen Fahrgastwechselzeit [s/P]

Als Normverteilungsfunktion kann etwa die früher beschriebene Standardnormalverteilung oder die Erlang-k-Verteilung eingesetzt werden.

2.33.2 Verteilungsfunktion und Erwartungswert des Türsystems

Da die Fahrgastwechselzeit an jeder Türe einer Verteilungsfunktion folgt, gilt dasselbe auch für die Fahrgastwechselzeit des Türsystems. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Öffnungszeit des Türsystems den Wert τ nicht übersteigt ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Öffnungszeit an jeder Türe gleichzeitig kleiner als τ ist. Durch die Unabhängigkeit der Vorgänge an den einzelnen Türen wird die Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses als Produkt der einzelnen Türverteilungsfunktionen gebildet:

$$(2-72) \quad P_K(\tau) = \prod P_{T,i}(\tau)$$

wobei $P_K(\tau)$ Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen der Fahrgastwechselzeit des Kurses [s]

$P_K(\tau)$ lässt sich nun als Produkt der Integrale der Dichten ausdrücken:

$$(2-73) \quad P_K(\tau) = \prod \int_{-\infty}^{\tau} p_{T,i}(x) dx$$

wobei $p_{T,i}(x)$ Dichte der Fahrgastwechselzeiten der Einzeltüren [-]

Für den Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit eines Kurses gilt allgemein:

$$(2-74) \quad t_{h,f} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot p_K(x) dx$$

wobei $t_{h,f}$ Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit des Kurses für eine bestimmte Fahrgastwechselzahl [s]
 $p_K(x)$ Dichte der Fahrgastwechselzeit des Kurses [-]

Die Dichte $p_K(x)$ der Fahrgastwechselzeit des Kurses ist dabei die Ableitung der Verteilungsfunktion:

$$(2-75) \quad p_K(x) = \frac{d}{dx} \prod P_{T,i}(x)$$

Somit lautet der Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit des Türsystems des Kurses:

$$(2-76) \quad t_{h,f} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot \left(\frac{d}{dx} \prod P_{T,i}(x) \right) dx$$

Dieser Ausdruck ist beispielsweise bei Erlang-verteilten Fahrgastwechselzeiten geschlossen darstellbar, wird aber bereits bei wenigen Türen sehr umfangreich, was namentlich auf die partiellen Integrale der Verteilungsfunktionen zurückzuführen ist. Die praktische Anwendung bereitet damit Schwierigkeiten.

Sind die Verteilungsfunktion und der Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses bekannt, so lassen sich die Verteilungsfunktion und der Erwartungswert der mittleren Fahrgastwechselzeit des Kurses einfach ermitteln. Für die Verteilungsfunktion der mittleren Fahrgastwechselzeit des Kurses gilt:

$$(2-77) \quad P_{K,m}(\tau) = \frac{P_K(\tau)}{F}$$

wobei $P_{K,m}(\tau)$ Verteilungsfunktion der mittleren Fahrgastwechselzeit des Kurses [s/P]

Der zugehörige Erwartungswert der mittleren Fahrgastwechselzeit lautet:

$$(2-78) \quad t_{h,fm} = \frac{t_{h,f}}{F}$$

Die dargestellten Zusammenhänge besagen, dass der Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit des gesamten Türsystems selbst unter der Voraussetzung identischer Verteilungsfunktionen an den einzelnen Türen und gleicher Fahrgastwechselzahl an jeder Türe mit wachsender Türzahl

ansteigt. Die mittlere Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses sinkt zwar infolge der mit wachsender Türzahl steigenden Leistungsfähigkeit des Türsystems ab, aber nicht in einem Ausmass, wie dies aufgrund der steigenden nominellen Türleistungsfähigkeit vermutet werden könnte.

2.33.3 Ausschöpfungsgrad des Türsystems

Analog zur einzelnen Türe kann auch für das gesamte Türsystem ein Ausschöpfungsgrad definiert werden, welcher dem Verhältnis von effektiv genutzter zu theoretisch möglicher Türleistungsfähigkeit entspricht:

$$(2-79) \quad q_{K,L} = \frac{\frac{F}{t_{h,f}}}{L_{T,K}} = \frac{F}{t_{h,f} \cdot L_{T,K}} = \frac{1}{t_{h,fm} \cdot L_{T,K}}$$

wobei $q_{K,L}$ Ausschöpfungsgrad des Türsystems [-]

Der Ausschöpfungsgrad ist eine Funktion des Ungleichförmigkeitsmasses der Türbenützung und der Türzahl. Er wird klein bei sehr unausgeglichener Systemauslastung und grosser Türzahl, wird aber auch bei vollkommen gleichmässiger Systemauslastung und sehr grossen Fahrgastwechselzahlen infolge der Streuung der Fahrgastwechselzeiten an den einzelnen Türen nie genau 1. Sind der Ausschöpfungsgrad des Türsystems und die nominelle Türleistungsfähigkeit bekannt, so lässt sich direkt die zu erwartende Fahrgastwechselzeit errechnen:

$$(2-80) \quad t_{h,f} = \frac{F}{q_{K,L} \cdot L_{T,K}}$$

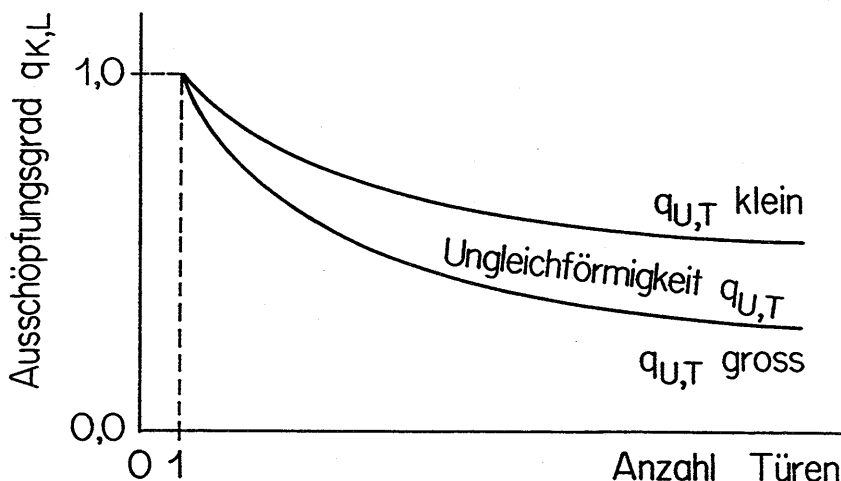


Abb. 2-36: Qualitativer Verlauf des Ausschöpfungsgrades des Türsystems in Funktion der Türzahl und der Ausgeglichenheit der Systemauslastung.

2.34 Fahrgastwechsel bei ungleichmässiger Systemauslastung sowie Streuungen bei den Fahrgastwechselzeiten der Türen und Türbenüt-zungen

2.34.1 Analytisch nicht erfassbare Einflüsse

2.34.11 Reaktion des Fahrgastes auf den Systemzustand

Nicht nur die spezifischen Fahrgastwechselzeiten an den einzelnen Türen sind Zufallsgrössen, sondern auch die Verteilung der Fahrgäste auf die Türen des Kurses. Verzerrungen gegenüber dem statistischen Mittel kommen zunächst zufällig zustande, dann aber auch dadurch, dass Fahrgäste öfters in kleinen Gruppen von zwei bis vier Personen unterwegs sind und alle Mitglieder der Gruppe dieselbe Türe benutzen. Ein weiterer Teil der Fahrgäste reagiert auf den Besetzungsgrad des Kurses und sucht sich einen weniger belasteten Fahrzeugbereich aus. Dieses Verhalten ist abhängig vom Zustand des Teilsystems Fahrzeug. Der Zustand des Fahrzeugs wiederum ist das Resultat seiner Beladungsgeschichte. Ähnliches gilt für das Ausweichen der Fahrgäste von einer überlasteten Türe auf weniger belastete. Das Verhalten der Fahrgäste ist in dieser Situation individuell sehr verschieden. Jüngere Fahrgäste, denen das schnelle Gehen keine Mühe bereitet, verlassen mit höherer Wahrscheinlichkeit eine Warteschlange als ältere Fahrgäste. Ungleichmässigkeiten besonderer Art und Grösse treten schliesslich bei speziellen Zugangssituationen oder bei Doppelhaltestellen an den äussersten Türen auf.

Die quantitative Behandlung der skizzierten Vorgänge wird dadurch erschwert, dass gerade das Ausweichen auf andere Türen ein hochgradig dynamischer Prozess ist. Die Kenntnis der Zahl der Fahrgäste an den einzelnen Türen reicht nicht aus, sondern eine Rolle spielt auch der Ablauf des Fahrgastwechsels an jedem einzelnen Durchgang. Ist er rasch, so werden die wartenden Fahrgäste trotz grosser Warteschlangen kaum auf eine andere Türe ausweichen. Umgekehrt kann bei wenigen, aber sehr langsam einsteigenden Fahrgästen (zum Beispiel alte Menschen, Fahrgäste mit Kinderwagen) der Anlass zum Ausweichen gegeben sein. Es ist somit unumgänglich, dass der Fahrgastwechselfvorgang für verschiedene kleine Δt wiederholt errechnet und nach jedem Schritt der Systemzustand neu bestimmt und der Entscheidungsprozess aller Fahrgäste nachvollzogen wird.

2.34.12 Ganzzahligkeit des Fahrgastwechsels

Eine wesentliche Eigenschaft des Fahrgastwechsels besteht in seiner Ganzzahligkeit. Entfällt auf die einzelne Türe im Schnitt weniger als ein Fahrgast, so kann die Leistungsfähigkeit des Türsystems selbst bei idealer Tür- und Fahrgastverteilung nicht ausgeschöpft werden. Bei grossen Fahrgastwechselzahlen ist dies kaum von Belang und die Diskretisierung fällt wenig ins Gewicht. Bei kleinen Fahrgastwechselzahlen dagegen erhöht sich die mittlere Fahrgastwechselzeit deutlich und die analytisch errechnete effektive Türleistungsfähigkeit ist weiter abzumindern.

2.34.13 Rückstauerscheinungen bei hoher Kursauslastung

Ein hoher Besetzungsgrad des Fahrzeuges führt zur Verlangsamung der Gehgeschwindigkeit der Fahrgäste und zu Rückstauerscheinungen. Die Beschreibung des Phänomens ist nicht einfach, da die Verlängerung der Fahrgastwechselzeit von folgenden drei Faktoren abhängt:

- Bauliche Gestaltung des Stauraumes und der Leistungsfähigkeit der Verbindungen zu den übrigen Fahrzeugbereichen
- Grad der Stehplatzbelegung im Türbereich
- Anteil des Fahrgastwechsels an der Gesamtzahl der Fahrgäste

Der Rückstau durch mangelhafte Abflussverhältnisse ist fahrzeugspezifisch und wurde bereits früher behandelt. Die zweite genannte Ursache macht den Fahrgastwechsel zum dynamischen Problem, indem die Fahrgastwechselzeit vom Zustand des Systems nicht mehr unabhängig ist, sondern sich mit diesem zusammen fortwährend verändert. Im Ablauf des Fahrgastwechsels wird bis zu einem bestimmten Besetzungsgrad des Fahrzeuges keine Behinderung des Fahrgastwechsels festzustellen sein, da sich die zugestiegenen Fahrgäste ungestört im Fahrzeug verteilen können. Erst über einem Schwellenwert wächst die mittlere Fahrgastwechselzeit exponentiell an und im Bereich der maximalen Stehplatzbelegung kommt der Fahrgastwechsel zum Erliegen. Der Belegungsgrad des Einstiegsraumes wiederum ist eine Funktion der Gesamtbesetzung des Fahrzeuges und der Verteilung der Fahrgäste auf die einzelnen Fahrzeugbereiche. Der Anteil des Fahrgastwechsels an der Gesamtbesetzung des Fahrzeuges schliesslich spielt insofern eine Rolle, als dass sehr wenige Aussteiger oder Einsteiger wesentlich stärker von den im Fahrzeug verweilenden Fahrgästen behindert werden, als wenn nahezu alle Fahrgäste gleichzeitig das Fahrzeug besteigen oder verlassen.

2.34.2 Konzept einer Simulation des Gesamtsystems

2.34.21 Entscheidungsverhalten der Fahrgäste

Sollen auch die skizzierten Charakteristiken abgebildet werden, so drängt sich der Schritt zur Simulationstechnik auf. Eine Simulation des Fahrgastwechselvorganges muss die Entscheidungen jedes einzelnen Fahrgastes laufend nachvollziehen und sein Verhalten vom Moment seines Eintrittes in das System (Betreten der Einsteigehaltestelle) bis zum Verlassen (Verlassen der Zielhaltestelle) abbilden. Das System muss dazu so beschrieben werden, dass sich aus dessen Zustand die nächste Entscheidung der Fahrgäste ableiten lässt. Ein Simulationsschritt beinhaltet daher die Neubeschreibung des Systemzustandes und die Ableitung der Reaktion jedes Fahrgastes darauf.

Ein Fahrgast reagiert indessen nicht nur auf die Geschichte und den aktuellen Zustand des Systems, sondern er versucht zusätzlich eine Prognose des künftigen Systemzustandes. Beispielhaft kann dies am Ausweichen von einer überlasteten auf eine benachbarte Türe erläutert werden: Gegeben sei ein Fahrgast, welcher in einer Warteschlange auf den Einstieg wartet. Der Ablauf an dieser Türe sei verzögert und der Fahrgast muss aufgrund der vielen wartenden Fahrgäste davon ausgehen, dass das Einsteigen lange dauern wird. Die benachbarten Türen seien eindeutig weniger ausgelastet. Der Fahrgast wird nun als erstes den Systemzustand analysieren:

- An seiner Türe wird es lange dauern.
- Das Fahrzeug ist an dieser Stelle überfüllt.
- An den anderen Türen warten weniger Fahrgäste.

Zwar ist der Fahrgast aufgrund seiner Systemanalyse zu einem Wechsel der Türe motiviert, doch wird er, bevor er etwas unternimmt, den künftigen Zustand zu prognostizieren versuchen, um Gewähr zu haben, dass er keinen Fehlentscheid trifft:

- Dauert der Einstieg an den anderen Türen nicht auch lange, weil dort beispielsweise ältere Menschen oder Mütter mit Kinderwagen warten?
- Sind die anderen Türen noch offen, wenn er dort eintrifft?
- Wird er dort einen besseren Platz finden?

Jeder Fahrgast wird diese Überlegungen in verschiedener Weise vornehmen. Routinierte Fahrgäste mit hoher Systemkenntnis werden eher auf eine andere Türe ausweichen als weniger routinierte, bei welchen die Angst überwiegt, auf dem Perron zurückgelassen zu werden.

2.34.22 Abbildung des Verhaltens in einem Modell

Ein Simulationsmodell bietet im Gegensatz zu den analytischen Verfahren nunmehr die Möglichkeit einer weitgehenden Nachbildung der Realität. Es besteht grundsätzlich aus den vier Teilmodellen Fahrgast, Anlage, Fahrzeug und Betrieb. Die wesentlichen Kenndaten, welche von den einzelnen Teilmodellen benötigt werden, sind:

Tab. 2-1: Erforderliche Grunddaten zur Aufstellung eines Simulationsmodelles des Fahrgastwechsels.

Fahrgast	Feste Anlagen	Fahrzeug	Betrieb
Horizontalgeschwindigkeit Vertikalgeschwindigkeit Flächenbedarf Entscheidungskriterium	Abmessungen der Wartefläche Abmessungen der Einbauten Lage der Zugänge Lage der Sitzbänke und Billettautomaten Höhe des Perrons	Ort der Türen Breite der Türen Wagenbodenhöhe Innenraumaufteilung mit Lage der Sitz- und Stehplätze Füllungskurven der Fahrzeugbereiche	Besetzungsgrad Verkehrsaufkommen an der Haltestelle Fahrplanabhängigkeit des Fahrgastzuflusses

Die Auflösungsschärfe der Simulation muss sehr klein sein, da der Fahrgastwechselfvorgang oft nur wenige Sekunden dauert. Ein grösserer Schritt als 0.5 s ist kaum zulässig. Dafür spricht auch:

- Die Geschwindigkeit der Registrierung einer Information und der Reaktion des Fahrgastes darauf kann mit etwa einer Sekunde bemessen werden.
- In einer Sekunde legt ein Fahrgast eine Distanz von etwa 0.5 bis 1.0 m zurück. Dies entspricht der Grössenordnung der Auflösungsschärfe des Gesamtsystems.

2.34.3 Unterschiede zu den analytischen Verfahren, Grenzen der Anwendbarkeit

Der Übergang von der deterministischen und statistischen Betrachtung auf die Simulationstechnik ist grundlegend, denn es wird nun nicht mehr das Verhalten eines Kollektivs mit seinen Streuungen, sondern jeder einzelne Fahrgast abgebildet. Die Unterschiede lassen sich vereinfacht folgendermassen zusammenfassen:

Tab. 2-2: Vergleich einer Simulation des Fahrgastwechsels mit deterministischen und stochastischen Betrachtungsweisen.

Kriterium	Deterministische Betrachtungsweise	Stochastische Betrachtungsweise	Simulation
Betrachtete Fahrgasteinheit	Fahrgastgruppe	Fahrgastgruppe	Einzelfahrgäste
Berücksichtigung individueller Merkmale	Nein	Nein	Ja
Eingangsdaten für die Fahrgastwechselzeit	Fahrgastwechselzeit als Mittelwert, identisch für jeden Vorgang	Fahrgastwechselzeit an einer Türe als Verteilungsfunktion mit Erwartungswert und Streuungsparametern	Einsteigezeit jedes einzelnen Fahrgastes aufgrund der dafür relevanten Eigenschaften
Verteilung der Fahrgäste auf die Türen	Zahl der Fahrgäste im Einzugsgebiet der Türe auf dem Perron oder im Fahrzeug	Zahl der Fahrgäste im Einzugsgebiet der Türe auf dem Perron oder im Fahrzeug	Einzelentscheide der ein- und aussteigewilligen Fahrgäste aufgrund des aktuellen Systemzustandes
Kenntnis des Fahrzeugzustandes	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich	Erforderlich mit Kenntnis der Verteilung aller Fahrgäste auf die zur Verfügung stehenden Türen
Resultat	Fahrgastwechselzeit als Mittelwert ohne Streuung	Fahrgastwechselzeit als Verteilungsfunktion mit Erwartungswert und Streuungsparametern	Fahrgastwechselzeit als Verteilungsfunktion mit Erwartungswert und Streuungsparametern
Geschlossene Darstellung	Ja	Ja	Nein

Bei der Entwicklung und Anwendung einer Simulation sind folgende Probleme nicht ausser acht zu lassen:

- Die *Qualität der Simulationsergebnisse* hängt ursächlich von der Qualität der Eingabedaten ab. Will man das Verhalten der Fahrgäste korrekt abbilden, so müssen deren Eigenschaften genau bekannt sein. Des öfteren fehlen allerdings die benötigten Informationen.
- Die *Vergleichbarkeit verschiedener Simulationsergebnisse* und die *Nachvollziehbarkeit* kann Schwierigkeiten bereiten, da selbst bei einem sehr einfachen Vorgang eine

beträchtliche Zahl von Freiheitsgraden vorliegt. Um zuverlässige Angaben zu erhalten, sind sehr viele Simulationsläufe erforderlich.

- Die *Reproduzierbarkeit von Ergebnissen* ist erschwert, da jedes einzelne Ergebnis das Resultat von unzähligen Zufallsentscheidungen ist, deren Rückwirkungen auf das Gesamtsystem kaum zu erkennen sind.
- Die *Anwendung* ist wegen der grossen Zahl der erforderlichen Ausgangsdaten umständlich. Die Erstellung des Modells des Systems verursacht einen hohen Basisaufwand, sodass sich die Hauptarbeit vom Rechenprozess zur Modellbildung verschiebt.
- Die grosse Zahl der Freiheitsgrade und die vielen zu simulierenden Elemente (bei einem Fahrgastwechsel eines S-Bahn-Zuges können ohne weiteres 1000 Fahrgäste beteiligt sein) erfordern eine *grosse Rechenkapazität*.

Aus diesen Gründen muss im Rahmen dieser Arbeit auf eine Simulation verzichtet werden.

2.4 Die Fahrgastwechselzeit einer Fahrt

2.4.1 Türleistungsfähigkeit und mittlere Fahrgastwechselzeit unabhängig von Fahrgastwechselzahl

Die Gesamtfahrgastwechselzeit $t_{h,ftot}$ einer Fahrt ist die Summe der Fahrgastwechselzeiten an jeder Haltestelle $t_{h,fi}$:

$$(2-81) \quad t_{h,ftot} = \sum_{i=1}^{i=n} t_{h,fi}$$

wobei $t_{h,ftot}$ Gesamtfahrgastwechselzeit einer Fahrt [s]
 $t_{h,fi}$ Fahrgastwechselzeit an den einzelnen Haltestellen [s]

Zwischen Linienlänge oder Haltestellenzahl, maximaler Querschnittsbelastung, Fahrgastzahl und Gesamtfahrgastwechselzahl bestehen verschiedene Zusammenhänge. Zunächst setzt sich die Summe der Fahrgastwechselzahlen F_i an den Haltestellen i aus allen Einsteigern und allen Aussteigern zusammen:

$$(2-82) \quad F_{tot} = \sum F_i = \sum E_i + \sum A_i$$

wobei F_i Fahrgastwechselzahl an der Haltestelle i [P]
 E_i Zahl der Einsteiger an der Haltestelle i [P]
 A_i Zahl der Aussteiger an der Haltestelle i [P]
 F_{tot} Gesamtfahrgastwechselzahl; Fahrgastwechselzahl der gesamten Fahrt [P]

Die Gesamtfahrgastwechselzahl entspricht gleichzeitig dem Doppelten der Gesamtzahl der auf einer Fahrt beförderten Fahrgäste F_K :

$$(2-83) \quad F_{tot} = 2 \cdot F_K$$

wobei F_K Fahrgastzahl während der Fahrt eines Kurses [P]

Die Fahrgastzahl F_K kann zur maximalen Auslastung des Kurses während einer Fahrt $Q_{K,Qmax}$ ins Verhältnis gesetzt und damit ein Umschlagfaktor $q_{K,U}$ bestimmt werden:

$$(2-84) \quad q_{K,U} = \frac{F_K}{Q_{K,Qmax}}$$

wobei $q_{K,U}$ Umschlagfaktor [-]
 $Q_{K,Qmax}$ Maximale Auslastung des Kurses während einer Fahrt [P]

Mittels dieses Umschlagfaktors kann in Kenntnis der Höchstaustausung einer Fahrt auf den Umfang des Fahrgastwechsels geschlossen werden, wobei die maximale Auslastung nicht mit dem Fassungsvermögen des Kurses übereinstimmen muss. Je mehr Haltestellen eine Linie aufweist, je mehr Kurzstreckenfahrgäste befördert und je mehr Verkehrszentren bedient werden, desto grösser wird ausserdem der Fahrgastumschlag, ohne dass sich deswegen die maximale Querschnittsbelastung erhöhen müsste. Der Umschlagfaktor ist deshalb von der Linienlänge beziehungsweise der Haltestellenzahl, aber auch von der Funktion der Linie abhängig:

$$(2-85) \quad q_{K,U} = l_L \cdot k_L$$

wobei l_L Länge der öffentlichen Verkehrslinie [m]
 k_L Verkehrsdichtenkonstante der Verkehrslinie [m^{-1}]

Damit kann der Umschlagfaktor auf die Eigenschaften der betreffenden Linie zurückgeführt werden. Sind der Umschlagfaktor und die maximale Querschnittsbelastung während einer Fahrt bekannt, so lässt sich auch die Fahrgastwechselzahl der ganzen Fahrt ermitteln:

$$(2-86) \quad F_{tot} = 2 \cdot q_{K,U} \cdot Q_{K,Qmax} = 2 \cdot l_L \cdot k_L \cdot Q_{K,Qmax}$$

Aus der Türleistungsfähigkeit $L_{T,K}$ des Kurses ergibt sich nun die Gesamtfahrgastwechselzeit $t_{h,ftot}$ einer Fahrt:

$$(2-87) \quad t_{h,ftot} = \frac{F_{tot}}{L_{T,K}}$$

wobei $t_{h,ftot}$ Gesamte Fahrgastwechselzeit zwischen zwei Endstationen [s]
 $L_{T,K}$ Leistungsfähigkeit des Türsystems eines Kurses [P/s]

Die gesamte Fahrgastwechselzeit einer Fahrt kann schliesslich direkt mit der maximalen Querschnittsbelastung der Linie ausgedrückt werden:

$$(2-88) \quad t_{h,ftot} = \frac{2 \cdot l_L \cdot k_L \cdot Q_{K,Qmax}}{L_{T,K}}$$

2.42 Variable mittlere Fahrgastwechselzeit

2.42.1 Mittlere Fahrgastwechselzeit des Kurses

Die dargestellte Überschlagsrechnung ist sehr ungenau, weil namentlich die Türleistungsfähigkeit abhängig von der Grösse des Fahrgastwechsels ist und weil die Streuungen vernachlässigt wer-

den. Die nominelle Leistungsfähigkeit darf daher zur Berechnung der Fahrgastwechselzeiten eines Kurses nicht verwendet werden. Vielmehr muss man sich dazu auf die aus der effektiven Türleistungsfähigkeit abgeleitete effektive mittlere Fahrgastwechselzeit $t'_{h,fm}$ unter Berücksichtigung der jeweiligen Fahrgastwechselzahl stützen.

2.42.2 Verteilungsfunktion der Gesamtfahrgastwechselzahl

Die Gesamtfahrgastwechselzahl genügt somit nicht, sondern zusätzlich müssen Angaben über die Grössenverteilung der einzelnen Fahrgastwechselzahlen gegeben sein. Grosse Fahrgastwechselzahlen sind selten, kleinere dagegen häufig. Bei einer bestimmten Fahrt folgen die auftretenden Fahrgastwechselzahlen einer Verteilungsfunktion. Die Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzahlen lässt sich für die Absolutwerte, aber auch für die relativen Fahrgastwechselzahlen $q_{F,rel i}$ aufstellen. Dazu werden die Fahrgastwechselzahlen F_i an den einzelnen Haltestellen i auf die maximal beobachtete Querschnittsbelastung bezogen:

$$(2-89) \quad q_{F,rel i} = \frac{F_i}{Q_{K,Qmax}}$$

wobei $q_{F,rel i}$ Relative Fahrgastwechselzahl an der Haltestelle i [-]

Diese Darstellungsform nimmt auf die jeweilige Maximalbelastung Bezug und ist deshalb von deren absoluter Höhe unabhängig. Die Summenkurve der relativen Fahrgastwechselzahlen nimmt den gleichen Verlauf wie jene für die Absolutwerte und kann für alle Belastungsgrade verwendet werden. Mit ihr und mit der Maximalbelastung der Fahrt lässt sich bestimmen, welcher Anteil aller Fahrgastwechsel eine bestimmte Grösse nicht übersteigt. Zur Beschreibung der nicht-symmetrischen Verteilung der Fahrgastwechselzahlen kann wiederum die Erlang-k-Funktion verwendet werden:

$$(2-90) \quad P(\kappa) = e^{-k \cdot \kappa} \cdot \sum_{n=0}^{n=\kappa-1} \frac{(k \cdot \kappa)^n}{n!}$$

wobei $P(\kappa)$ Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzahlen; Wahrscheinlichkeit, dass relative Fahrgastwechselzahl eine bestimmte Grösse κ nicht übersteigt [-]

κ Bestimmte Grösse der relativen Fahrgastwechselzahl $q_{F,rel i}$ [-]

Der genaue Kurvenverlauf hängt mit der Funktion der Linie zusammen. Bei einer Radial- oder Durchmesserlinie sind vereinzelt grosse Spitzen in der Innenstadt und ausgesprochen tiefe Werte auf den Aussenästen zu erwarten. Bei einer Tangentiallinie, welche verschiedene Radiallinien miteinander verbindet, ist die Zahl mittelgrosser Fahrgastwechsel beträchtlich, während die Spitzenwerte eher tiefer liegen dürften.

2.42.3 Gesamtfahrgastwechselzeit

Ist von einer Kursfahrt die Zahl der Haltestellen, die maximale Querschnittsbelastung und die Standardverteilung der Fahrgastwechselzahlen bekannt, so kann aus den beiden letzteren Angaben die Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzahlen dieser Kursfahrt aufgestellt werden. Als nächstes ist der Wahrscheinlichkeitsbereich zwischen 0 und 100 % in die Intervalle der n Haltestellen zu unterteilen. Daraus ergeben sich die n Erwartungswerte der Fahrgastwechselzahlen F_i der betreffenden Fahrt, allerdings ohne die Reihenfolge des Auftretens. Die Summe aller Fahrgastwechselzahlen F_i muss wiederum dem Doppelten der Fahrgastzahl der Kursfahrt entsprechen, wie dies früher mit dem Umschlagfaktor ermittelt wurde.

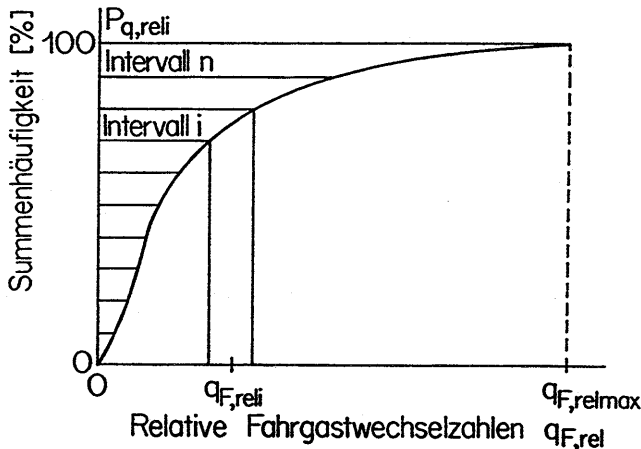


Abb. 2-37: Unterteilung der Verteilungsfunktion in n Intervalle und zugehörige Fahrgastwechselzahlen F_i .

Damit und mit den zu den Fahrgastwechselzahlen gehörenden Türleistungsfähigkeiten lassen sich für die n Haltestellen die Fahrgastwechselzeiten $t_{h,fi}$ ermitteln und abschliessend für die ganze Strecke zur Gesamtfahrgastwechselzeit $t_{h,ftot}$ aufsummieren:

$$(2-91) \quad t_{h,ftot} = \sum_{i=1}^{i=n} t_{h,fi} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{F_i}{L'_{T,Ki}}$$

wobei	$t_{h,fi}$	Fahrgastwechselzeit der Haltestelle i [s]
	$t_{h,ftot}$	Gesamtfahrgastwechselzeit einer Kursfahrt [s]
	F_i	Fahrgastwechselzahl der Haltestelle i [P]
	$L'_{T,Ki}$	Effektive Türleistungsfähigkeit des Kurses bei Fahrgastwechselzahl F_i [P/s]

2.43 Berücksichtigung der Fahrzeugbesetzung

2.43.1 Möglichkeiten und Grenzen

Wie bereits begründet ist die Verzögerung des Fahrgastwechsels bei hohem Besetzungsgrad einer analytischen Lösung nicht zugänglich. Da es sich dabei aber um ein wesentliches Element der Betriebsabwicklung handelt, muss zumindest eine näherungsweise Abschätzung möglich sein. Zunächst ist die kritische Besetzung des Fahrzeuges zu ermitteln, bei welchem die Verzögerung beginnt. Dieser kritische Besetzungsgrad des Fahrzeuges ist gegeben, wenn die Auf-

fangräume der Einstiege den kritischen Stehplatzbelegungsgrad überschreiten. Nun ist abzuschätzen, wieviele Fahrgastwechselforgänge in welchem Ausmass von der Behinderung betroffen sind. Die oben hergeleitete Verteilungsfunktion liefert allerdings nur Informationen über die Grössenverteilung der auftretenden Fahrgastwechsel, nicht aber über den Ort des Auftretens entlang der Linie. Es ist demnach ein weiteres Modell erforderlich.

2.43.2 Besetzungsgrad entlang einer Linie

Eine Linie des öffentlichen Verkehrs durchfährt verschieden dicht besiedeltes Gebiet mit wichtigeren und weniger wichtigen Haltestellen. Sind deren Frequenzen aus Zählungen bekannt, so können sie direkt verwendet werden. Ist dies nicht möglich, so muss eine vereinfachte Situation als Grundlage genommen werden. Dazu sind verschiedene Linientypen auszuscheiden, welche einen charakteristischen Verlauf der Fahrgastwechselzahlen aufweisen. Im einfachsten Fall kann angenommen werden, dass die Fahrgastwechselzahlen an jeder Haltestelle gleich gross sind. Im weiteren müssen Annahmen über die Ein- und Aussteigerverhältnisse getroffen werden. Die Anteile verschieben sich naturgemäss von der Anfangs- zur Endhaltestelle zugunsten der Aussteiger, wobei bereits im Zulauf zum maximal belasteten Querschnitt Aussteigervorgänge auftreten. Würde man davon ausgehen, dass bis zum meistbelasteten Querschnitt nur Einsteiger und von dort bis zum Linienende nur Aussteiger auftreten, so würde der Umschlagfaktor genau 1.0 betragen.

Im einfachsten Modell mit identischen Fahrgastwechselzahlen an jeder Haltestelle nimmt der Aussteigeranteil vom Linienanfang zum Linienende kontinuierlich von 0 auf 100 % zu. Realistischer ist allerdings ein dreiecksförmiger Verlauf der Fahrgastwechselzahlen mit tiefen Werten auf den beiden Aussenästen und hohen Fahrgastwechselzahlen im Innenstadtbereich mit seinen zahlreichen Kurzstreckenfahrern. Zu normieren sind die Fahrgastwechselmodelle mit den maximalen Querschnittsbelastung, mit dem Linienumschlagfaktor und damit mit der gesamten Fahrgastwechselzahl.

Die Fahrzeugbesetzung ist nun schrittweise zu errechnen, um den Zeitpunkt der kritischen Fahrzeugbesetzung zu erkennen. Summiert man die Einsteiger- und Aussteigerzahlen auf, so lässt sich für jeden Ort direkt die momentane Fahrzeugbesetzung ablesen:

$$(2-92) \quad Q_{K,i} = \sum_{i=1}^{i=k} E_i - \sum_{i=1}^{i=k} A_i$$

wobei $Q_{K,i}$ Gesamtbesetzung des Fahrzeuges nach der Haltestelle i [P]

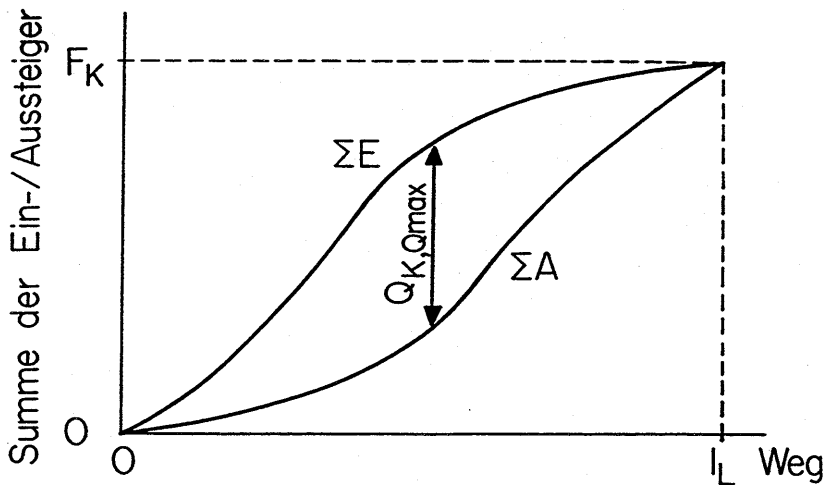


Abb. 2-38: Summenkurve der Ein- und Aussteiger entlang einer Nahverkehrslinie und momentane Fahrzeugbesetzung (oben), Fahrzeugbesetzungsgrad (unten).

Ist der Fahrzeugtyp mit den massgebenden Parametern bekannt und kennt man die Gesetzmässigkeiten der Verteilung der Fahrgäste im Fahrzeug, so lässt sich der für den verzögerten Fahrgastwechsel massgebende Stehplatzbelegungsgrad in den Stauräumen sowie der zugehörige Verzögerungsfaktor für jede Haltestelle bestimmen.

2.43.3 Verlängerung der Fahrgastwechselzeit

Die mutmassliche Verlängerung der Gesamtfahrgastwechselzeit ergibt sich als Differenz zwischen unbehindertem und behindertem Fahrgastwechsel. Die Gesamtfahrgastwechselzeiten mit und ohne Berücksichtigung der Behinderung lassen sich einander gegenüberstellen. Daraus ergibt sich ein Verzögerungsfaktor für die gesamte Fahrt, welcher eine Funktion der maximalen Fahrzeugauslastung ist:

$$(2-93) \quad q_{F,St} = \frac{(t_{h,ftot} + t_{h,fSt})}{t_{h,ftot}}$$

wobei $q_{F,St}$ Rückstaufaktor für Gesamtfahrgastwechselzeit [-]
 $t_{h,fSt}$ Gesamte Verlängerung der Fahrgastwechselzeit durch Fahrgastrückstau [s]

Dieser Rückstaufaktor kann als Funktion der betrachteten maximalen Querschnittsbelastung ausgedrückt werden. Damit und mit der Gesamtfahrgastwechselzeit im unbehinderten Fall kann direkt die Fahrgastwechselzeit im behinderten Fall errechnet werden.

2.44 Streuungen der Gesamtfahrgastwechselzeit

Auch das Fahrgastaufkommen einer Linie unterliegt systematischen und zufälligen Schwankungen:

- *Systematische Schwankungen* entstehen als Folge der im Tagesverlauf unterschiedlichen Mobilitätsbedürfnisse der Fahrgäste sowie infolge der Anschlussverhältnisse zu anderen Linien.
- *Stochastische Schwankungen* werden verursacht durch die Zufälligkeiten, denen das Mobilitätsverhalten der Fahrgäste unterliegt, durch nicht-planmäßige Anschlussverhältnisse als Folge von Störungen des Betriebsablaufes und durch eine ebenfalls störungsbedingte Abweichung des Fahrgastandranges vom Normalwert. Letzteres ist meist die Folge von Unregelmässigkeiten der Kursfolgezeit, wobei davon in der Regel zwei, oft sogar mehrere Kurse betroffen sind.

Eine genaue Beschreibung dieser Phänomene sprengt den Rahmen der vorliegenden Arbeit, weshalb es mit diesem allgemeinen Hinweis sein Bewenden haben muss.

3 Beschreibung der beteiligten Systemkomponenten

3.1 Fahrgast

3.1.1 Eigenschaften der Fahrgäste

3.1.1.1 Geschlecht und Alter

3.1.1.1.1 Geschlecht

Das natürliche Geschlechterverhältnis beträgt bei Neugeborenen 51.2 % Knaben zu 48.8 % Mädchen. Durch Wanderungsbewegungen kann namentlich in Agglomerationen zunächst ein statistischer Männer-Überhang erhalten bleiben. Deren höhere Sterblichkeit verschiebt das Verhältnis allmählich zugunsten der Frauen. In der Alterskategorie von 40 bis 44 Jahren wird der Gleichstand erreicht, in der Altersgruppe zwischen 85 und 89 kommen auf 100 Frauen nur noch 40 Männer [483].

Die in der Praxis auftretenden Fußgänger- und Fahrgastkollektive werden sich allerdings kaum je so zusammensetzen, dass beide Geschlechter dem statistischen Mittel entsprechend vertreten sind. Die Differenzen entstehen durch die unterschiedliche Lebensweise sowie durch eine abweichende Verkehrsmittelwahl. Beispielhaft hat dies [331] für den Fußgängerverkehr einer Geschäftsstrasse in Bonn untersucht und dabei zusätzlich einen Tagesgang sowie einen Wochengang festgestellt.

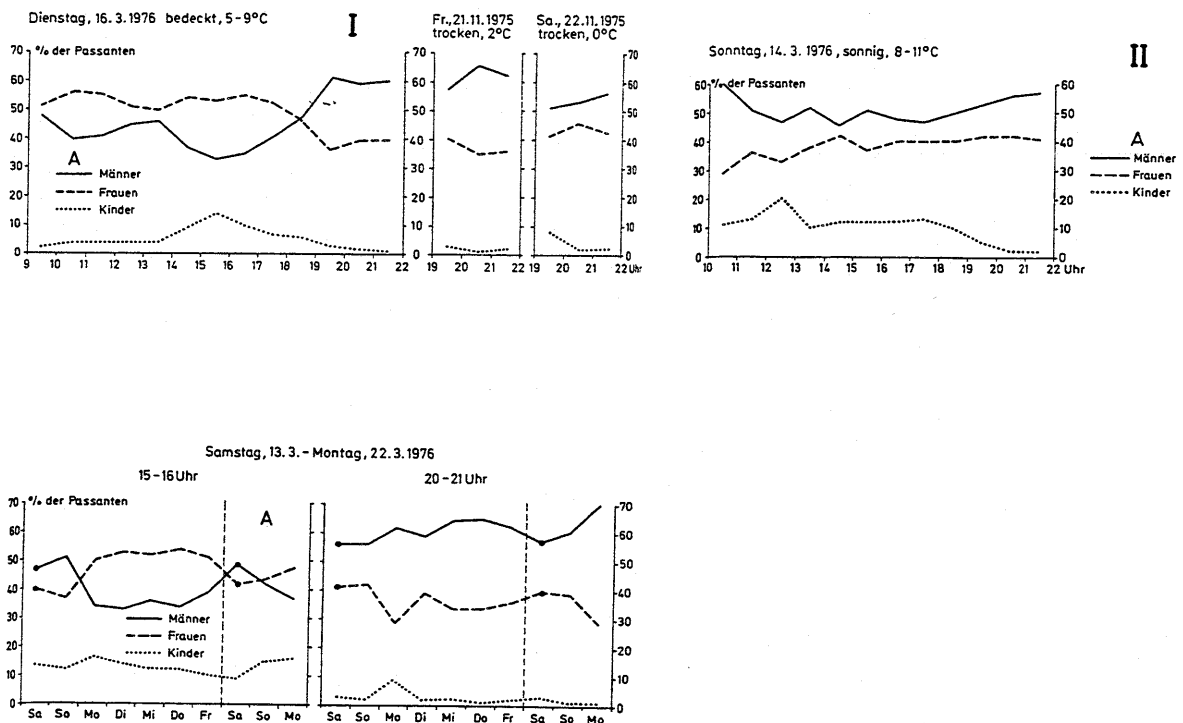


Abb. 3-1: Passantenstruktur nach Geschlecht in der Sternstrasse in Bonn. Oben: Tagesganglinie; unten: Wochenganglinie [331].

3.11.12 Alter

Ebenfalls nur eine mässige Aussagekraft hat die Altersverteilung in der Bevölkerung. Wesentlich sind aber zwei Feststellungen:

- Die relative Bedeutung der Alterskategorien schwankt von Jahrgang zu Jahrgang. Kommen geburtenstarke Jahrgänge ins höhere Alter, so steigen dadurch das Durchschnittsalter und der Anteil der älteren Bevölkerung.

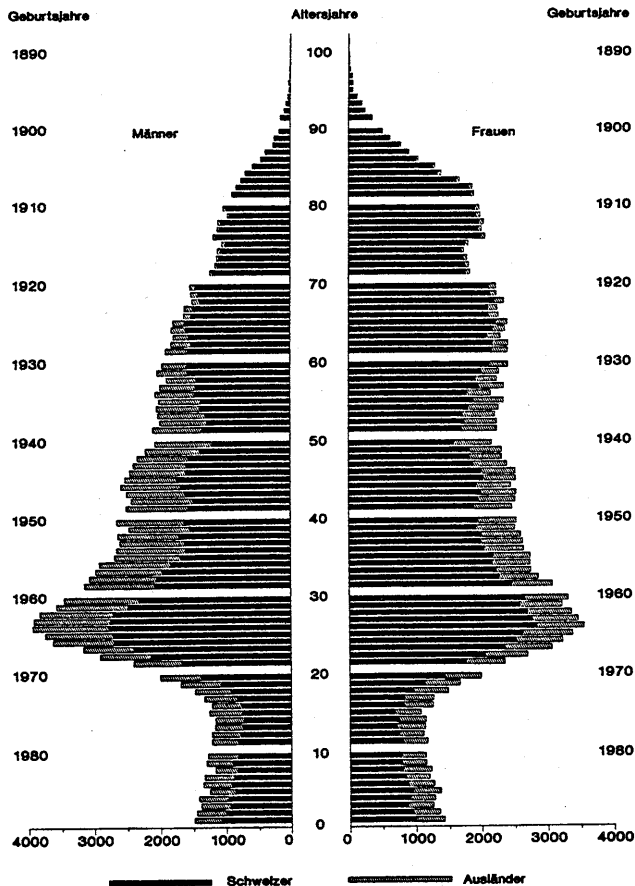


Abb. 3-2: Alterspyramide der Stadt Zürich, Stand 1990 [483].

- Die Lebenserwartung nimmt seit Jahren konstant zu und liegt in der Schweiz für Frauen bei 81, für Männer bei 74 Jahren. 1880 betrug sie noch 44 beziehungsweise 41 Jahre. Zurückzuführen ist diese Entwicklung weitgehend darauf, dass immer mehr Angehörige eines Jahrganges in ein hohes Alter gelangen, weniger aber auf den Anstieg des erreichten Höchstalters. Begründet wird die Erscheinung mit der gesünderen Ernährung, der besseren Hygiene, der grösseren Sicherheit am Arbeitsplatz und dem ausgebauten Gesundheitswesen [394].

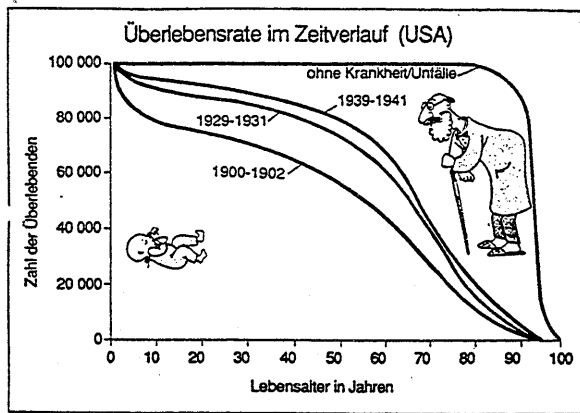


Abb. 3-3: Überlebensrate von jeweils 100'000 US-Amerikanern in aufeinanderfolgenden Zeiträumen. Die oberste Linie stellt die theoretische Überlebenskurve ohne Krankheiten oder Unfälle dar [394].

Entsprechend wächst der Anteil Betagter an der Gesamtbevölkerung laufend:

Tab. 3-1: Anteil der Bevölkerung über 65 Jahre [160].

Staat	Bevölkerung über 65 Jahre, in %			
	1950	1985	2000	2020
Japan	4.9	10.3	16.3	23.6
USA	8.1	11.9	12.8	17.3
Grossbritannien	10.7	15.1	15.4	18.7
BRD	9.4	14.7	16.8	22.3
Frankreich	11.4	13.0	15.3	19.1
Schweden	10.3	17.9	17.6	22.8
Schweiz	9.6	14.4	15.9	21.3

Es ist daher insgesamt im öffentlichen Verkehr mit einem höheren Anteil mobilitätsbehinderter Menschen bei starkem Wachstum des Anteils mobilitätsbehinderter Senioren in der Altersgruppe zwischen 70 und 90 Jahren zu rechnen.

3.11.2 Grösse und Körperproportionen

3.11.21 Grössenverteilung

Das Grössenwachstum des Menschen verläuft nahezu stetig und zeigt nur im Alter von etwa 8 bis 12 Jahren eine leichte Verzögerung. Mädchen erreichen ihre endgültige Körpergrösse mit etwa 17 Jahren, Knaben mit 18. In Mitteleuropa messen derzeit Männer 178.5 cm und Frauen 166.0 cm. Für beide Geschlechter zusammen liegt der Mittelwert der Körpergrösse bei 172.3 cm. Die Grössenverteilung innerhalb eines Geschlechts entspricht etwa der Normalverteilung mit einer Standardabweichung von 3.3 % der mittleren Körpergrösse [120], [212], [241]. In südlichen und asiatischen Ländern sind die Menschen kleiner als in Mitteleuropa, Männer beispielsweise in

Frankreich 3 %, in Italien 4 %, in Japan 6 %, in Thailand 8 % und in Vietnam 9 % [110]. Gemäss [241] sind erwachsene Mitteleuropäer auch 1 bis 2 cm grösser als Einwohner von Grossbritannien.

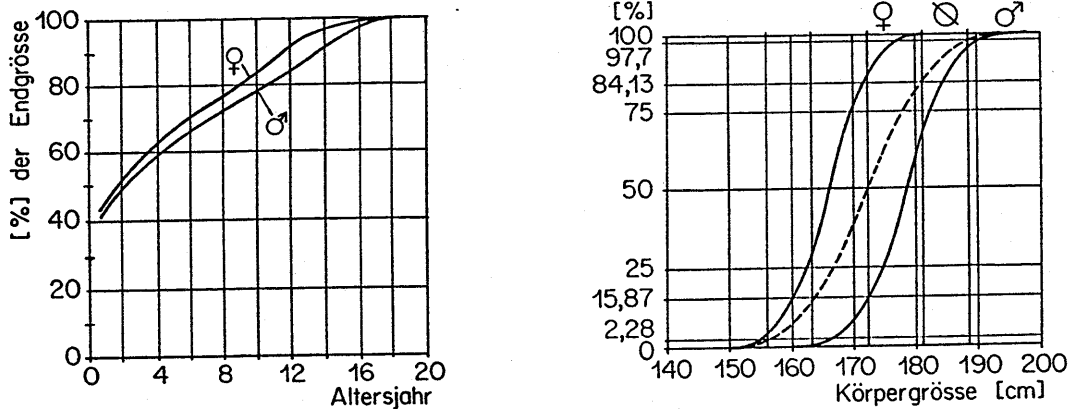


Abb. 3-4: Links: Wachstumsverlauf von Kindern in Prozenten der erreichten Endgrösse. Rechts: Grössenverteilung erwachsener Menschen in Mitteleuropa, nach Geschlecht und insgesamt.

Zu beachten ist bei den genannten Werten die Akzeleration, worunter der Anstieg der Durchschnittsgrösse um über 1 cm pro Jahrzehnt verstanden wird. Erklärt wird sie mit den veränderten Essgewohnheiten, namentlich der Verwendung von raffiniertem Zucker. In jüngster Zeit scheint sie sich zu verlangsamen [120], [212].

3.11.22 Körperproportionen und Platzbedarf

Die maximale Körperbreite beträgt für mittlere Verhältnisse und ohne Berücksichtigung der Kleidung bei Männern und Frauen 0.46 m (27 % der Körpergrösse). Die Körpertiefe beläuft sich auf 0.23 m (13 % der Körpergrösse). Der 97.5 %-Wert dieser Zahlen liegt bei etwa 0.50 m beziehungsweise 0.27 m [120]. Der Platzbedarf als minimale auf den Boden projizierte Grundfläche des Rumpfes ergibt sich ohne Standfläche der Füsse näherungsweise als Ellipse mit der Körperbreite und der Körpertiefe als Hauptachsen. Aufgrund der Angaben von [120] beträgt Mindestplatzbedarf ohne Kleidung und ohne Gepäckstücke demnach rund 0.085 m², was einer Personendichte von 11.8 P/m² entspricht. Berechnet man die Grundfläche zur Berücksichtigung der nicht auffüllbaren Zwischenräume als Rechtecke, so beansprucht ein Mensch 0.11 m², was eine Grenzdichte von 9.3 P/m² ergibt.

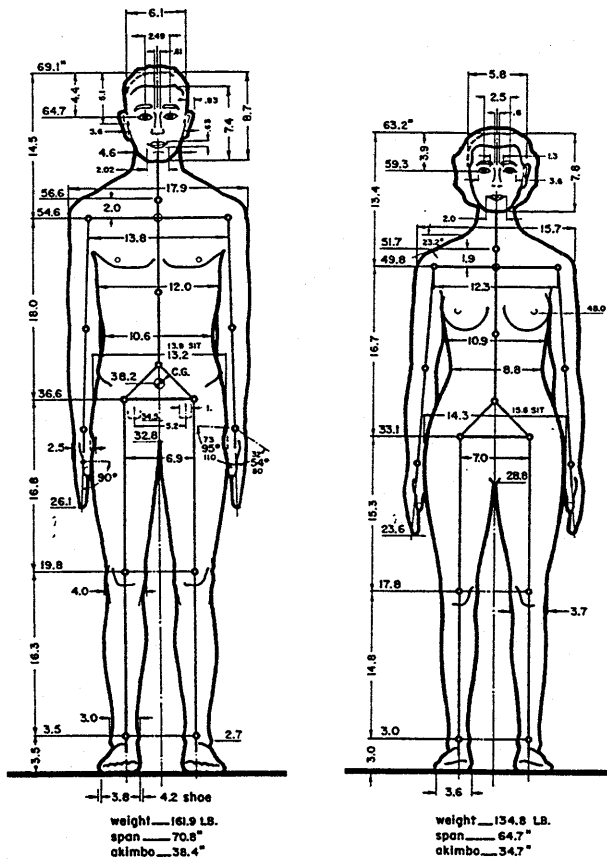


Abb. 3-5: Anthropometrische Daten eines stehenden Mannes und einer stehenden Frau, Durchschnittswerte für USA-Bevölkerung ca. 1960, alle Angaben in [inch] (1 inch = 0.025 m; Abbildung: [120]).

Der Platzbedarf eines stehenden Menschen unter praktischen Bedingungen umfasst zusätzlich die Standfläche der Füße, die Kleidung sowie die nicht ausgefüllten Zwischenräume. Die wenigen Angaben dazu schwanken stark. Mit hinreichender Genauigkeit kann davon ausgegangen werden, dass die Projektion des Körperumrisses unter Berücksichtigung der genannten Faktoren im Mittel eine Fläche von etwa $0.15 \text{ m}^2/\text{P}$ beansprucht, also rund das Doppelte der minimalen projizierten Fläche, was eine maximale Personendichte von 6.6 P/m^2 zulässt [56], [229], [399].

3.11.3 Behinderungen

3.11.31 Definition der Behinderungen

Der öffentliche Verkehr spricht im Unterschied zum Individualverkehr die gesamte Bevölkerung an. Seine Fahrgäste können daher in vielerlei und sehr unterschiedlicher Weise mit der Benützung öffentlicher Verkehrsangebote Mühe bekunden. Alle Fahrgäste, welche aus einem bestimmten Grund nicht über die Beweglichkeit und Leistungsfähigkeit einer gesunden erwachsenen Person ohne Gepäck verfügen, werden unter dem Begriff der Mobilitätsbehinderten zusammengefasst. Die Mobilitätsbehinderungen lassen sich in folgende drei Hauptkategorien unterteilen [171], [264], [473], [524]:

1. **Reisebehinderungen:** Eine Reisebehinderung entsteht zum Beispiel durch Gepäck, Fahrräder, Kinderwagen oder Hunde. Schwierigkeiten bei der Benützung öffentlicher Verkehrsmittel haben ferner werdende Mütter, Reisende mit Gepäckkarren oder Einkaufswagen sowie Orts-, Sprach- und Systemunkundige. Eine Reisebehinderung ist situations- beziehungsweise reisezweckabhängig und kann alle Fahrgäste treffen.
2. **Altersbehinderungen:** Altersbehinderungen sind alle reduzierten körperlichen Fähigkeiten, welche natürlicherweise und einzig als Folge des Alters eines Fahrgastes auftreten. Diese Behindertenkategorie umfasst sowohl die kleinen Kinder als auch die Betagten.
3. **Behinderungen im engeren Sinn:** Behinderte im engeren Sinn weisen nicht die aufgrund ihres Alters zu erwartenden körperlichen Fähigkeiten auf, indem eine oder mehrere wesentliche Funktionen seit Geburt, infolge einer Krankheit oder durch einen Unfall geschwächt sind.

Die Behinderten im engeren Sinn lassen sich in folgende vier Gruppen weiter unterteilen [78], [365], [474]:

- Körperbehinderte
- Sehbehinderte
- Hörbehinderte
- Geistig Behinderte

Bezüglich des Fahrgastwechsels und der Einstiegsgestaltung sind vorwiegend die Körperbehinderten von Belang. Diese Gruppe umfasst folgende drei Behinderungsarten (nach [474]):

- **Gehbehinderte:** Sie können nur mühsam gehen beziehungsweise sind auf Gehhilfen angewiesen. Sie können zu Fuss keine grossen Strecken zurücklegen und Niveauunterschiede nur mit Schwierigkeiten überwinden.
- **Rollstuhlfahrer:** Sie können sich nur mit einem Rollstuhl fortbewegen.
- **Arm- beziehungsweise Handbehinderte:** Sie können ihre Arme oder Hände nur mühsam oder gar nicht gebrauchen.

Zwischen den Behinderungs-Hauptkategorien treten sieben Kombinationen auf, zum Beispiel ältere Menschen mit Gepäck oder kleine Kinder mit einer Körperbehinderung.

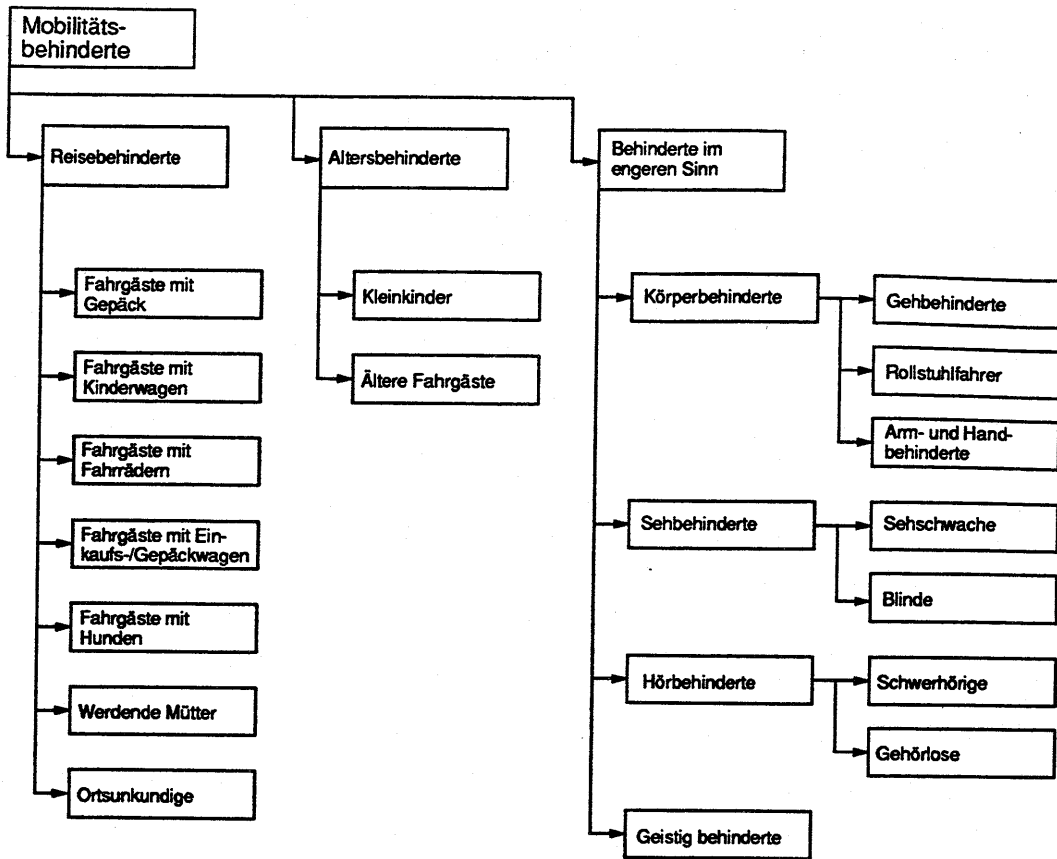


Abb. 3-6: Systematik der mobilitätsbehinderten Fahrgäste.

3.11.32 Bewegungseinschränkungen

Altersbehindert sind sowohl kleine Kinder als auch ältere Menschen. Kindern wird die Benützung öffentlicher Verkehrsmittel weniger durch fehlende Leistungsfähigkeit oder Beweglichkeit erschwert, als vielmehr dadurch, dass die Masse der Fahrzeugtreppen nicht auf sie abgestimmt sind. Setzt man die Behinderungsgrenze bei einer Körpergröße von 120 cm an, so sind Kinder im Alter von unter etwa sieben Jahren als altersbehindert zu betrachten. Eine leistungs- und beweglichkeitsbedingte Behinderung tritt im höheren Lebensalter auf und parallel dazu steigt der Anteil der altersbehinderten Personen exponentiell an. Zwischen dem fünfzigsten und dem achtzigsten Altersjahr verzehnfacht sich beispielsweise der Prozentsatz der Menschen, welche keine Treppen mehr zu bewältigen vermögen [218]. Als Definitionsgrenze der Altersbehinderung eignet sich das siebzigste Altersjahr gut.

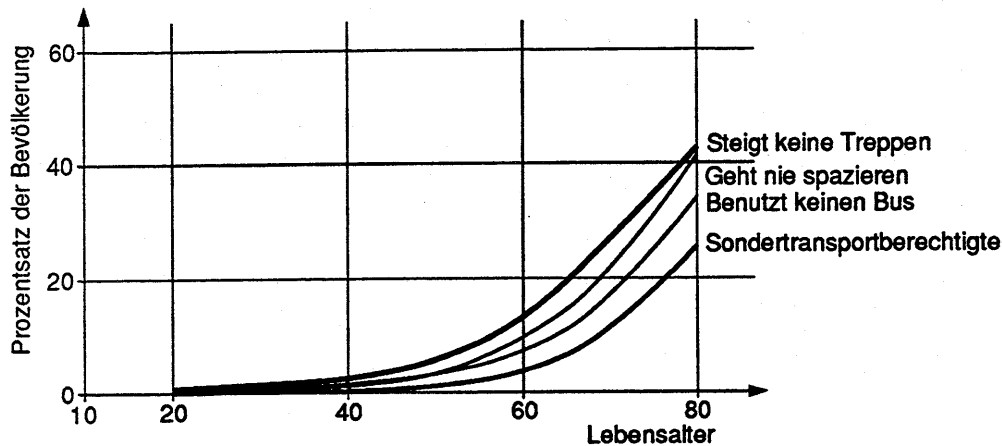


Abb. 3-7: Mobilitätsbehinderungen bei verschiedenen Alterskategorien (nach [218]).

Eine Zählung aus Belgien erwähnt [45], wonach bei den über 65-jährigen Menschen mit folgenden Altersbehinderungen zu rechnen ist:

- | | | |
|---|---|--------|
| • | bettlägrig | 2.0 % |
| • | unfähig, das Haus zu verlassen | 15.0 % |
| • | Schwierigkeiten beim Verlassen des Hauses | 15.4 % |
| • | keine Schwierigkeiten beim Verlassen des Hauses | 67.6 % |

[299] hat beobachtet, dass 30 % der älteren Fahrgäste bereits bei einer Höhendifferenz von nur 150 mm auf die Benützung mindestens eines Handgriffes angewiesen sind und sogar 70 % sind es bei 300 mm. 20 % sind unfähig, eine Stufe von 300 mm zu überwinden. In Berlin sind 9 % der Betagten nicht in der Lage, öffentliche Verkehrsmittel ohne fremde Hilfe zu benützen, weitere 8 % haben dabei grosse Schwierigkeiten. Die analogen Werte lauten für den Bevölkerungsdurchschnitt der Stadt auf 3 % beziehungsweise 4 % [234].

Rollstuhlfahrer können nach [78] Höhendifferenzen und Spaltbreiten von 50 mm ohne fremde Hilfe bewältigen. Eine engere Grenze setzt [474] mit 30 mm, welche nach Auskunft von Behinderter auch für Elektrorollstühle gilt. Dies stellt gleichzeitig das Minimalmass dar, bei welchem Blinde einen Absatz zu erkennen vermögen [79]. Mit Unterstützung durch eine Drittperson können Hindernisse bis zu einer Höhendifferenz von 120 mm ohne grössere Schwierigkeiten überwunden werden [78], [365], [474]. Die Beobachtung, wonach dies guttrainierten Rollstuhlfahrern bei Höhendifferenzen von 80 bis 100 mm und Spaltbreiten von 50 bis 80 mm alleine sowie mit Hilfe von geübten Begleitpersonen sogar bei Höhendifferenzen bis 200 mm gelingt, darf hingegen nicht massgebend sein, da nur die wenigsten Rollstuhlfahrer zu dieser Leistung fähig sind [172], [173]. Ausserdem verfügen öfters auch die Hilfspersonen nur über eine reduzierte körperliche Leistungsfähigkeit.

Die Bandbreite der wünschbaren bis akzeptablen Hindernishöhen schränkt sich somit auf zwischen 30 und 120 mm ein. Dies steht im Einklang mit der Empfehlung von [365], wonach im Interesse der Gehbehinderten auf Stufenhöhen von über etwa 100 bis 120 mm zu verzichten ist, und mit der Beobachtung von [46], wonach Gehbehinderten eine Stufenhöhe bis 110 mm keine grossen Probleme verursachen.

3.11.33 Anteil der Mobilitätsbehinderten

An einem Werktag führen gegen drei Viertel der Fahrgäste im Nahverkehr ein oder zwei Gepäckstücke mit sich [381]. Davon sind 64 bis 76 % Handgepäck (Handtaschen, Einkaufstaschen ect.), während dieser Anteil beim Fussgängerverkehrs gemäss [451] 68 % oder etwa gleichviel ausmacht. Einig sind sich [381] und [451] auch darin, dass nur etwa ein Viertel der Personen ohne irgendein Gepäckstück unterwegs ist. Grösse und Art des Gepäcks wird vom Verkehrszweck bestimmt, wobei sperriges Gepäck überwiegend mit dem Privatauto oder mit dem Taxi befördert wird. Gemäss [381] werden an Einkaufstagen in Strassenbahnen 12 % der Fahrgäste mit grossen Gepäckstücken beobachtet, im Individualverkehr sind es aber 18 % und in Taxis 28 %. Die Reisezweckabhängigkeit der Gepäckmitnahme unterstreicht [584], welcher im öffentlichen Personenfernverkehr einen Kofferanteil von sogar 31 % erhoben hat.

Mit Anteilen von 1.7 % im Fussgängerverkehr beziehungsweise 0.1 bis 0.7 % im Nahverkehr nennen [381] und [451] eine ähnliche Häufigkeit von Kinderwagen. Eigene Zählungen in Basel, Genf, Grenoble und München haben Anteile von zwischen 0.2 und 0.5 % ergeben. Dass die Kinderwagenmitnahme bei Fussgängern höher liegt als im Nahverkehr ist plausibel, wenn man sich die Erschwernisse bei der Beförderung vergegenwärtigt. Da der Anteil der Bevölkerung im Alter von zwischen 0 und 2 Jahren bei etwa 1.5 % liegt [484] und diese Kinder mehrheitlich in Kinderwagen befördert werden, aber nur bei einem Teil aller Fahrten mitgenommen werden, ist ein Anteil von etwa 0.5 % als zutreffend zu betrachten.

Tab. 3-2: Gepäckbeförderung durch Fussgänger und Fahrgäste, Mitführen von Kinderwagen (kleines Gepäck: Handtasche; mittleres Gepäck: Einkaufstasche; grosses Gepäck: Reisekoffer); Verteilung auf die Gepäckkategorien (Total = 100 %).

Verkehrsart	Anteile der Kategorien					Quelle
	kein Gepäck	kleines Gepäck	mittleres Gepäck	grosses Gepäck	Kinderwagen	
Fussgänger	28.0 %	41.4 %	26.6 %	2.2 %	1.7 %	[451]
Nahverkehr	99.5 - 99.8 %				0.2 - 0.5 %	[557], [559]
Nahverkehr	23 - 33 %	64 - 76 %		1.5 - 5.9 %	0.1 - 0.7 %	[381]
Bahnfernverkehr	69.0 %			31.0 %	0.0 %	[584]

Die Häufigkeit der einzelnen Alterskategorien unterscheidet sich je nach Einzugsgebiet eines Verkehrsbetriebes und wandelt sich zudem permanent, sodass allgemeingültige Angaben nicht möglich sind. Beispielhaft wird auf jene der Stadt Zürich/Schweiz (360'000 Einwohner) für das Jahr 1991 zurückgegriffen und mit den gesamtschweizerischen Werten verglichen [76], [484]:

•	bis 7 Jahre	Zürich	5.6 %	Schweiz	8.2 %
•	71 bis 80 Jahre		8.2 %		6.5 %
•	81 bis 90 Jahre		4.9 %		3.3 %
•	über 91 Jahre		0.5 %		0.4 %

Der Vergleich weist auf die stark vorangeschrittene Überalterung der Städte hin. Der tiefe Anteil kleiner Kinder in der Stadt Zürich wird in der BRD bereits landesweit ausgewiesen [79]. Durch die altersabhängige Verkehrsmittelwahl müssen diese Anteile nicht mit jenen der Fahrgäste übereinstimmen. Zur Altersverteilung der Fahrgäste wurden indessen nur wenige Untersuchungen veröffentlicht. Im Nahverkehr der Städte Düsseldorf, Frankfurt, Hamburg, München und Berlin hat [43] die folgenden Anteile beobachtet:

•	< 30 Jahre	43.2 %	(Bevölkerung Zürich: 34.0 %)
•	30 bis 50 Jahre	36.5 %	(Bevölkerung Zürich: 29.8 %)
•	> 50 Jahre	20.3 %	(Bevölkerung Zürich: 36.2 %)

[584] unterscheidet im Fernverkehr nur zwischen "alt" und "jung". Nimmt man die Grenze zwischen "jung" und "alt" bei 45 Jahren an und teilt man die von [43] gebildete Kategorie der 30- bis 50-jährigen proportional auf, so lassen sich die beiden Angaben vergleichen:

•	"junge" Fahrgäste	[43]:	70.6 %	[584]:	71.6 %
•	"alte" Fahrgäste	[43]:	29.4 %	[584]:	28.4 %

Die Angaben beider Autoren stimmen zwar gut überein und sind mit Blick auf die kleinere Mobilität älterer Menschen glaubwürdig, sind aber leider bereits rund zwanzig Jahre alt. Seither dürfte der Anteil älterer Menschen im öffentlichen Verkehr infolge ihres zunehmenden Anteils an der Bevölkerung, ihrer steigenden Mobilität und der Motorisierung der jüngeren Bevölkerungsteile angewachsen sein. Durch diese Verschiebung der Altersstruktur sinkt allmählich die Akzeptanz vorhandener Anlagen und Fahrzeuge.

Die Angaben zu den Körperbehindertenanteilen schwanken stark, was auf eine unterschiedliche Abgrenzung der Behindertenkategorien sowie auf die ungleiche Betroffenheit durch den Zweiten Weltkrieg zurückzuführen ist. [524] erwähnt einen Anteil von 7.77 % Bewegungs-, Seh- und Hörbehinderten in der BRD, was praktisch mit der Angabe von [365] für die Schweiz übereinstimmt. [264], [453] und [465] nennen für die USA, Schweden, Frankreich und die BRD zwischen 5.4 und 12.5 % Körperbehinderte und zwischen 0.21 und 0.48 % Rollstuhlfahrer. Der für Schweden ausgewiesene Wert von 12.5 % der Bevölkerung setzt sich zusammen aus [23]:

•	Personen, welche nur mit Sonderfahrdiensten befördert werden können	0.25 %
•	Personen, die mit grössten Schwierigkeiten die regulären Verkehrsmittel benützen können	2.88 %
•	Behinderte mit offensichtlichen Schwierigkeiten bei der Fortbewegung	3.13 %
•	Personen mit Behinderungen, welche ihnen bis zu einem gewissen Grad die Verkehrsteilnahme erschweren	6.25 %

In der Schweiz teilen sich die Behinderten im engeren Sinn folgendermassen auf [473]:

Tab. 3-3: Aufteilung der Behinderten im engeren Sinn, Verhältnisse in der Schweiz, Kumulation von Behinderungen möglich [473].

Art und Ausmass der Behinderung	Anteil
Körperbehinderte	2.67 %
Rollstuhlfahrer	0.46 %
Para- und Tetraplegiker	0.12 %
Cerebralgelähmte	0.11 %
Multiple Sklerose	0.15 %
Rheumakranke	1.83 %
Sehbehinderte	1.31 %
Vollblinde	0.12 %
in der Lebensführung erheblich eingeschränkt	0.20 %
stark sehbehindert	0.99 %
Hörgeschädigte	7.61 %
geistig Behinderte	2.74 %

Rund 5 % der bundesdeutschen Bevölkerung oder die Hälfte der Inhaber eines Schwerbehindertenausweises gehören zu den Gehbehinderten [549]. Einen Anteil von etwa 3 % schwer Bewegungsbehinderten lässt sich aus [76] ableiten. Schwer Gehbehinderte, welche beim klassischen öffentlichen Verkehr einen Sondertransportdienst erfordern, machen 2 % der Bevölkerung aus, was etwa mit dem von [27] erwähnten Anteil von Körperbehinderten übereinstimmt. In Frankreich ist die Mobilität von 1.3 % der Bevölkerung stark eingeschränkt, wovon 0.22 % Rollstuhlfahrer sind [465]. Gemäss [453] schliesslich sind 1.1 % der Gesamtbevölkerung der alten Bundesländer bei der Benützung öffentlicher Verkehrsmittel auf fremde Hilfe angewiesen. Etwa 0.8 % der Bevölkerung sind gänzlich von der Verkehrsteilnahme ausgeschlossen [45], [365], [465], [482]. Die Zahl der Rollstuhlfahrer schätzt [264] auf 0.3 bis 0.5 % der Bevölkerung, 0.5 % nennt [524] und 0.3 % gibt [283] an.

Insgesamt und unter Berücksichtigung der kombinierten Behinderungen ist somit die Beweglichkeit von rund 45.2 % der Fahrgäste zumindest leicht eingeschränkt, wobei dieser Prozentsatz nicht mit den Mobilitätsbehinderten gleichgesetzt werden kann. Als mobilitätsbehindert zu bezeichnen sind Personen mit grossem Gepäck, Menschen unter 7 und über 80 Jahren sowie Gehbehinderte und Rollstuhlfahrer. Daraus leitet sich unter Berücksichtigung der Überschneidungen ein Mobilitätsbehindertenanteil von 16.9 % ab.

Tab. 3-4: Grobschätzung der wichtigsten Anteile der mobilitätsbehinderten Fahrgäste, Kumulationen möglich.

Reisebehinderte		Altersbehinderte		Behinderte im engeren Sinn	
Insgesamt	30.0 %	Insgesamt	19.0 %	Insgesamt	3.0 %
mittleres Gepäck	26.5 %	bis 7 Jahre	5.5 %	Gehbehinderte	2.5 %
grosses Gepäck	3.0 %	71 bis 80 Jahre	8.0 %	Rollstuhlfahrer	0.5 %
Kinderwagen	0.5 %	81 bis 90 Jahre	5.0 %		
		über 91 Jahre	0.5 %		

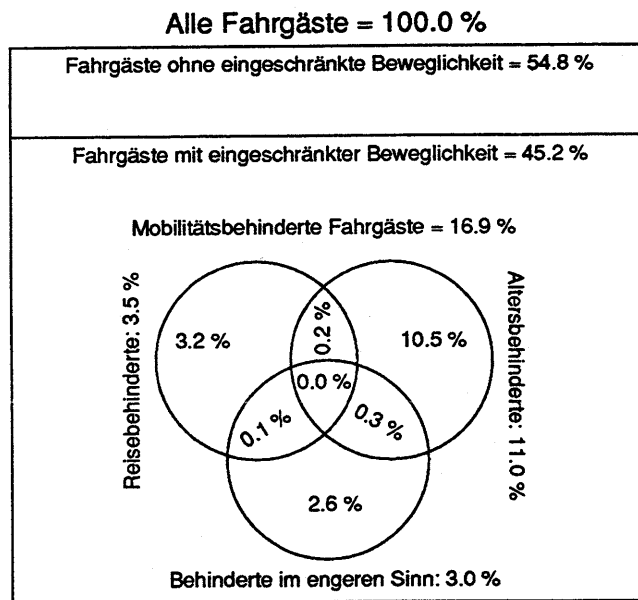


Abb. 3-8: Anteil der Mobilitätsbehinderten nach Hauptkategorien und Kombinationen [575].

Künftig wird sich der Anteil der Kriegsversehrten in den vom Zweiten Weltkrieg heimgesuchten Nationen sowie die Zahl der bei Arbeitsunfällen verletzten Personen allmählich vermindern [524]. Hingegen wird der Anteil der durch Verkehrsunfälle Behinderten, die Zahl der Menschen mit Erkrankungen durch sitzende Tätigkeit und insbesondere der Anteil der Alterbehinderten steigen [264].

3.12 Bewegungsablauf, Energieverbrauch und Leistungsfähigkeit

3.12.1 Bewegungsablauf

Die Muskelkräfte, die äusseren Reaktionskräfte, die Schwerkraft, die Trägheitskräfte sowie die Reibung bestimmen die Bewegungsabläufe des Menschen. Der Aufbau des Bewegungsapparates lässt nur Rotationen zu, weshalb alle Bewegungen darauf zurückgeführt werden müssen. Es bilden sich dazu kinematische Ketten, zusammengesetzt aus Gliedern und Gelenken [175]. Die Be-

wegung eines Beines lässt sich als Pendelbewegung idealisieren, mit dessen Eigenfrequenz die Gehgeschwindigkeit und der Energieverbrauch des Menschen zusammenhängen [117], [488]. Die Pendelbewegung wird beidseitig durch die elastischen Muskeln begrenzt und die Bewegungsenergie geht bei der Auslenkung in die potentielle Energie des gedehnten Muskels über. Der menschliche Körper kennt die beiden Fortbewegungsarten des Gehens und des Laufens. Beim Gehen ist mindestens ein Fuss immer in Kontakt mit dem Boden. Beim Laufen tritt dagegen zwischen den Stützphasen eine Flugphase auf [117].

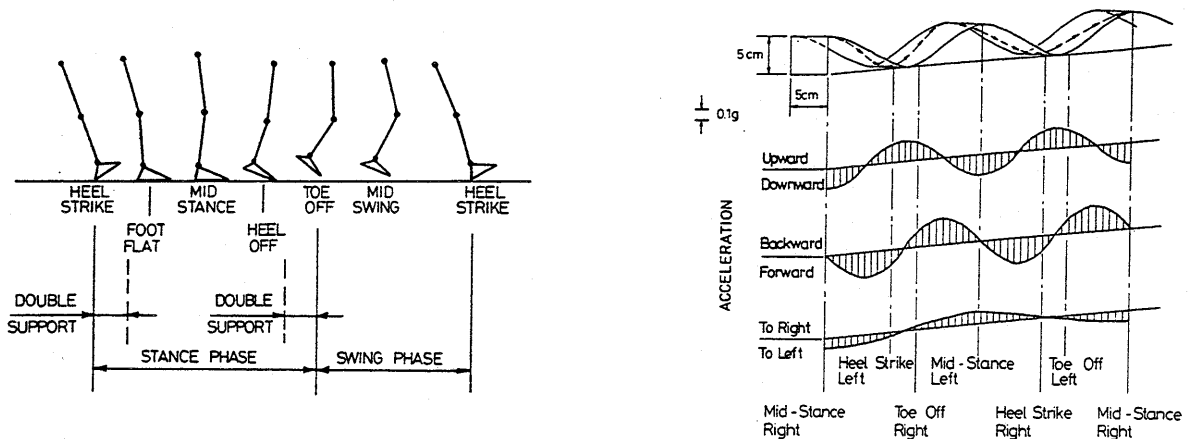


Abb. 3-9: Links: Phasenverlauf der Bewegung eines Beines. Rechts: Bewegung des Körperschwerpunktes und Verlauf der auf ihn einwirkenden Beschleunigungen und Verzögerungen [334].

Die Fortbewegungsgeschwindigkeit kann erhöht werden durch die Verlängerung der Schritte, die Vergrößerung der Frequenz oder eine Kombination von beiden. Im unteren Geschwindigkeitsbereich vergrößert sich sowohl die Frequenz wie die Schrittlänge, wobei letztere linear mit der Geschwindigkeit wächst. Nach [312] gilt dafür folgende Beziehung:

$$(3-1) \quad l_s(v_F) = 0.235 \text{ m} + 0.302 \cdot v_F$$

wobei l_s Schrittlänge [m]
 v_F Fussgängergeschwindigkeit [m/s]

Als durchschnittliche Schrittlänge nennt [117] zwischen 0.80 und 0.90 m und als Schrittfrequenz eine solche von 110 bis 120 pro Minute. Dies ergäbe eine Geschwindigkeit von rund 1.63 m/s, was eher zu hoch gegriffen ist. Gut zutreffen dürfte eine Frequenz von etwas über 2 Hz, wie man sie auch beim Hüpfen auf einem Bein (2.06 Hz) oder beim Tanzen (2.10 Hz) festgestellt hat [37]. Die Schrittlänge hingegen liegt eher bei 0.63 m, was eine mittlere Geschwindigkeit von etwa 1.32 m/s ergibt [415]. Über einer Gehgeschwindigkeit von 2.5 m/s kann laut [312] nur noch die Frequenz erhöht werden. Dies stimmt etwa mit der Angabe von [360] überein, wonach bei 2.0 m/s die obere Grenze des natürlichen Gehens erreicht ist.

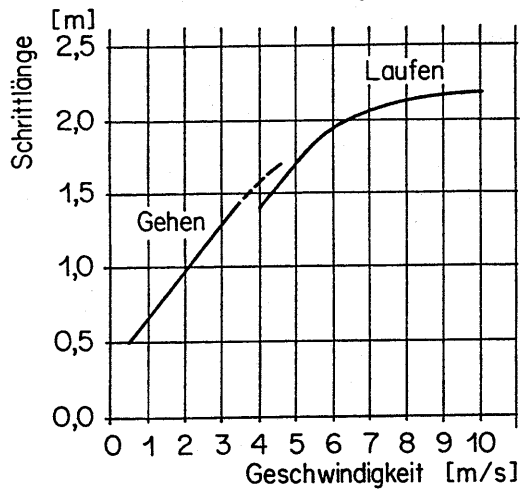


Abb. 3-10: Schrittlänge in Funktion der Geschwindigkeit beim Gehen und Laufen (nach [312]).

3.12.2 Energieverbrauch

3.12.2.1 Grundumsatz und Gesamtenergieverbrauch

Der Gesamtenergieverbrauch eines Menschen setzt sich zusammen aus dem Grundumsatz und dem Arbeitsumsatz. Der Grundumsatz ist der Energiebedarf bei absoluter Körperruhe und dient der Aufrechterhaltung der lebensnotwendigen Körperfunktionen. Er liegt für Männer bei etwa 300 kJ/h und für Frauen bei 250 kJ/h. Bezogen auf das Körpergewicht ist der Grundumsatz der Frauen um etwa 10 % kleiner als jener von Männern, was mit der stärkeren Ausbildung des Unterhautfettgewebes begründet wird [20], [488], [509]. Zum Grundumsatz kommt der Arbeitsumsatz hinzu (Gesamtumsatz abzüglich Grundumsatz).

Tab. 3-5: Energieverbräuche (Gesamtumsatz) bei verschiedenen Tätigkeiten ([20], [423], [462], [557]).

Tätigkeit	Energieverbrauch [kJ/h]	
	Männer	Frauen
Ruheumsatz	300	250
Ruhen im Liegen	320	250
Ruhen im Sitzen	300-320	
Sitzen	380	320
Stehen	630	440
Schreiben im Sitzen	500	
Essen im Sitzen	610	
Tanzen	1280	
Bergsteigen	2100	

Die Muskeln vermögen die in den Nährstoffen gespeicherte Energie nur unzureichend in die mechanische Form überzuführen. Für den Wirkungsgrad als Verhältnis zwischen der erbrachten Leistung und dem Arbeitsumsatz werden Werte von zwischen 20 und 30 %, in Ausnahmefällen bis 35 %, angegeben ([312], [445], [462], [488], [509]).

3.12.22 Energieverbrauch beim Gehen

Beim Gehen wird die Energie weitgehend zum Heben und Senken des Körpers sowie zu dessen Beschleunigung und Verzögerung bei jedem Schritt aufgewendet. Die Geschwindigkeit hat daher auf den Energieaufwand zur Überwindung bestimmter Streckenlängen nur einen beschränkten Einfluss. Wesentlicher ist die Schrittfrequenz. Je weiter diese vom Eigenschwingungsbereich des Beines entfernt ist, desto grösser ist der spezifische Energieverbrauch [312]. [488] hat deshalb beobachtet, dass Personen intuitiv jene Schrittfrequenz wählen, welche dem Energieminimum entspricht.

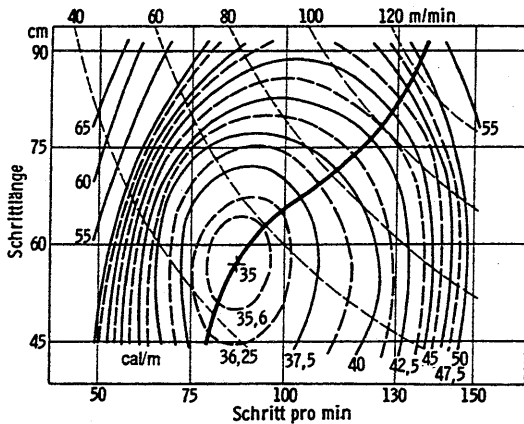


Abb. 3-11: Energieumsatz beim Gehen in der Ebene in Abhängigkeit von Schrittlänge und Schrittfrequenz [423].

Der Gesamtumsatz für einen bestimmten Weg zeigt zwei typische Energieminima für das Gehen und das Laufen bei etwa 1.39 m/s und 3.89 m/s. Deren absolute Grösse ist mit 274 kJ/km beziehungsweise 250 kJ/km nahezu gleich. Der Energieverbrauch pro Zeit hängt ungefähr quadratisch mit der Gehgeschwindigkeit zusammen. In einem Übergangsbereich bei 2.0 bis 2.5 m/s sind die beiden Fortbewegungsarten des Gehens und Laufens energetisch gleichwertig und der Fussgänger ist unschlüssig, welche Bewegungsart er wählen soll. Darunter geht er, darüber läuft er.

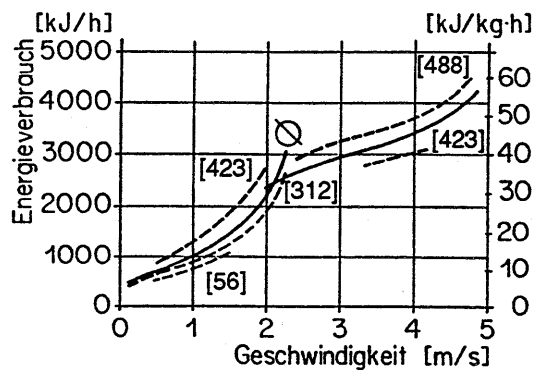
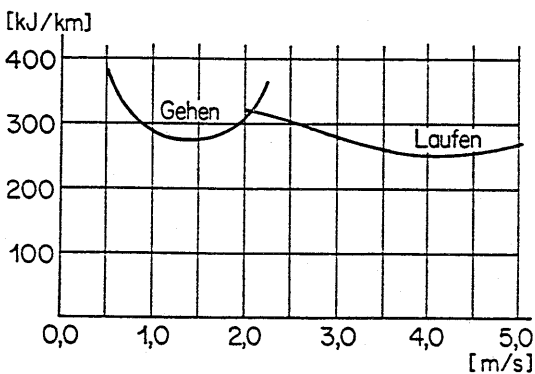


Abb. 3-12: Links: Energieverbrauch beim Gehen und Laufen. Rechts: Energieverbrauch für eine Strecke von 1000 m Länge in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit [37], [56], [312], [423], [488].

3.12.23 Energieverbrauch auf Rampen und Treppen

Eine Steigung führt zur Erhöhung des Energiebedarfes, ein Gefälle zu dessen Senkung. Der Energieverbrauch reagiert dabei sehr empfindlich auf das Ausmass der Neigung. Bei zehn bis zwölf Prozent Steigung beispielsweise verdoppelt er sich nahezu gegenüber der Ebene.

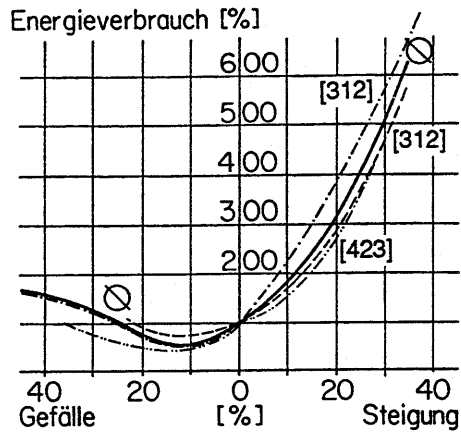


Abb. 3-13: Energieverbrauch beim Gehen auf Rampen, bezogen auf den Verbrauch in der Ebene (abgeleitet aus [312] und [423]).

Zum Energieverbrauch auf Treppen finden sich widersprüchliche Angaben. [451] spricht beispielsweise von einem um lediglich 30 % erhöhten Energieverbrauch, während [56] bei gleicher Horizontalgeschwindigkeit einen Mehrverbrauch beim Aufwärtsgehen von rund 690 % sowie einen Minderverbrauch von etwa 25 % beim Abwärtsgehen ausweist. [423] nennt einen Mehrverbrauch von 400 %, [229] gar einen solchen von 900 bis 1400 % beim Aufwärtsgehen und von 35 % beim Abwärtsgehen. Die Arbeit von Döll und Lehmann (zitiert in [415] und [423]) liegt mit ihren Angaben für den Steigungsfall etwa im Mittel der verschiedenen Werte:

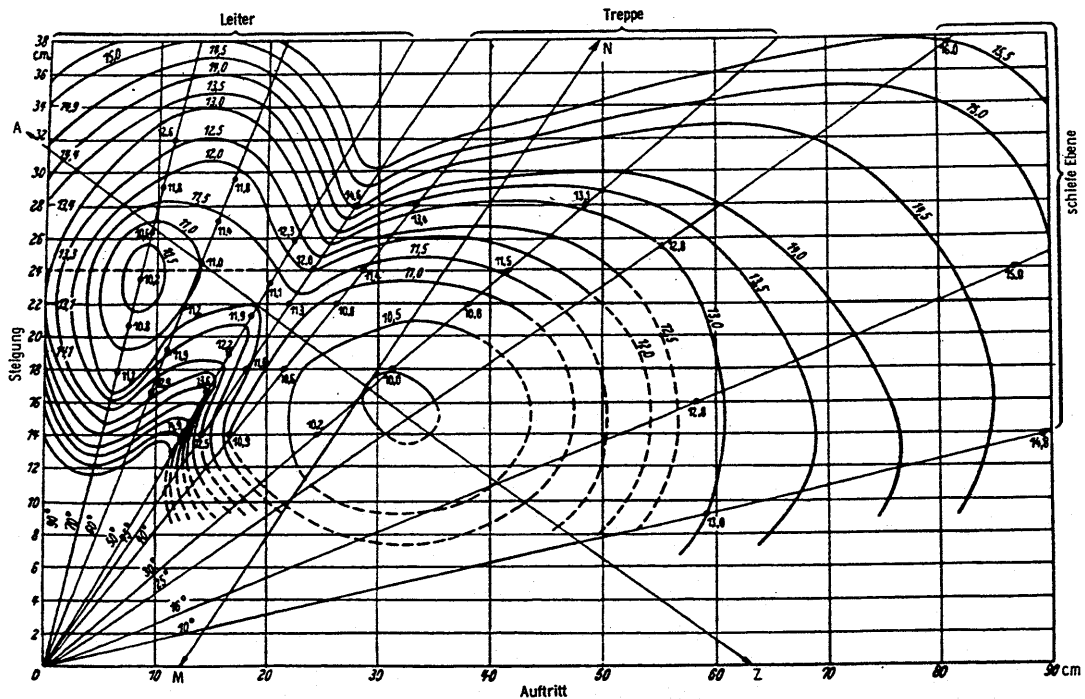


Abb. 3-14: Energieumsatz für eine Hubarbeit von 1 mkg für Rampe, Treppe und Leiter [cal/mkg]. Die Punkte gleichen Energieumsatzes sind mit einer Linie verbunden [423].

Der Energieaufwand ist nicht nur eine Funktion der Geschwindigkeit, sondern auch der ergonomischen Gestaltung der Treppe. Das Energieminimum liegt gemäss [190] bei einer Stufenhöhe von 16 cm und einer Stufentiefe von 31 cm, was eine horizontale Schrittlänge von 62 cm und eine schräge Schrittlänge von 70 cm ergibt.

3.12.3 Leistungsfähigkeit

3.12.31 Einfluss des Geschlechts

Die Leistungsfähigkeit von Frauen ist deutlich kleiner als jene von Männern. So unterschreitet ihr Sauerstoff-Aufnahmevermögen dasjenige von Männern um etwa 30 %. Bezogen auf das Körpergewicht sind es immer noch 21 % [423], [488]. Die Muskelkraft liegt bei etwa 67 %, die körperliche Leistungsfähigkeit gemessen in [mkg/min] bei 58 % und die Laufgeschwindigkeit von Schnellläufern bei 75 % [20], [117], [423]. Im Spitzensport erzielen Frauen bis zu 90 % der Leistung von Männern [334].

3.12.32 Einfluss des Alters

Das Maximum seiner körperlichen Leistungsfähigkeit erreicht der Mensch mit 18 bis 20 Jahren. Muskelkraft und Muskelleistungsfähigkeit [mkg/min] bilden sich bis zum 25. Altersjahr bereits spürbar zurück, um anschliessend während etwa zwanzig Jahren nur unmerklich weiter abzusinken. Ein starker Abfall folgt über etwa 50 bis 60 Jahren. Im Alter von 80 Jahren wird der Stand des 10. Lebensjahres erreicht oder sogar unterschritten. Besonders von der Rückentwicklung im Alter betroffen sind die Bein- und Rumpfmuskulatur und damit der Bewegungsapparat [20].

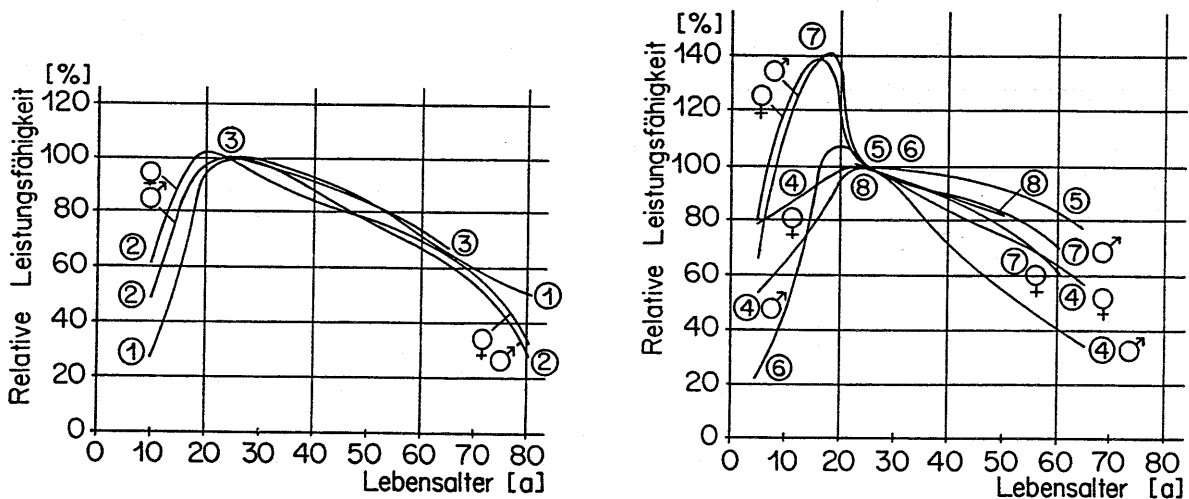


Abb. 3-15: Links: Körperliche Leistungsfähigkeit in Funktion des Alters. 1 = Vitalkapazität der Lunge [488], 2 = Sauerstoff-Aufnahmevermögen [488], 3 = Maximales Herzschlagvolumen [20]. Rechts: 4 = Trainierbarkeit [488], 5 = Muskelkraft [20], 6 = Körperliche Leistungsfähigkeit [423], 7 = Laufgeschwindigkeit [117], 8 = Montageleistung von Arbeitern [423].

3.12.33 Einfluss der Tageszeit

Die Leistungsbereitschaft des Menschen unterliegt im Tagesverlauf einer typischen Periodizität. Man unterscheidet folgende Leistungsbereiche [176], [423], [462], [488]:

- Die *automatisierten Leistungen* liegen bei 40 % der gesamten Leistungsfähigkeit und sind praktisch konstant. Sie können vom Menschen ohne Willensanstrengung erbracht werden.
- Die Nutzung der *physiologischen Leistungsbereitschaft* erfordert eine mässige Willensanstrengung. Im Gegensatz zur automatisierten Leistung zeigt sie Leistungsmaxima am frühen Vormittag und früheren Abend sowie Leistungsminima am Nachmittag und in der Nacht.
- Die *Einsatzreserven* sind im Tagesverlauf nahezu konstant, erreichen aber am frühen Morgen ihr Maximum. Sie umfassen etwa 20 bis 30 % der totalen Leistungsfähigkeit und werden insbesondere bei sportlichen Höchstleistungen genutzt. Sie können willkürlich freigesetzt werden. Je höher der Nutzungsgrad der Einsatzreserven sein soll, desto grösser ist die dazu erforderliche Willenskraft.
- Auf die *autonom geschützten Reserven* hat der Mensch keinen willentlichen Zugriff. Zu ihrer Nutzung ist eine Adrenalinausschüttung erforderlich, welche durch Emotionen oder Affekte ausgelöst werden kann. Der Einsatz von Dopingmitteln im Sport bezweckt diesen Zugriff über eine künstlich veranlasste Adrenalinausschüttung.

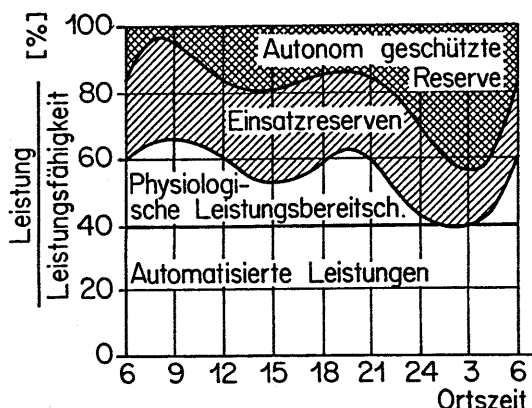


Abb. 3-16: Tagesperiodik der Leistungsbereitschaft (nach Graf, Handbuch der gesamten Arbeitsmedizin).

3.12.34 Einfluss des Umgebungsklimas

Der menschliche Organismus muss seine Körpertemperatur in einem engen Regelbereich halten. Die mit der Umgebung ausgetauschte Wärme muss daher mittelfristig im Gleichgewicht sein [20]:

$$(3-2) \quad DWS = W_M \pm W_C \pm W_R - W_E$$

wobei	DWS	Wärmemenge, die vom Körper aufgenommen oder abgegeben wird
	W_M	Wärmeproduktion des Organismus
	W_C	Wärmetausch durch Konvektion
	W_R	Wärmetausch durch Strahlung
	W_E	Wärmetausch durch Schweissverdunstung

Die Umgebung beeinflusst das körperliche Leistungsfähigkeit des Menschen über die folgenden Grössen [462], [488], [509]:

Umgebungstemperatur: Solange die Umgebungstemperatur unter jener des Körpers liegt, wird Energie abgegeben, liegt sie darüber, so nimmt der Körper Energie auf. Die Energiemenge, welche pro Zeit- und Flächeneinheit ausgetauscht wird, ist proportional zur Temperaturdifferenz [509]:

$$(3-3) \quad w_C = \alpha \cdot (T_H - T_L)$$

wobei w_C Wärmestrom pro Flächeneinheit infolge Konvektion
 T_H Hauttemperatur
 T_L Temperatur der Luftgrenzschicht
 α Wärmeübergangszahl

Durch die Windgeschwindigkeit wird die Ausdehnung der ruhenden Grenzschicht über der Haut und damit das Wärmeübertragungsvermögen beeinflusst:

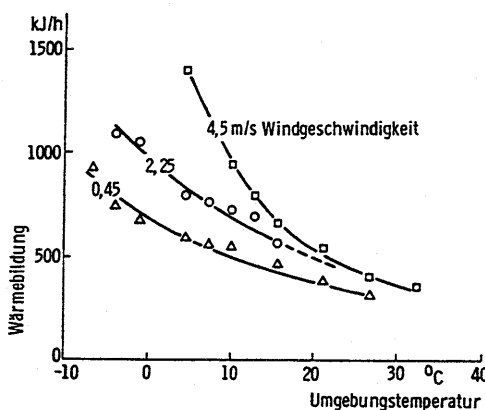


Abb. 3-17: Energieumsatz nach einstündigem Sitzen in unterschiedlicher Umgebungstemperatur (Abbildung [423] nach Wenzel und Pierarski).

Wärmestrahlung: Zwischen dem Menschen und festen Körpern findet ein Energieausgleich über langwellige Strahlung statt. Der Wärmeübergang ist nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz proportional zur vierten Potenz der Temperatur der Oberflächen [509]:

$$(3-4) \quad w_R = \delta \cdot (T_H^4 - T_W^4)$$

wobei w_R Wärmestrom pro Flächeneinheit infolge Strahlung
 T_H Hauttemperatur
 T_W Temperatur der strahlenden Fläche
 δ Proportionalitätsfaktor, abhängig von Emissions- und Absorptionseigenschaften der beteiligten Körper

Luftfeuchtigkeit: Eine hohe Luftfeuchtigkeit führt zur schlechten Verdunstung des Schweißes und damit zu einem kleinen Wärmetausch. Entscheidend ist die Differenz des Wasserdampfdruckes der Haut und der Luft [509]:

$$(3-5) \quad w_E = \beta \cdot (P_H - P_L)$$

wobei	w_E	Wärmeabgabe durch Verdunstung pro Flächeneinheit
	P_H	Wasserdampfdruck der Haut
	P_L	Wasserdampfdruck der Luft
	β	Verdunstungszahl

Solange die Hauttemperatur über der Umgebungstemperatur liegt, ist selbst bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % noch eine Verdunstung möglich.

Bei durchschnittlichen Verhältnissen (Umgebungstemperatur 20 bis 22 Grad C, relative Luftfeuchtigkeit 50 %, Windstille) werden rund 90 % der Wärme durch die Haut und 10 % durch die Atemwege abgegeben. Vom Hautanteil entfallen 45 % auf Strahlung, 25 % auf Konvektion und 20 % auf Verdunstung. Der Atemwegsanteil setzt sich aus 2 % Leitung und Ventilation sowie 8 % Wasserverdunstung zusammen [509]. Andere Quellen nennen einen Energieaustausch von 60 % durch Strahlung, 15 % durch Leitung oder Konvektion sowie 20 % durch Wasserverdunstung [462]. Die Kerntemperatur des Körpers kann trotz wechselnder Umgebungsverhältnisse zwischen der unteren und der oberen Grenze des Regelbereiches gehalten werden, indem die Wärmebildung durch Reduktion der Körperaktivitäten sukzessive bis auf den Grundumsatz abgesenkt wird (Normothermie) oder sinkende Temperaturen durch erhöhte Körperaktivitäten wettgemacht werden (Zittern, Schlottern) [509]:

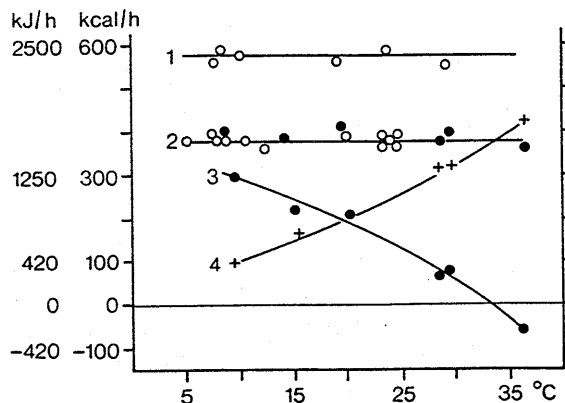
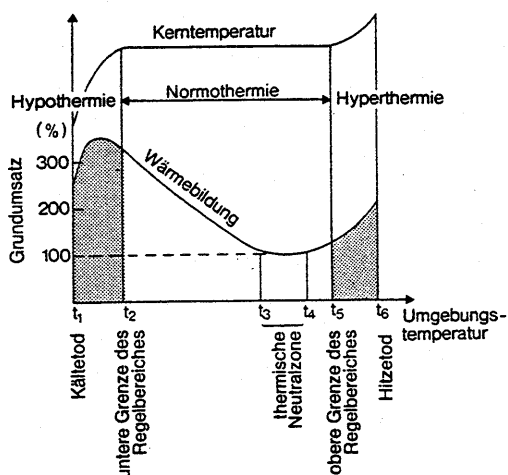


Abb. 3-18: Links: Körpertemperatur und Wärmebildung des Menschen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Die thermische Neutralzone für den unbedeckten, ruhenden Menschen liegt zwischen 28 und 31 Grad C; für Windstille und 50 % Luftfeuchtigkeit ([509] nach Hensel, Brück, Raths). Rechts: Wärmeaustausch einer nackten Versuchsperson während der Arbeit (Leistung 150 Watt) in unterschiedlichen Raumtemperaturen. 1: Gesamter Energieumsatz. 2: Wärmeproduktion. 3: Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung. 4: Wärmeabgabe durch Verdunstung [20].

Die Wärmetauschköglichkeiten weisen ihre spezifischen Arbeitsbereiche auf. Ein Beispiel hierzu ist die Schweißbildung, welche bei steigender Temperatur eine verkleinerte Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion kompensiert [20], [423]. Im vorliegenden Zusammenhang muss das Aussenklima mit Konvektion, Strahlung und Verdunstung als gegeben betrachtet werden, sodass

der Mensch durch die Bekleidung und durch eine Anpassung seiner körperlichen Leistung die Temperatur innerhalb des Regelbereiches halten muss. Mit zunehmender Aussentemperatur sinkt daher die Leistungsfähigkeit [488]:

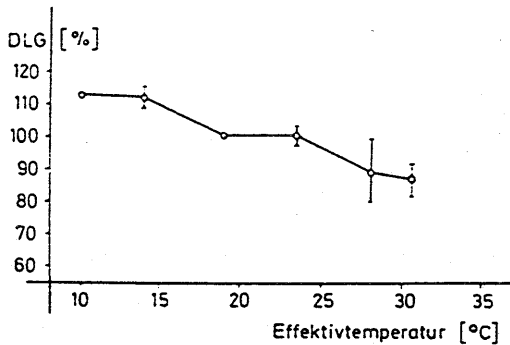


Abb. 3-19: Abnahme der Dauerleistungsgrenze mehrerer Versuchspersonen in Abhängigkeit von der Effektivtemperatur (Abbildung: [488]).

3.13 Geschwindigkeitsverhalten der Fussgänger

3.13.1 Mittelwert

Die Durchschnittsgeschwindigkeit des Menschen, abgeleitet aus 51 Quellenangaben, liegt bei 1.34 m/s mit einer Spannbreite der Werte von 0.97 bis 1.65 m/s und stimmt mit dem Energieminimum praktisch überein. Bei einer Schrittlänge von 0.63 m [415] ergibt sich eine Schrittfrequenz von 2.13 Hz. Gemäss [312] müsste zum Vergleich die Schrittlänge bei dieser Geschwindigkeit etwa 0.70 m und die Schrittfrequenz 1.91 Hz betragen. Etwa 2 Hz können somit als Richtwert betrachtet werden.

3.13.2 Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen

3.13.2.1 Eigenschaften der Fussgänger

Die Gehgeschwindigkeit von Männern liegt im Mittel um 10.9 % höher als jene von Frauen. Dies ergibt für Männer eine mittlere Geschwindigkeit von 1.41 m/s und für Frauen eine solche von 1.27 m/s. Der empirisch gefundene Unterschied stimmt gut mit den Differenzen in der Körpergrösse und der körperlichen Leistungsfähigkeit überein. Zur Geschwindigkeitsabhängigkeit in Funktion des Alters äussern sich zwanzig Autoren, von denen einzig [176] den vollständigen Geschwindigkeitsverlauf darstellt, während sich sonst nur Einzelangaben finden. Die ermittelte Kurve entspricht weitgehend jener der körperlichen Leistungsfähigkeit. Zu beachten ist namentlich der starke Geschwindigkeitsabfall im Alter von über 50 Jahren. Dies wird dort relevant, wo die Fussgängerkollektive zumindest zeitweise ein überdurchschnittliches Alter aufweisen, beispielsweise bei Bahnhöfen und Umsteigeanlagen.

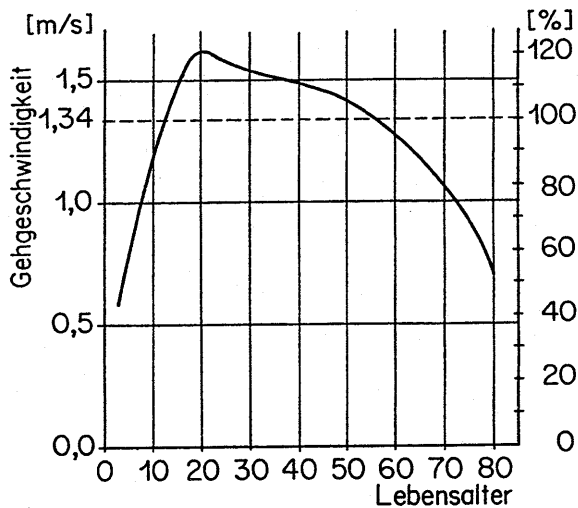


Abb. 3-20: Verlauf der Fussgängergeschwindigkeiten in Funktion des Lebensalters.

Verkehrstechnische Untersuchungen zur Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Körpergrösse liessen sich nicht finden, obwohl ein entsprechender Zusammenhang evident ist.

3.13.22 Begleitumstände der Bewegung

Die Unterscheidung der Fussgängergeschwindigkeit nach den vier Verkehrszwecken Pendlerverkehr, Einkaufsverkehr, Nutzverkehr und Freizeitverkehr ist methodisch heikel. Einerseits hängen zwar die Verhaltensweisen mit dem Verkehrszweck zusammen. Andererseits aber differiert die Zusammensetzung der Fussgängerkollektive je nach Verkehrszweck. Aus den von den Autoren genannten Verhältnissen der Geschwindigkeiten der einzelnen Verkehrszwecke zueinander, dem Mittelwert sowie der überschlägigen Annahme, dass jeder Verkehrszweck etwa einen Viertel des Gesamtverkehrs ausmacht, leiten sich folgende Geschwindigkeiten ab:

- Pendlerverkehr 1.49 m/s
- Einkaufsverkehr 1.16 m/s
- Nutz- und Werkverkehr 1.61 m/s
- Touristik- und Freizeitverkehr 1.10 m/s

Die Tageszeitabhängigkeit der Geschwindigkeit ist sehr spärlich dokumentiert, ist aber aufgrund der physischen Leistungsfähigkeit und der Zusammensetzung der jeweiligen Fussgängergruppen zu erwarten. Es ist davon auszugehen, dass die Gehgeschwindigkeit während der Morgenspitze am höchsten ist, gefolgt von der Mittagszeit und der Abendspitze. Während des Vormittags und am frühen Nachmittag dagegen ist mit Einbrüchen zu rechnen [24], [139], [206], [242], [360], [590].

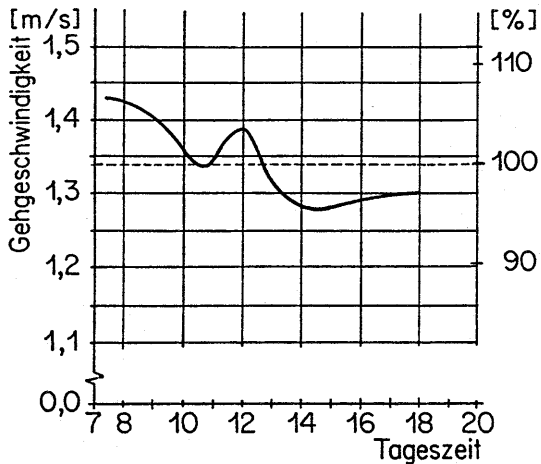


Abb. 3-21: Hypothese zum Geschwindigkeitsverlauf im Tagesgang, basierend auf [117] und [134].

In der geprüften Literatur fanden sich nur zwei Autoren, welche die Fußgängergeschwindigkeit in Funktion der Umgebungstemperatur darstellen ([206], [331]). Beide kommen zum Befund eines Geschwindigkeitsabfalles mit steigender Temperatur.

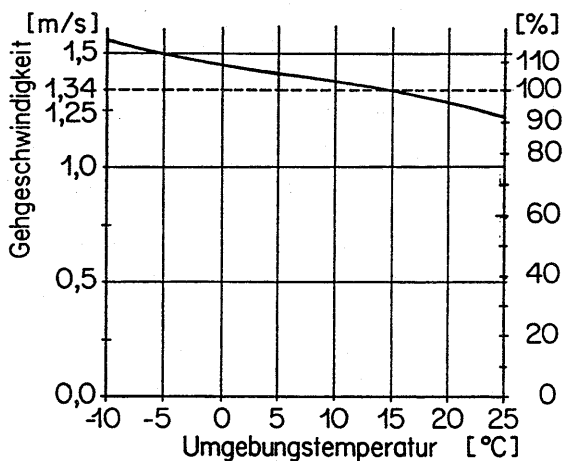


Abb. 3-22: Fußgängergeschwindigkeit in Funktion der Umgebungstemperatur zwischen -10 und +25 Grad, nach [206] und [331].

Die Ermüdungsanfälligkeit des menschlichen Körpers lässt eine Geschwindigkeitsabnahme mit steigender Weglänge erwarten. Untersuchungen dazu finden sich aber nicht und es ist zweifelhaft, ob im relevanten Distanzbereich überhaupt ein Einfluss festzustellen wäre. Für Treppen hat [348] diese Frage bearbeitet und eine Geschwindigkeitsabnahme mit zunehmender Länge der Treppe nachgewiesen.

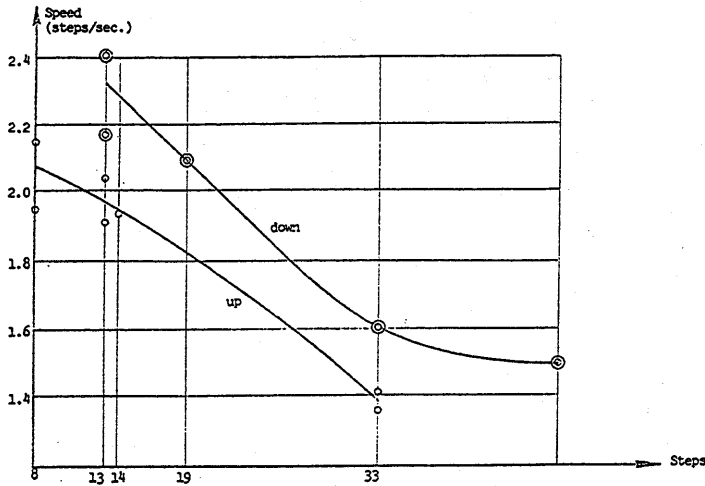


Abb. 3-23: Abnahme der Fussgängergeschwindigkeit auf Treppen in Funktion der Stufenzahl [348].

3.13.23 Charakteristiken der Anlage

Zum Geschwindigkeitsverhalten auf Rampen geben vier Autoren an, dass Neigungen bis etwa 8% keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit haben ([57], [229], [399], [517]). Andere Quellen weisen im Gegensatz dazu eine deutliche Geschwindigkeitsabnahme bereits bei Steigungen von 5% und eine leichte Geschwindigkeitserhöhung bei Gefällen ab 5% experimentell nach ([24], [35], [247]). Aus den 15 auswertbaren Angaben zum Geschwindigkeitsverhalten liess sich folgende Neigungs-Geschwindigkeitskurve ermitteln:

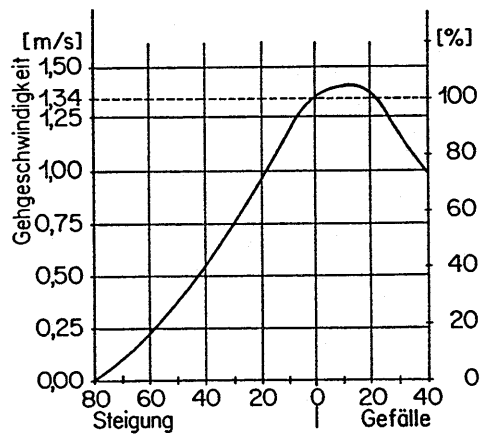


Abb. 3-24: Geschwindigkeit der Fussgänger in Funktion der Gehwegneigung. Die Neigungsbereiche über $\pm 20\%$ haben keine praktische Bedeutung, da dies der Anwendungsbereich von Treppen ist.

Für übliche Treppenkonfigurationen nennt die Literatur eine mittlere Horizontalgeschwindigkeit von $v_h = 0.652$ m/s, eine mittlere Vertikalgeschwindigkeit von $v_v = 0.326$ m/s sowie eine Anzahl Schritte von 2.103 pro Sekunde. Die Geschwindigkeit ist beim Aufwärtsgehen um 6.5% tiefer, beim Abwärtsgehen um 6.5% höher als im Durchschnitt:

Aufwärtsgehen	$v_h = 0.610 \text{ m/s}$	$v_v = 0.305 \text{ m/s}$	1.97 Schritte/s
Abwärtsgehen	$v_h = 0.694 \text{ m/s}$	$v_v = 0.347 \text{ m/s}$	2.24 Schritte/s

Verglichen mit der Geschwindigkeit in der Ebene ist das Treppensteigen im Mittel um 51% langsamer. Die Vertikalgeschwindigkeit im Übergangsbereich von der Rampe zur Treppe ist für beide Anlagentypen praktisch identisch.

3.13.24 Einfluss der Fussgängerdichte

Die in der Literatur anzutreffenden Unterschiede der Angaben zur Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Verkehrsdichte sind gross. Einigkeit herrscht darüber, dass der entscheidende Geschwindigkeitsabfall im Bereich zwischen etwa 0.5 und 2.0 P/m^2 auftritt. Ein Teil der Autoren nähert diesen Kurvenabschnitt mit einer Geraden an ([155], [362], [363], [460]). Andere Untersuchungen zeigen einen Verlauf vom Typ k/x , welcher einen grösseren Dichtebereich abzudecken vermag, bei dem aber die Werte bei sehr geringen Fussgängerdichten kaum plausibel sind ([24], [86], [170], [247], [348], [408], [461]). Einzelne Autoren beschreiben daher den Verlauf mit einer S-förmigen Kurve. Kennzeichnend ist die im tiefen Dichtebereich zunächst zögernde Geschwindigkeitsabnahme sowie der Abbruch aller Fussgängerbewegungen oberhalb von etwa 5.4 P/m^2 [191], [352], [383], [460].

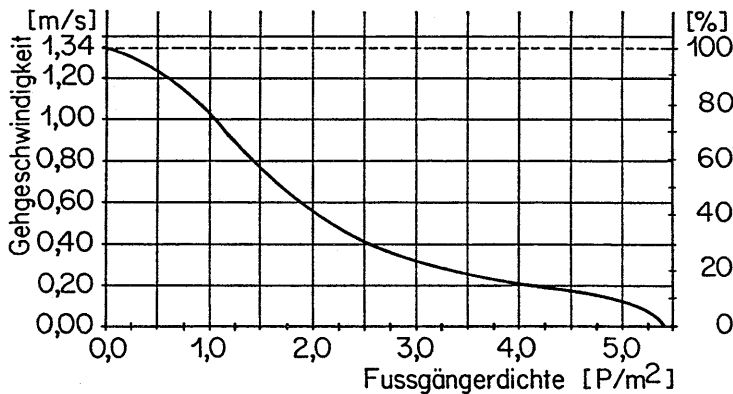


Abb. 3-25: Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit von der Fussgängerdichte in der Ebene.

Die Datenbasis für Treppen ist mit lediglich sieben Angaben ([155], [157], [176], [191], [348], [354], [461]) schwach und zudem widersprüchlich. Es fällt auf, dass die Geschwindigkeit bei kleiner Fussgängerdichte (bis etwa 1.0 P/m^2) weniger stark zurückgeht als in der Ebene. Fussgänger verlangen bei Treppen offensichtlich kleinere dynamische Zusatzräume. Die obere Grenze der Fussgängerdichte wird hingegen ebenfalls mit 5.4 P/m^2 angegeben.

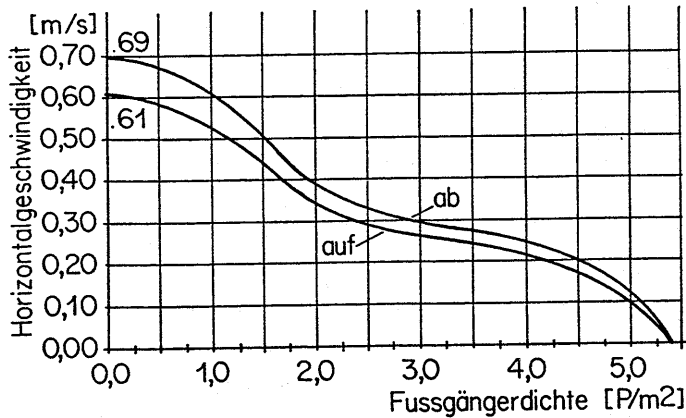


Abb. 3-26: Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit von der Fussgängerichte auf Treppen.

3.13.3 Streuung der Fussgängergeschwindigkeiten

Die Geschwindigkeiten der einzelnen Fussgänger zeigen eine Normalverteilung um den Mittelwert. Die insgesamt 17 Streuungswerte aus zwölf Quellen ([24], [35], [56], [206], [212], [229], [383], [399], [451], [499], [514], [590]) ergeben im Mittel eine Standardabweichung σ von 0,26 m/s oder 19,3 % des Mittelwertes. Die 3σ -Bereiche von 0,56 m/s beziehungsweise 2,12 m/s stimmen gut mit den genannten unteren und oberen Grenzen der natürlichen Bewegung überein.

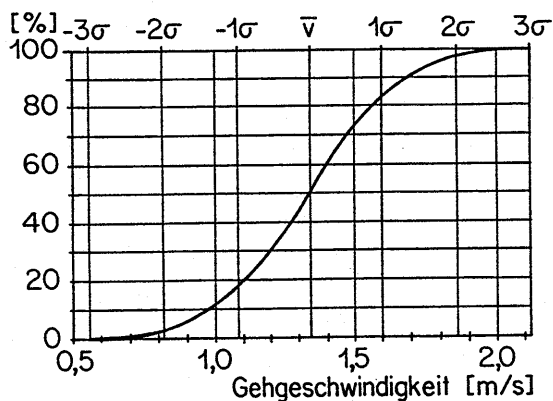


Abb. 3-27: Summenkurve der Fussgängergeschwindigkeiten. Ablesebeispiel: 30 % der Fussgänger gehen langsamer als 1,2 m/s.

Einzelne Hinweise lassen erkennen, dass die Verteilung auch asymmetrisch mit einer positiven Schiefe (Konzentration im tieferen Geschwindigkeitsbereich) und vereinzelt sehr hohen Werten sein kann ([56], [360], [590]). Die zugehörigen Beobachtungen stammen aus der Umgebung öffentlicher Verkehrsmittel oder aus dem Berufsverkehr, was die Spitzenwerte hinreichend begründen dürfte.

3.2 Feste Anlagen

3.2.1 Höhenlage des Perrons

3.2.1.1 Kriterien zur Festsetzung

Die Höhenlage des Perrons bestimmt zusammen mit der Wagenbodenhöhe die Höhendifferenz, welche der Fahrgast zu überwinden hat. Die Perronhöhe bei Schienenverkehrsmitteln ist namentlich von den eingesetzten Fahrzeugtypen, von den im Netz vorkommenden Stationstypen, von betrieblichen Anforderungen auf Bahnhöfen wie Karrenüberfahrten etc. und von ästhetischen Anforderungen im städtischen Raum abhängig. Oftmals wird angegeben, dass zwischen Perronkante und Fahrzeugboden eine Höhendifferenz von etwa 80 mm vorhanden sein muss, um die optische Trennung sicherzustellen und die Stolpergefahr zu bannen [146]. Selbst im ungünstigsten Fall sollte eine Kantenhöhe von etwa 30 mm verbleiben [474]. Grund dafür, dass der Richtwert weit über dem Minimalwert liegt, sind die zu erwartenden Toleranzen, wofür bei Schienenfahrzeugen etwa angesetzt werden müssen [476]:

• Radreifenabnutzung	normal	40 mm	minimal	20 mm
• Einfederung bei Belastung		75 mm		55 mm
• Wanken des Fahrzeuges		10 mm		10 mm
• Gleisabsenkung		15 mm		15 mm
• Insgesamt		140 mm		100 mm

Die Einfederung kann durch Luftfedern mit Höhenregulierung vermindert werden, weshalb [78] für Nahverkehrsfahrzeuge folgende Werte nennt:

• luftgefederte Fahrzeuge	55 mm
• gummigefederte Fahrzeuge	65 mm
• stahlgefederte Fahrzeuge	110 mm

Da zudem das Öffnen der Fahrzeugtüren gewährleistet sein muss und die unbelegte Auffassung vorherrscht, wonach ein Fahrgast nie in ein Fahrzeug hinuntersteigen soll, wird allgemein eine gegenüber dem Wagenboden tiefere Höhenlage des Perrons postuliert [527]. Die Anpassung der Perronhöhe an die Wagenbodenhöhe im Rahmen der genannten Toleranzen wäre grundsätzlich bei allen strassenunabhängigen Systemen möglich. Voll durchgesetzt hat sie sich bisher nur bei U-Bahn-Systemen. Bei der Eisenbahn mit ihrer grossen Zahl von Bahnhöfen mit bescheidenem Verkehr wurde aus ökonomischen Gründen und aus Gründen des Arbeitsablaufes (Gepäckwagenüberfahrten) auf Hochperrons verzichtet. Man hat sich vielmehr auf eine Normierung der auf dem Netz vorhandenen Perronhöhen beschränkt. Nicht frei in der Wahl der Perronhöhe ist man bei strassenabhängigen Systemen, bei welchen die Platzverhältnisse und ästhetische Aspekte eine Anpassung von Perron und Wagenboden bisher mit wenigen Ausnahmen verhindert haben.

3.2.1.2 Perronhöhen bei Eisenbahn, S-Bahn und U-Bahn

Auf dem Eisenbahnnetz existierten während lange Zeit und zum Teil noch heute Bahnhöfe ohne nennenswerte Perrons. Die Technische Einheit im Eisenbahnwesen (1887) bestimmte erstmals eine Mindesthöhe von 210 mm. In der Schweiz war jahrzehntelang ein Wert von 250 mm gebräuchlich. Basierend auf dem gegenwärtig gültigen Lichtraumprofil gemäss den Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung enthält die Typenzulassung der SBB von 1988 die Perronkante P 35 mit einer Höhe über SOK von 350 mm und die Perronkante P 55 mit einer Höhe von 550 mm. Im weiteren ist eine Hilfskante HK 25 mit einer Höhendifferenz von 250 mm vorgese-

hen für Fälle, in denen P 35 und P 55 aus technischen oder finanziellen Gründen nicht möglich oder nicht gerechtfertigt sind. Frühere Perrontypen mit Höhendifferenzen von 420 mm, 300 mm und 150 mm sind nicht mehr zugelassen [14], [472].

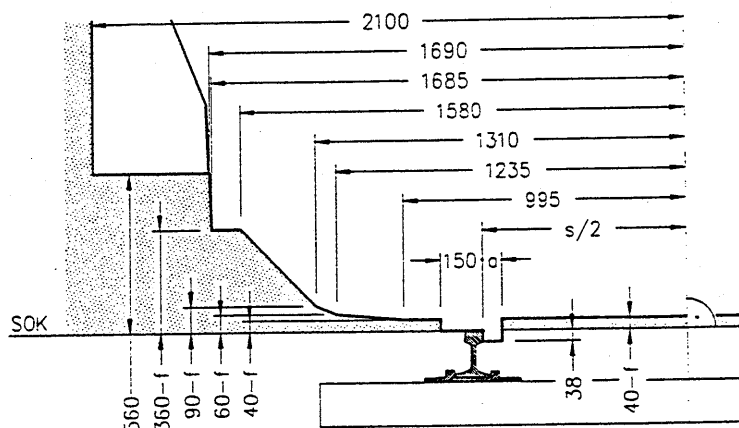


Abb. 3-28: Grenzlinien der SBB im unteren Bereich (f: Höhenreduktion bei Vertikalausrundung) [472].

In Deutschland wurden in der BO von 1904 die Masse von 380 und 760 mm eingeführt. Mit den "Technischen Vereinbarungen über den Bau und Betrieb der Haupt- und Nebenbahnen" von 1930 sowie der "Eisenbahnbau- und Betriebsordnung" von 1928/1943 wurden Standardhöhen von 250 mm, 380 mm, 760 mm und 960 mm festgeschrieben. Die niedrigeren Werte wurden bei weniger bedeutenden Bahnhöfen angewandt, während das Perron 760 mm bei den wichtigen Stadtbahnhöfen zum Tragen kam. Das Hochperron wurde einzig im S-Bahn-Bereich realisiert. Die Deutsche Reichsbahn (Ost) modifizierte ihr Lichtraumprofil zu Beginn der Siebzigerjahre und legte als neue Standardhöhen 300 mm, 550 mm sowie 760 mm fest [26], [460]. Bei den italienischen Bahnen sind einheitliche Perronhöhen von 250 mm üblich [317].

Die U-Bahn ist in der Wahl von Wagenbodenhöhe und Perronhöhe vollkommen frei, sodass sich trotz konventioneller Fahrgestelle ohne Probleme ein höhengleicher Einstieg schaffen lässt. Dies wird dadurch zusätzlich erleichtert, dass die U-Bahn-Systeme in der Regel mit genau auf die Anlagen abgestimmtem Rollmaterial betrieben werden. Typische Perronhöhen von U-Bahnen sind 900 bis 1150 mm [599]. S-Bahnen verkehren in der Regel im Mischbetrieb mit Hauptbahnen, weshalb bisher die Perronhöhen nicht an die Wagenbodenhöhen angepasst werden konnten. Meist muss man sich damit auf die der S-Bahn vorbehaltenen Stammstrecken beschränken.

3.21.3 Perronhöhen im strassenabhängigen Nahverkehr

3.21.31 Perronhöhen bei Strassenbahn und Stadtbahn

Bei Strassenbahnen müssen die Fahrgäste das Fahrzeug zum Teil noch heute von der Strasse aus betreten. Haltestelleninseln wurden in der Vergangenheit mit Perronhöhen von 100 bis 160 mm ausgeführt. Die Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung erlauben in der Schweiz eine Perronhöhe von 180 mm. In den Normalien der Verkehrsbetriebe Zürich, welche auch die Bestimmungen des Tiefbauamtes berücksichtigen müssen, liegt die maximale Perron-

höhe jedoch bei lediglich 130 mm [67]. Wesentlich höhere Werte gestattete die ehemalige ost-deutsche BO Strab mit ursprünglich 350 mm, die nicht genutzt wurden, und später 250 mm [599]. In der BO Strab der BRD sowie in den Empfehlungen 1.15.2 des deutschen VÖV fehlt eine dies-bezügliche Festlegung [527], [528]. Die RAS-Ö, Strassenbahn, nennen ein Richtmass von ledig-lich 50 mm [151]. Erst im Zusammenhang mit der Einführung von Niederflurfahrzeugen werden in jüngerer Zeit grössere Perronhöhen von 200 mm in Würzburg, 220 mm in Kassel oder 250 mm in Grenoble realisiert [213], [226], [337], [476].

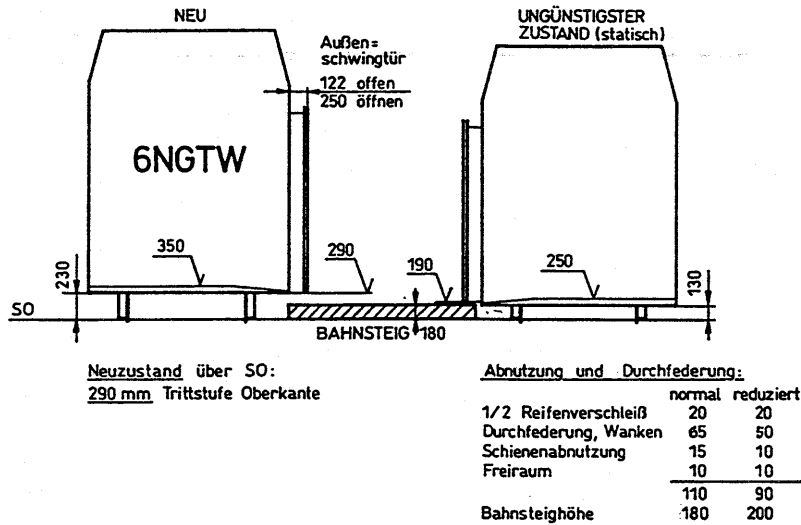


Abb. 3-29: Einflüsse auf die Höhenverhältnisse an Haltestellen beim Einsatz von Niederflurfahrzeugen, Beispiel Kassel [476].

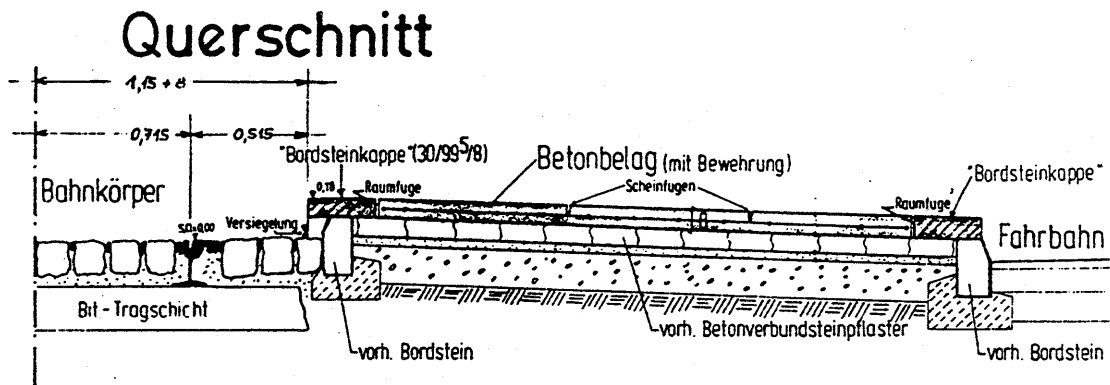


Abb. 3-30: Erhöhtes Perron der Strassenbahn Kassel mit Anrampung [476].

Die Stadtbahn mit ihrer teilweisen Mitbenutzung städtischer Strassen ist bei der Festsetzung der Perronhöhe ebenfalls nicht in gleicher Weise unabhängig wie die U-Bahn. Bereits ausgeführte Hochperrons im Strassenraum haben zu beträchtlichen Akzeptanzschwierigkeiten geführt, da das Bauwerk mit der vollen Höhe in Erscheinung tritt. Die Alternative einer teilweisen Absenkung des Gleises im Haltestellenbereich wurde bisher nur in Frankfurt am Main angewandt. Die Zurückhaltung ist auf die ungünstigen fahrdynamischen Verhältnisse und die grosse Entwicklungslänge der beidseitig zweimaligen Gefällswechsel zurückzuführen. Auf einigen Dutzend Metern sind Über-fahrten über das Geleise nicht möglich, was den Spielraum der Anordnung der Haltestelle im Stras-senraum einschränkt [66], [169], [476].

3.21.32 Perronhöhen beim Autobus

Liegen die Bushaltestellen - wie dies üblich ist - am Strassenrand, so ist die Perronhöhe mit der Trottoirhöhe identisch. Für separate Busperrons empfahl [496] 1978 ein Mindestmass von 140 mm und enthielt erste Überlegungen zu einer Anhebung auf bis zu 540 mm. Anfangs der Achtzigerjahre wurden diese Gedanken weiterentwickelt und im schwedischen Modellvorhaben von Halmstaad tatsächlich erprobt [153], [539]. Es zeigten sich dabei die vier folgenden Probleme [190]:

- Sicherheit der Fahrgäste gegen Verletzungen
- Schutz vor Materialbeschädigung
- Platzbedarf und Erscheinungsbild
- Bau- und Unterhaltskosten

Wenige Schwierigkeiten hat dagegen die manuelle Anfahrt ohne Führungsautomatik an die Haltestellen verursacht [239].

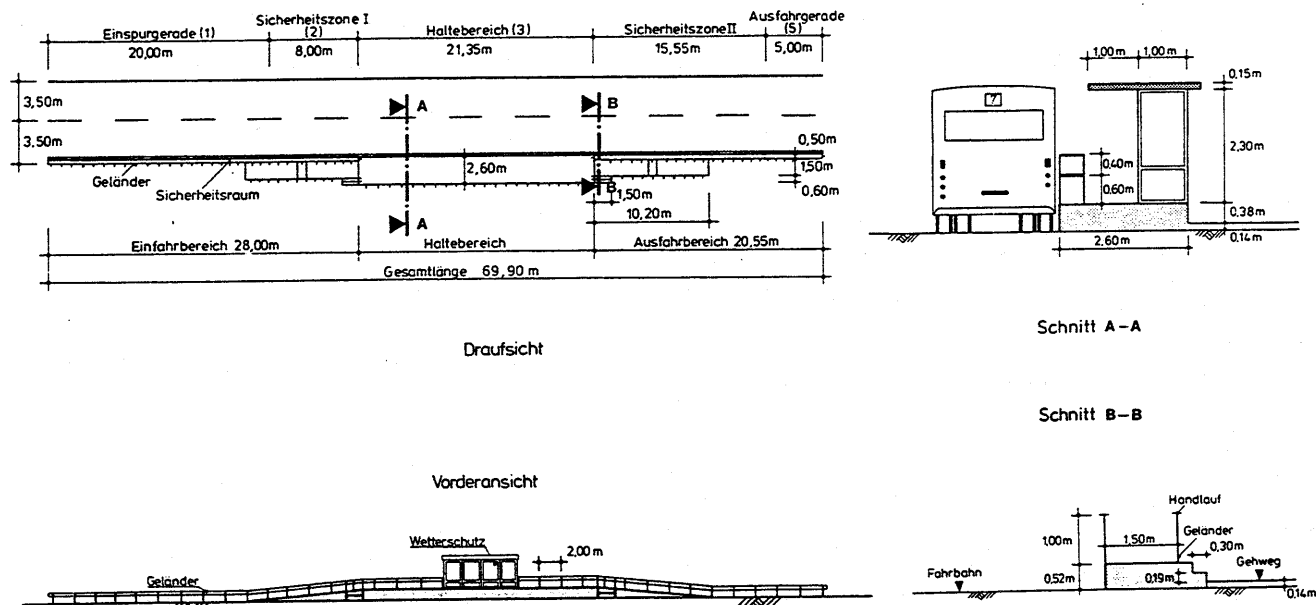


Abb. 3-31: Ausbauvorschlag von 1983 für Bushaltestelle mit erhöhter Plattform mit einer Perronhöhe von 0.52 m [539].

Als zweckmässige Masse ergaben sich aufgrund der damaligen Untersuchungen die Höhen von 320 mm und 520 mm [190]. Weitere direkte Folgen dieser Untersuchungen blieben aus. Probleme bot insbesondere die Spaltbreite zwischen Autobus und Perronkante. Um diese zu minimieren, wären Führungsvorrichtungen und eine grosse Entwicklungslänge der Haltestellenzufahrt notwendig gewesen. 1984 forderte [506] lediglich noch eine minimale Perronhöhe von 140 mm. Beim Demonstrationsvorhaben Lübeck aus jüngster Zeit wurden diese Fragen nicht mehr geprüft [272]. Die VÖV-Empfehlung 1.15.2 nennt einen Wert von 100 bis 150 mm [528]. Keine Bestimmung enthält die deutsche BO Kraft [273]. Durch die Einführung von Niederflurbussen mit Kneelingvorrichtung entfällt die Notwendigkeit einer starken Erhöhung des Perrons. Als akzeptabel gelten bei Niederflurbussen 180 mm, ein Mass, das bei paralleler Zufahrt wie beispielsweise bei Buskaps zu keinen Schwierigkeiten führt [529]. Muss ein Teil des Perrons vom Fahrzeug überstri-

chen werden können, so muss dieses Mass auf 160 mm beschränkt bleiben [78]. Bei einer Fussbodenhöhe im Einstiegsbereich von etwa 320 mm und einer Absenkung um 80 mm verbleibt damit eine Stufe von 80 mm [46], [174], [476].

3.22 Lage der Zu- und Abgänge, Ausstattung des Perrons

3.22.1 Lage der Zu- und Abgänge

Die Lage der Zugänge bestimmt die Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron mit. Klar definierte Zugänge liegen bei den U-Bahnen, teilweise bei den S- und Stadtbahnen sowie bei der Eisenbahn vor. Bei einfachen Eisenbahnanlagen ohne niveaufreien Zugang wird den Fahrgästen eine Überquerungsmöglichkeit des Gleises unmittelbar beim Aufnahmegebäude geboten. Die Fahrgäste warten in der Folge vorwiegend zentrisch zum Zug, ähnlich wie bei Unterführungen, welche direkt vom Aufnahmegebäude ausgehen. Damit können zwar kurze Wege geschaffen werden, doch ist eine ungleichmässige Zugsauslastung unvermeidlich [460]. Bei hochbelasteten Systemen versucht man, die Fahrgäste über die Anordnung der Zugänge so zu verteilen, dass eine gesamthaft möglichst gleichmässigen Auslastung der Fahrzeuge erreicht wird. Die Zahl der Zugänge ist eine Funktion der Zuglänge, der örtlichen Verhältnisse und des Verkehrsaufkommens. Häufig realisiert werden bei U-Bahnen zwei Zugänge, welche entweder an den Perronenden oder ungefähr in den Viertelspunkten des Perrons angeordnet werden. Bahnhöfe verfügen dagegen oftmals nur über eine einzige Unterführung.

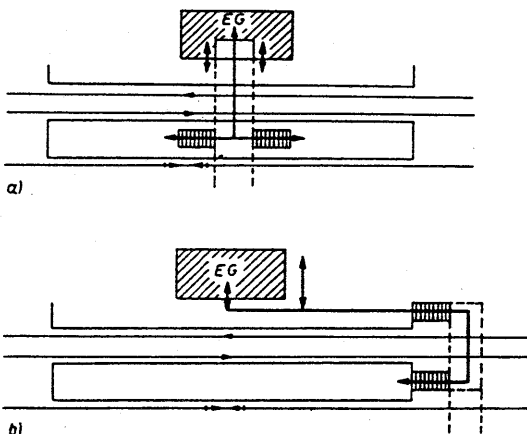


Abb. 3-32: Übliche Anordnungen von Perronzugängen. a): Mittellage, kurze und übersichtliche Wege; b): Stirlage, lange und abgewinkelte Wege; EG = Empfangsgebäude [460].

Weniger strukturiert ist die Situation bei den strassengebundenen Verkehrsmitteln. Entweder fällt die Haltekante mit dem Trottoir zusammen, was beim Bus meist der Fall ist, oder aber es bestehen Haltestelleninseln, die so niedrig sind, dass ein Betreten von allen Seiten an der nächstliegenden Stelle möglich ist. Die Verteilung der Fahrgäste auf der Wartefläche lässt sich deshalb hier lediglich beschränkt mit Hilfe der Anordnung der Fussgängerstreifen steuern. Abschrankungen stellen bisher die Ausnahme dar, wobei mit zunehmender Zahl zu überquerender Fahrbahnen die Notwendigkeit einer Kanalisierung und Sicherung des Fussgängerstromes wächst.

3.22.2 Ausstattung des Perrons

Die Ausstattung der Perrons schränkt den nutzbaren Verkehrsraum ein und kann dadurch zu Rückstauerscheinungen führen. Zudem wird durch sie die Fahrgastverteilung auf dem Perron mitbeeinflusst. Von Belang sind namentlich:

- Wetterschutzvorrichtungen
- Verkaufseinrichtungen (Billettautomaten)
- Informationsstellen
- Ruhegelegenheiten
- Kleinausstattungsgegenstände (Papierkörbe, Blumenkübel)
- Diensträume für das Personal

Zur Distanz von der Haltekante beziehungsweise zum Raum, der zwischen dem haltenden Fahrzeug und einem Element minimal gegeben sein muss, schreiben die Verkehrsbetriebe Zürich beispielsweise vor [535]:

- | | |
|--|--------|
| • Breite gegenüber festen Anlagen mit einer Länge von über 0.7 m | 1.85 m |
| • Breite an Perronenden, bei lokalen Einschnürungen (Bänke etc.) | 1.25 m |
| • Breite gegenüber punktförmigen Hindernisse unter 0.7 m | 1.00 m |
| • Breite bei Haltestellentafeln, wenn nicht mit Kinderwagen zu rechnen ist | 0.70 m |

2.50 m verlangt [78] für Strassenbahn- und Busperrons, um das Aufstellen von Kinderwagen und Rollstühlen zu ermöglichen. Die Empfehlung 1.15.2 des deutschen VÖV enthält eine Regelbreite von 2.50 m und eine Mindestbreite von 1.50 m zwischen Einbauten und Fahrzeugbegrenzungslinie [528]. Die RAS-Ö, Strassenbahn, fordert einen Mindestwert von 2.0 m für einfache Haltestelleninseln und von 2.50 m bei Doppelhaltestellen sowie beim Vorhandensein von Schutzdächern oder Spritzwänden [151]. Ebenfalls 2.0 m empfiehlt die RAS-Ö, Omnibus und Obus, für den Warteraum zwischen Haltekante und einem Radstreifen sowie 2.25 m zwischen Haltekante und Hauswand [152]. Bei Eisenbahnperrens wird eine lichte Minimalbreite zwischen Perronkante und Hindernis von 1.7 m verlangt [67]. [460] schlägt Mindestabstände zwischen Perronkante und Hindernis von 2.50 m vor. Oftmals werden die Wendemöglichkeiten für Gepäckkarren massgebend.

3.22.3 Fläche der Perrons

3.22.31 Warteflächen

Neben den einzuhaltenden Mindestmassen wird die erforderliche Perronfläche durch die aufzunehmende Personenmenge sowie die für die Bewegung erforderlichen Räume bestimmt. Die geometrisch maximale Fussgängerdichte von 6.6 P/m² wird nur in Extremfällen erreicht. Bereits bei einer Dichte von etwa 3.0 bis 3.5 P/m² lässt sich ein Körperkontakt nicht mehr vermeiden [167], [229], [399]. In Wartesituationen stellen sich daher etwa 2.5 P/m² ein. [310] weist darauf hin, dass unter städtischen Verhältnissen keine Dichten von über 2.6 P/m² beobachtet wurden. [247] und [360] haben zusätzlich gezeigt, dass die Fussgängerdichte im Warteraum von Lichtsignalanlagen mit zunehmendem Abstand von der Bordsteinkante auf unter 2 P/m² fällt. [460] nennt daher für die Perronkante eine Bemessungsdichte von 1.5 bis 2.0 P/m². Bei der Bemessung von Wetterschutzeinrichtungen ist eine Fahrgastdichte von etwa 0.7 bis maximal 1.0 P/m² anzusetzen [528].

3.22.32 Bewegungsflächen

Der dynamische Platzbedarf für die Fortbewegung ist grösser als der statische. In Richtung der Bewegung muss der Fussgänger seine Beine im gewünschten Mass auslenken und bei einem plötzlichen Stopp der vor ihm gehenden Person anhalten können. In seitlicher Richtung treten Schwankungsbewegungen des Körpers auf:

- Der Bewegungsraum in *Querrichtung* wird als Fussgängerspür bezeichnet. Dafür werden im Mittel 0.71 m genannt, während niedrigere Werte von etwa 0.60 m für Treppen und Rampen angeführt werden. [451] hat gefunden, dass die Gesamtschwankung der Fussgänger (inklusive Abweichung von der idealen Bahn) für 85 % der Fussgänger in einer Bandbreite von 28.2 cm liegt, es treten aber Werte bis über 60 cm auf. Diese Bandbreite nimmt mit der Geschwindigkeit zu [360]. Für die Breite der Fussgänger spielt die Verteilung der Körperproportionen eine Rolle, ebenso die Wahrscheinlichkeit der Mitnahme von Gepäck oder der Begleitung durch Kinder und Hunde:

Tab. 3-6: 50 %- und 85 %-Fussgängerbreiten in Abhängigkeit von der Gepäckbeförderung sowie der Begleitung durch Kinder und Hunde [451].

Behinderung der zweiten Hand	Behinderung der ersten Hand							
	Hand leer	Kleines Gepäck	Mittleres Gepäck	Grosses Gepäck	Kind	Kinderwagen	Stock	Hund
Hand leer	64 73	73 81	73 80	89 100	107 120	63 70	69 74	108 122
Kleines Gepäck		75 83	72 80	78 84	107 120	68 76	69 74	108 122
Mittleres Gepäck			74 81	85 95	107 120	68 76	69 74	108 122
Grosses Gepäck				79 84	107 120	- -	- -	- -
Kind					141 160	97 110	- -	- -
Kinderwagen		oben: 50 % - Wert in [cm] unten: 85 % - Wert in [cm]				- -	- -	- -
Stock							- -	108 122

Aus den mittleren Schwankungen und der gewichteten Breitenverteilung ergibt sich, dass der Fussgänger-Bewegungsraum für die Hälfte der Fussgänger kleiner als 82 cm und für 85 % der Fussgänger kleiner als 101 cm ist. Die aus der Literatur abgeleitete Spurbreite ist dagegen für praktische Verhältnisse ungenügend.

- In *Längsrichtung* muss mit wachsender Geschwindigkeit ein grösserer Abstand gegeben sein, um die längeren Schritte zu gestatten. In der Literatur wird meist ein Längsabstand von 1.0 m und eine Fussgängerdichte von rund 1.4 P/m² postuliert (zum Beispiel [57], [310], [360], [448], [533]). Die wünschbare erachtete Fussgängerdichte liegt aber darunter [57], [212], [229], [352], [399], [499], [555].

Die Festlegung der Dichte der Bewegungsflächen hat letztlich unter Berücksichtigung der Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit von der Dichte sowie der Qualitätskriterien zu erfolgen.

3.23 Leistungsfähigkeit der Fussgängeranlagen

3.23.1 Grundlagen der Dimensionierung

Die Zahl der Fussgänger, welche während einer bestimmten Zeit einen Querschnitt durchströmt, beträgt:

$$(3-6) \quad F = D \cdot v_F(D) \cdot B_N \cdot t$$

wobei	F	Anzahl Fussgänger [P]
	D	Fussgängerdichte [P/m ²]
	v _F (D)	Fussgängergeschwindigkeit in Funktion der Fussgängerdichte [m/s]
	B _N	Nutzbare Fusswegbreite [m]
	t	Beobachtungszeit [s]

Die nutzbare Fusswegbreite B_N ergibt sich aus der Bruttobreite B_B der Fussgängeranlage abzüglich eines Verlustes B_H infolge von Hindernissen oder Wandeinflüssen:

$$(3-7) \quad B_N = B_B - B_H$$

wobei	B _B	Bruttobreite der Fussgängeranlage [m]
	B _H	Verlust infolge von Hindernissen oder Wandeinflüssen [m]

Die spezifische Leistungsfähigkeit ist definiert als Anzahl der Fussgänger, welche pro Zeiteinheit einen Querschnitt von 1 m Breite passieren können:

$$(3-8) \quad L_s = D \cdot v_F(D)$$

wobei	L _s	Spezifische Leistungsfähigkeit einer Fussgängeranlage [P/sm]
-------	----------------	--

3.23.2 Nutzbare Breite des Verkehrsraumes

Der Fussgänger hält gegenüber der Begrenzung des Verkehrsraumes einen Mindestabstand ein. Auf Trottoirs hat [514] einen mittleren Abstand zu Hauswänden von 0.61 m, zu Zäunen und Gartenmauern von 0.46 m und zur Fahrbahn von ebenfalls 0.46 m beobachtet. Kleinere Werte von zwischen 0.00 m und 0.46 m nennt [158]. Bei Wänden in Korridoren hat [187] einen Abstand von 0.20 m zu Betonwänden und 0.14 bis 0.17 m zu Metallwänden festgestellt. [460] schliesslich postuliert einen Abzug bei Wänden von 0.10 m und bei Perronkanten von 0.50 m. Näherungsweise kann somit von folgenden Verlustbreiten ausgegangen werden:

- Abstände in Korridoren
 - Betonwand 0.25 m
 - Metallwand 0.20 m
- Abstände auf Trottoirs
 - Hauswand 0.45 m
 - Gartenzaun 0.35 m
 - Fahrbahn 0.35 m
- Abstand auf Perron zur Perronkante 0.50 m

Analog zu den Berandungen kommt bei Hindernissen zur Objektbreite ein Objektabstand hinzu. [451] hat ermittelt, dass dieser unter Normalbedingungen in 50 % der Fälle bis zu 0.30 m, in 85 % der Fälle bis zu 0.43 m beträgt. Der minimal tolerierte Abstand liegt in 50 % der Fälle unter 0.23 m und in 85 % der Fälle unter 0.36 m. [187] nennt dafür unabhängig von den Abmessungen des Hindernisses 0.10 m, was zu wenig sein dürfte. In Schaufensterbereichen von Einkaufsstrassen schliesslich ist die nutzbare Breite im Mittel um 0.75 m abzumindern ([242], [362], [514]).

3.23.3 Berechnung der Leistungsfähigkeit

3.23.31 Leistungsfähigkeit in der Ebene

Die aus der Dimensionierung von Individualverkehrsanlagen stammende Funktion von Kladek (nach [448]) beschreibt auch den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Dichte von Fussgänerbewegungen recht treffend:

$$(3-9) \quad v_i = v_{F,f} \cdot \left[1 - e^{-\gamma \cdot \left\{ \frac{1}{D} - \frac{1}{D_{\max}} \right\}} \right]$$

wobei	v_i	Geschwindigkeit bei einer bestimmten Dichte [m/s]
	$v_{F,f}$	Geschwindigkeit bei voller Freizügigkeit [m/s]
	γ	Eichkonstante [P/m^2]
	D	Fussgängerichte [P/m^2]
	D_{\max}	Fussgängerichte, bei welcher eine Bewegung unmöglich wird [P/m^2]

Mit $v_{F,f} = 1.34$ m/s und $D_{\max} = 5.4$ P/m^2 sowie dem früher hergeleiteten Kurvenverlauf von v_i ergibt sich die Eichkonstante zu $\gamma = 1.913$ P/m^2 :

$$(3-10) \quad v_i = 1.34 \cdot \left[1 - e^{-1.913 \cdot \left\{ \frac{1}{D} - \frac{1}{5.4} \right\}} \right]$$

Durch Umformung wird aus den Beziehungen (3-8) und (3-10) der Ausdruck für die Leistungsfähigkeit in Funktion der Geschwindigkeit:

$$(3-11) \quad L_s = \frac{v_i}{\frac{1}{5.4} - \frac{\ln\left(1 - \frac{v_i}{1.34}\right)}{1.913}}$$

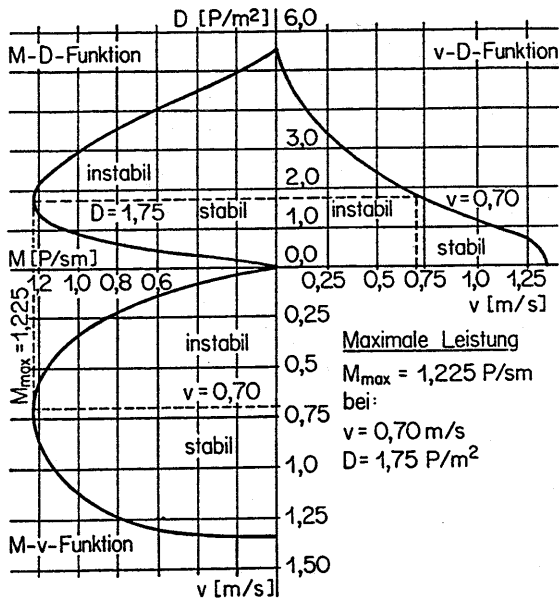


Abb. 3-33: Fundamentaldiagramm für Fussgängerverkehrsanlagen, Richtungsverkehr.

Die maximale Leistungsfähigkeit unter Normalbedingungen liegt bei etwa 1.23 P/sm. Sie wird erreicht bei einer Fussgängerdichte von 1.75 P/m² und bei einer Fussgängergeschwindigkeit von 0.70 m/s. Verglichen mit den Literaturangaben ist dies eher wenig. Mehrere Autoren ([22], [25], [155], [354], [360]) geben Werte zwischen 1.4 und 1.5 P/sm an. Es finden sich aber auch tiefere Zahlen ([139], [360]), wobei die meisten Autoren die Dichte bei höchster Leistungsfähigkeit bei etwa 1.8 bis 2.0 P/m² ansiedeln.

Bei entgegengesetzten Fussgängerströmen verursacht die Behinderung einen Leistungsabfall. [22], [25], [155] und [354] nennen eine mittlere Einbusse von rund 8 %. [399] spricht von unter 6 % und [363] gibt an, dass kein grosser Einfluss des Gegenverkehrs zu erwarten sei, da sich die beiden Verkehrsströme im Rechtsverkehr separieren. Diese Aussage deckt sich mit jener von [202] und [514]. [352] hat zusätzlich festgestellt, dass der Verlust bei gleichgrossen Fussgängerströmen mit 4 % am kleinsten ist. Bei einem Verhältnis von 90 % zu 10 % steigt die Verlustrate auf 14.5 % an.

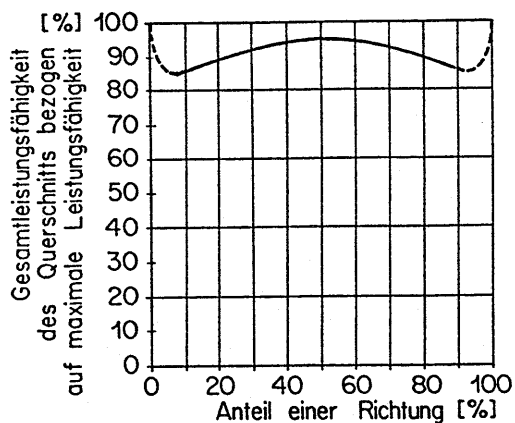


Abb. 3-34: Prozentuale Leistungsfähigkeit eines Querschnitts bei Gegenverkehr, bezogen auf die Leistungsfähigkeit bei einseitig gerichtetem Fussgängerstrom (nach [352]).

3.23.32 Leistungsfähigkeit von Treppen

Für Treppen kann der Zusammenhang zwischen der Fussgängerichte und der Geschwindigkeit ebenfalls durch die Funktion von Kladek approximiert werden:

$$(3-12) \quad v_{h,auf} = 0.610 \cdot \left[1 - e^{(-3.722 \cdot \{\frac{1}{D} - \frac{1}{5.4}\})} \right]$$

$$(3-13) \quad v_{h,ab} = 0.694 \cdot \left[1 - e^{(-3.802 \cdot \{\frac{1}{D} - \frac{1}{5.4}\})} \right]$$

wobei $v_{h,auf}$ Horizontalkomponente der Fussgängergeschwindigkeit beim Aufwärtsgehen in Abhängigkeit von der Fussgängerichte [m/s]
 $v_{h,ab}$ Horizontalkomponente der Fussgängergeschwindigkeit beim Abwärtsgehen in Abhängigkeit von der Fussgängerichte [m/s]

Analog zu (3-11) wird der Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit und Geschwindigkeit zu:

$$(3-14) \quad L_{s,auf} = \frac{v_i}{\frac{1}{5.4} - \frac{\ln\left(1 - \frac{v_i}{0.610}\right)}{3.722}}$$

$$(3-15) \quad L_{s,ab} = \frac{v_i}{\frac{1}{5.4} - \frac{\ln\left(1 - \frac{v_i}{0.694}\right)}{3.802}}$$

wobei $L_{s,auf}$ Spezifische Leistungsfähigkeit von Treppen beim Aufwärtsgehen [P/sm]
 $L_{s,ab}$ Spezifische Leistungsfähigkeit von Treppen beim Abwärtsgehen [P/sm]

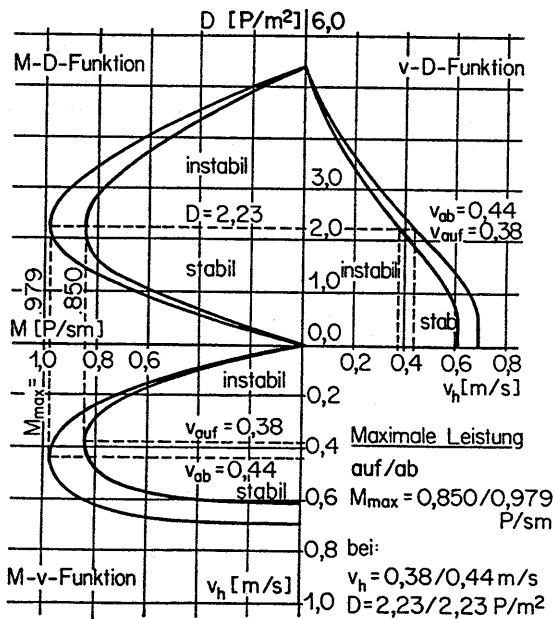


Abb. 3-35: Fundamentaldiagramm für Treppen, Richtungsverkehr.

Die Fussgängerdichte bei maximaler Leistungsfähigkeit beträgt für das Aufwärts- wie für das Abwärtsgehen 2.23 P/m^2 und damit rund 0.5 P/m^2 mehr als in der Ebene. Die maximale spezifische Leistungsfähigkeit beläuft sich beim Aufwärtsgehen auf 0.850 P/sm und beim Abwärtsgehen auf 0.979 P/sm bei Geschwindigkeiten von 0.38 m/s beziehungsweise 0.44 m/s . Treppen sind somit um etwa 25 % weniger leistungsfähig als ebene Fusswege. Diese Maximalleistung liegt leicht unter den 46 Literaturangaben, aus welchen sich ein Mittelwert von 1.05 P/sm errechnet. Eine gute Übereinstimmung besteht bezüglich des prozentualen Unterschiedes zwischen der Leistungsfähigkeit in Steigungs- und Gefällrichtung. Die oben ermittelte Leistungsfähigkeit in Steigungsrichtung liegt um 13 % unter jener in Gefällrichtung. Die 16 Wertepaare in der Literatur ergeben einen Unterschied von 17 %.

3.23.4 Zulässige Belastung der Verkehrsanlagen

3.23.41 Das Level-of-Service-Konzept

Bei der Bemessung einer Fussgängeranlage ist die Verwendung der maximalen Leistungsfähigkeit nicht zulässig, da sie erst bei unangenehm hohen Fussgängerdichten erreicht wird. Deshalb sind Komfortbetrachtungen beziehungsweise die Definition von Levels-of-Service (LOS) mittels folgender Kriterien nötig (nach [399], [514]):

K1	Möglichkeit zur freien Geschwindigkeitswahl
K2	Häufigkeit eines erzwungenen Geschwindigkeitswechsels
K3	Zwang zur Beachtung anderer Fussgänger
K4	Häufigkeit eines erzwungenen Richtungswechsels
K5	Behinderung bei Querung eines Fussgängerstromes
K6	Behinderung bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung
K7	Behinderung beim Überholen
K8	Häufigkeit unbeabsichtigter Berührungen

Aufgrund der untersuchten Literatur lassen sich acht detaillierte Qualitätsstufen bestimmen ([63], [184], [310], [360], [383], [399], [448], [451], [514], [555]). Diese zeigen, dass die Benützungsgüte und Geschwindigkeit im tiefen Dichtebereich besonders empfindlich auf kleine Belastungsänderungen reagieren:

Tab. 3-7: Definition und Charakterisierung der verschiedenen Levels-of-Service beim Gehen in der Ebene.

LOS	Dichte P/m^2	Kriterium								Gesamtcharakterisierung
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	
A	0.00-0.10	+	+	+	+	+	+	+	+	absolut freie Bewegung
B	0.10-0.30	+	+	=	+	+	+	+	+	freie Bewegung
C	0.30-0.45	=	+	=	=	=	=	=	+	schwache Behinderung
D	0.45-0.60	=	=	=	=	-	-	-	+	mässige Behinderung
E	0.60-0.75	-	-	-	=	-	-	-	+	starke Behinderung
F	0.75-1.00	-	-	-	-	-	-	-	+	dichter Verkehr
G	1.00-1.50	-	-	-	-	-	-	-	=	mässiges Gedränge
H	1.50-2.00	-	-	-	-	-	-	-	-	starkes Gedränge
I	2.00-5.40	-	-	-	-	-	-	-	-	massives Gedränge

+ gut

= mittelmässig

- schlecht

Die einzige umfassende Auskunft zur Benützungsgüte von Treppen enthält [229] sowie daraus abgeleitet und vereinfacht [399]. Erkennbar ist in [229] wie auch in der Dichte-/Geschwindigkeitskurve, dass Fussgänger auf Treppen beim selben Grad des Wohlbefindens eine höhere Verkehrsdichte akzeptieren als in der Ebene. Parallel dazu ist die Geschwindigkeitsabnahme geringer.

Tab. 3-8: Definition und Charakterisierung der verschiedenen Levels-of-Service beim Gehen auf Treppen.

LOS	Dichte P/m ²	Kriterium								Gesamtcharakterisierung
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	
A	0.00-0.20	+	+	+	+	+	+	+	+	absolut freie Bewegung
B	0.20-0.60	+	+	=	+	+	+	+	+	freie Bewegung
C	0.60-0.75	=	+	=	=	=	=	=	+	schwach Behinderung
D	0.75-0.90	=	=	=	=	-	-	-	+	mässige Behinderung
E	0.90-1.15	-	-	-	=	-	-	-	+	starke Behinderung
F	1.15-1.65	-	-	-	-	-	-	-	+	dichter Verkehr
G	1.65-2.15	-	-	-	-	-	-	-	=	mässiges Gedränge
H	2.15-2.60	-	-	-	-	-	-	-	-	starkes Gedränge
I	2.60-5.40	-	-	-	-	-	-	-	-	massives Gedränge

3.23.42 Richtwerte der zulässigen Belastungen

Die wenigen Hinweise in der Literatur zur Bemessungsdichte nennen in der Ebene im Normalfall etwa 0.3 P/m², für den Stossverkehr etwa 0.6 P/m² und für Spitzenbelastungen an Engpässen maximal 1.0 P/m² ([25], [310], [360], [448]). Bei Treppen gilt dafür gemäss [448] ein Wert von etwa 1.3 P/m² und gemäss [25] ein solcher von rund 1.7 P/m². Letzterer erscheint als eher zu hoch. Die folgenden Richtwerte sollen in vergleichbaren Fällen sowohl bei Treppen als auch bei ebenen Fussgängeranlagen ein homogenes Qualitätsniveau sicherstellen.

Tab. 3-9: Bemessungsrichtwerte für Fussgängeranlagen.

Fall	LOS	Dichte [P/m ²]	Geschwindigkeit [m/s] auf / ab	Leistung [P/ms] auf / ab
Ebene				
• Normal	B	0.2	1.34	0.27
• Stossverkehr	D	0.5	1.30	0.65
• Engpässe	F	0.9	0.81	0.73
Treppe				
• Normal	B	0.4	0.61 / 0.69	0.24 / 0.28
• Stossverkehr	D	0.8	0.60 / 0.68	0.48 / 0.55
• Engpässe	F	1.5	0.51 / 0.58	0.76 / 0.87

3.3 Fahrzeug

3.31 Grundkomponenten eines Fahrzeuges und Abmessungen

3.31.1 Grundkomponenten und deren Anforderungen

Die Systemkomponente "Personenfahrzeug" dient der Beförderung von Reisenden und muss somit folgende Aufgaben erfüllen:

- Übertragen der statischen Kräfte -> Tragen
- Erzeugen der dynamischen Kräfte -> Antreiben
- Kontrollieren der Freiheitsgrade -> Steuern und Führen
- Erfüllen der Transportaufgabe -> Befördern

Personenfahrzeuge des öffentlichen Verkehrs setzen sich daher aus folgenden vier Grundkomponenten zusammen:

- Fahrwerk mit Aufhängung und Federung
- Antriebseinrichtungen mit Motor, Kraftübertragung und Getriebe
- Steuerungs- und Bedienungseinrichtungen
- Einstieg und Aufenthaltsraum für die Fahrgäste

Bei nicht-angetriebenen Fahrzeugen entfallen die Antriebs- und Steuerungseinrichtungen. Da ein Fahrzeug ein komplexes technisches System mit eng gesetzten Randbedingungen ist, kann keine seiner vier Grundkomponenten losgelöst von den übrigen betrachtet werden. Jede stellt ihre spezifischen Anforderungen an den zur Verfügung stehenden Raum und konkurrenziert dabei die übrigen drei:

- *Fahrwerk:* Das Fahrwerk mit Aufhängung und Federung erfordert eine minimale Bauhöhe. Die Lage der Räder wird in Querrichtung von der Spurbreite und in Längsrichtung vom gewünschten Fahrverhalten des Fahrzeuges diktiert. Das Volumen für Fahrwerk, Aufhängung und Federung ist eine Funktion der Achslast, der gefahrenen Geschwindigkeit, des angestrebten Fahrkomforts, der Qualität der Fahrbahnoberfläche und der verlangten Schalldämmung.
- *Antriebseinrichtungen:* Die Antriebseinrichtungen sollen möglichst nahe bei den Antriebsrädern plaziert werden, um grosse Übertragungswege zu vermeiden. Ihr Volumen ist nebst der Energieart (elektrischer Motor, Verbrennungsmotor) und der Art der Kraftübertragung (hydraulisch, elektrisch, mechanisch) namentlich von der Leistung abhängig. Zum Antrieb im weiteren Sinn gehören die Energieversorgung bei elektrischen Fahrzeugen (Transformator, Leistungselektronik) beziehungsweise die Treibstoffreserve bei Verbrennungsfahrzeugen. Die Grösse des ersteren ist leistungs-, diejenige der letzteren reichweitenabhängig.
- *Steuerungs- und Bedienungseinrichtungen:* Bei der Anordnung der Steuerungseinrichtungen besteht ein gewisser Spielraum. Das Volumen der Steuerungseinrichtung ist gegeben durch die Steuerungsart (Stufenschalter, Steuerelektronik) und die zu steuernde Leistung. Die Steuereinrichtungen sind empfindlich und sollten gut zugänglich sein. Die Bedienungseinrichtungen für die Kontrolle der Leistung und gegebenenfalls die Lenkung sind im Führerstand an der Fahrzeugspitze konzentriert.

- **Einstieg und Aufenthaltsraum:** Die Einstiege sollen möglichst zahlreich und gleichmässig verteilt sein. Der Aufenthaltsraum soll möglichst viel Platz bieten und für einen guten Fahrkomfort sowie die leichte Reinigung frei von Einbauten und Höhendifferenzen sein. Die Optimierung zwischen dem Ziel vieler Sitzplätze und jenem zahlreicher Einstiege erfolgt mit Bezug auf die Beförderungslänge der Fahrgäste. Die Flächen, die für die Zirkulation der Fahrgäste im Fahrzeug zur Verfügung stehen, sollen die Bewegung erleichtern, was minimale Dimensionen verlangt. Die erforderliche Raumhöhe ist durch die Körpergrösse der Fahrgäste sowie allfällige Komforteinrichtungen (Klimaanlage, Lüftung etc.) gegeben.

Die letztere Grundkomponente wird im folgenden als fahrgastbezogene Grundkomponente bezeichnet.

3.31.2 Fahrzeugabmessungen

3.31.21 Überblick

Alle Einzelelemente der vier Grundkomponenten müssen innerhalb des zur Verfügung stehenden Fahrzeugvolumens untergebracht werden. Das Fahrzeugvolumen ist gegeben durch Fahrzeugbreite, -länge und -höhe. Bestimmt werden diese Masse durch die Fahrzeugbegrenzungslinie der Strecke, wobei die maximal mögliche Fahrzeuglänge über die Kurvenradien und den Überhang auf das Lichtraumprofil zurückgehen. Von Bedeutung für die Raumaufteilung und den Fahrgastwechsel sind Fahrzeugbreite und Fahrzeuglänge.

3.31.22 Fahrzeugbreite

Massgebend für die Breite von Vollbahnfahrzeugen sind die UIC-Merkblätter 505-2, 507 und 567 sowie die nationalen Lichtraumprofile [105]. Für schweizerische Verhältnisse sind dies die Lichtraumprofile der Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung [67]. Weitere Abzüge können für die Befahrbarkeit kleiner Radien notwendig werden (Berücksichtigung des Überhanges). Die üblichen Vollbahnfahrzeuge weisen Breiten von zwischen 2800 und 2900 mm auf. Nur wenn keine internationale Übergangsfähigkeit verlangt wird, der Einsatz auf einem definierten Netzteil erfolgt oder eine reduzierte Fahrzeuglänge in Kauf genommen wird kommen überbreite Fahrzeuge in Frage.

Tab. 3-10: Äussere und innere Breiten ausgewählter Vollbahnfahrzeuge [38], [105], [128], [405], [424], [468], [494], [516].

Wagentyp	Fahrzeugbreite	
	Aussen	Innen
Zweiachsiger Personenwagen, Serie AB 1726 SBB	3080 mm	2870 mm*)
Triebwagenzug S-Bahn Berlin, BR 485	3050 mm	2930 mm
Rekowagen DR, dreiachsige Bauart	3043 mm	2943 mm
Triebwagenzug S-Bahn Kopenhagen	3024 mm	2874 mm*)
Reisezugwagen DB, Zwischenwagen ICE	3020 mm	2840 mm
Leichtstahlwagen SBB, Bauart 1937	2920 mm	2724 mm
Mittleinstiegswagen SBB	2920 mm	2720 mm
Eilzugwagen DR, Bauart 1942	2910 mm	2834 mm
S-Bahn-Triebwagenzug DB, BR 420	2900 mm	2740 mm
Einheitswagen SBB, Typ I	2900 mm	2700 mm
Rekowagen DR, vierachsige Bauart	2900 mm	2750 mm
Reisezugwagen DR, Typ Y	2883 mm	2759 mm
Steuerwagen SBB, Typ NPZ	2860 mm	2710 mm
Einheitswagen SBB, Typ II	2850 mm	2666 mm
Doppelstockwagen SNCF, Bauart 1975	2846 mm	2750 mm
Einheitswagen SBB, Typ IV	2825 mm	2655 mm
RIC-Wagen Typ UIC, SBB	2825 mm	2705 mm
D-Zug-Wagen DB, Bauart 1953	2825 mm	2705 mm
Mittleinstiegswagen DB, Bauart 1951	2825 mm	2705 mm
Reisezugwagen DB, Typ Bpmz 291	2825 mm	2685 mm
Reisezugwagen DR, Typ X	2825 mm	2666 mm*)
Reisezugwagen DR, Typ Z	2824 mm	2654 mm*)
Doppelstockgliederzug DR, fünfteilig	2820 mm	2680 mm*)
Doppelstock-Standardwagen DR	2780 mm	2640 mm

*) Schätzung

Erkennbar wird in Tabelle 3-8 der Einfluss der Wagenlänge auf die Wagenbreite. Ein Doppelstock-Standardwagen der DR mit seiner Länge von 26'800 mm weist eine um 260 mm kleinere Breite auf als der 13'120 mm lange dreiachsige Rekowagen der gleichen Bahnunternehmung.

Die Fahrzeugbreiten von europäischen Schmalspurbahnen liegen durchwegs tiefer als bei Vollbahnen, was sich mit deren Nebenbahncharakter erklärt. Überseeische Schmalspurbahnen mit Hauptbahncharakter (Südafrika, Japan) erreichen dagegen wesentlich grössere Werte. Da in Europa keine weitläufigen Schmalspurnetze geplant wurden, fehlte die Veranlassung für eine internationale Normierung der Fahrzeugabmessungen und die Breite der Fahrzeuge konnte nach Kostenkriterien optimiert werden. Die Fahrzeugbreiten variieren daher stark und reichen in der Schweiz von 2200 mm bis 2650 mm. Daraus ergeben sich innere Breiten von 2030 mm bis 2500 mm [468].

U-Bahnen können grundsätzlich beliebig breit gebaut werden, weil sie von der Umgebung unabhängig sind. Da die Fahrzeugbreite eng mit dem Tunnelprofil zusammenhängt, sind ökonomische Grenzen gegeben. Bisher wurden Breiten von zwischen 2060 mm und 3200 mm realisiert:

Tab. 3-11: Überblick über realisierte Fahrzeugbreiten bei U-Bahnen, Beispiele [10], [359], [109], [368], [456], [599].

Breite	U-Bahn-Netze (Beispiele)
3200 mm	Oslo
3175 mm	Rio de Janeiro, Sao Paulo
3125 mm	Toronto
3115 mm	Boston
3080 mm	San Francisco
2900 mm	München, Nürnberg
2850 mm	Mailand, Chicago
2820 mm	New York, Athen
2800 mm	Stockholm, Osaka, Wien
2790 mm	Tokio
2745 mm	Philadelphia
2700 mm	Lissabon, Moskau, Budapest
2680 mm	Rotterdam
2650 mm	Berlin/Grossprofil, Frankfurt, Stadtbahn Ruhr
2550 mm	London
2508 mm	Hamburg
2500 mm	Mexiko City
2470 mm	Montreal
2400 mm	Paris
2300 mm	Berlin/Kleinprofil
2060 mm	Lille/VAL

Bei Strassenbahnen waren anfänglich Breiten von etwa 1900 bis 2000 mm üblich, die in der Schweiz allmählich auf 2200 mm erhöht wurde [601]. In Genf sind seit 1984 erstmals Fahrzeuge mit einer Breite von 2300 mm in Betrieb. Strassenbahnen in anderen Ländern Europas gehen in ihrer Fahrzeugbreite kaum über 2500 mm hinaus. Stadtbahnen erreichen bis etwa 2650 mm. Dieser Wert ist von der deutschen BO Strab als Höchstbreite für Fahrzeuge festgelegt worden, welche im Strassenraum verkehren [527]. Entsprechend hat der deutsche VÖV zwei Stadtbahntypen mit 2650 und 2400 mm Breite definiert (Typen 265 und 240) [530]. Die örtlichen Verhältnisse bezüglich der Gleisabstände und Depotanlagen führen dazu, dass auch weiterhin mit einer beträchtlichen Zahl verschiedener Fahrzeugbreiten gerechnet werden muss. Anfangs der Siebzigerjahre fand [455] bei Strassen-, Stadt- und U-Bahnen in der BRD noch 25 verschiedene Masse zwischen 2000 und 2900 mm. Neuere Angaben sind leider nicht verfügbar.

Tab. 3-12: Breite von Strassenbahn- und Stadtbahnbetrieben, Beispiele [36], [211], [311], [495], [536], [601].

Breite	Strassenbahn-Netze (Beispiele)
2650 mm	Nantes, Sheffield
2600 mm	Moskau, Trondheim
2525 mm	Köln
2500 mm	Chemnitz, Düsseldorf (Überland), Hannover
2400 mm	Darmstadt, Karlsruhe, Strassburg (geplant), Würzburg
2350 mm	Den Haag, Duisburg, Düsseldorf (Stadt), Frankfurt, München, Nürnberg
2340 mm	Amsterdam
2325 mm	Freiburg
2310 mm	Rotterdam
2300 mm	Bochum, Bremen, Genf, Grenoble, Kassel, Mühlheim, Rom, Turin, Wien
2205 mm	Innsbruck
2200 mm	Augsburg, Basel, Berlin, Bern, Braunschweig, Brüssel, Erfurt, Essen, Graz, Krefeld, Leipzig, Linz, Ludwigshafen, Mainz, Stuttgart, Zürich
2100 mm	St-Etienne

Die Breite von Strassenfahrzeugen richtet sich nach den jeweiligen nationalen Vorschriften. Gegenwärtig ist international eine Breite von 2500 mm üblich. In Schweden sind bis zu 2600 mm zugelassen, in der Schweiz bestehen hingegen noch Strassen mit einer zulässigen Maximalbreite von lediglich 2300 mm. Dies ergibt zusammen mit einer Konstruktionsdicke der Wände lichte Innenbreiten von 2500 mm, 2400 mm beziehungsweise 2200 mm [144], [496].

3.31.23 Fahrzeuglänge

Da rund 40 % der Wagenmasse von der Fahrzeuglänge unabhängig sind, verspricht eine grosse Fahrzeuglänge einigen Rationalisierungsgewinn. Für Vollbahn-Reisezugwagen wurde ein Optimum von etwa 27'500 mm gefunden [105], [424]. Eine weitere Verlängerung stösst wegen des zunehmenden Überhanges in den Kurven auf Grenzen. Die Breitenreduktion des Wagenkastens macht einen wesentlichen Teil des Gewinns zunichte. Bei der Fahrzeuglänge wird ein Wert angestrebt, welcher einem ganzzahligen Vielfachen der einzelnen Raumelemente entspricht. Raumelemente sind die Sitzplatzabteile, die Einstiegsbereiche, die Abortanlagen etc. Aus dieser Überlegung, den Abteillängen von 2100 mm in der ersten beziehungsweise 1700 mm in der 2. Klasse sowie den Türen leiteten sich in den Fünfzigerjahren der UIC-Einheitstyp X und in den Siebzigerjahren der Typ Z mit der internationalen Standardlänge von 26'400 mm ab. Bei Strassen- und Überlandbahnen liegen die Wagenkastenlängen beziehungsweise die Längen der Kastensegmente tiefer und können bei Gelenkwagen infolge der engeren Kurvenradien und Platzverhältnisse auf 4000 mm sinken.

Bei Strassenfahrzeugen sind die Fahrzeuglängen durch die nationalen Vorschriften bestimmt. Für einteilige Autobusse gilt beispielsweise in der Schweiz eine Maximallänge von 12'000 mm beziehungsweise mit Ausnahmegewilligung eine solche von 13'000 mm, bei Gelenkbussen sind 18'000 mm zugelassen. Sogenannte Doppelgelenkbusse mit ihrer Länge von etwa 23'000 mm dürfen vorderhand nicht eingesetzt werden [67], [144].

3.32 Elemente der fahrgastbezogenen Grundkomponente

3.32.1 Funktionen der Einzelemente

Die fahrgastbezogene Grundkomponente eines Fahrzeuges dient den zwei folgenden Funktionen:

- *Durchleitungsfunktion:* Ermöglichen des Besteigens und Durchquerens eines Fahrzeuges.
- *Aufenthaltsfunktion:* Anbieten von Orten, an welchen sich die Fahrgäste während ihrer Fahrt aufhalten können.

Die fahrgastbezogene Grundkomponente des Fahrzeuges kann bis zu acht verschiedene Einzelemente umfassen:

Tab. 3-13: Einzelemente der fahrgastbezogenen Fahrzeug-Grundkomponente und deren Funktionen.

Elemente	Nahverkehr		Fernverkehr	
	D	A	D	A
Einstiegstüren	X		X	
Einstiegstreppen	X		X	
Stauräume beziehungsweise Auffangräume im Türbereich	X	X	X	
Treppen im Fahrzeuginnern	X	X	X	
Verbindungswege im Fahrzeuginnern	X	X	X	
Verbindungswege zwischen Fahrzeugen	X	X	X	
Gangflächen zwischen oder neben den Sitzreihen	X	X	X	
Sitzplatzbereiche		X		X

D Durchleitungsfunktion A Aufenthaltsfunktion

Die Detailgestaltung aller Einzelemente muss auf ihre jeweiligen Funktionen abgestimmt werden. Im Nahverkehr mit Mischnutzung der Einzelemente müssen die Bewegungsflächen grosszügiger dimensioniert werden als im Fernverkehr mit weitgehender Funktionstrennung. Im folgenden Abschnitt werden die acht verschiedenen Einzelemente näher betrachtet. Aus der Fülle unterschiedlicher Fahrzeuge werden nur typische Vertreter dargestellt.

3.32.2 Einzelemente der fahrgastbezogenen Grundkomponente

3.32.2.1 Einstiegstüren

Die für einen guten Fahrgastwechsel wünschbare grosse Türbreite kollidiert mit dem Ziel einer einfachen konstruktiven Lösung, schnellem Öffnen und Schliessen, grossem Sitzplatzangebot sowie einem möglichst geringen Wärmeverlust im Winter. Fahrzeugtüren weisen Breiten von zwischen etwa 700 und 1900 mm auf. Für Fernverkehrswagen gilt ein Mindestmass von etwa 740 mm [105]. Die deutsche BO Strab schreibt eine minimale lichte Durchgangsbreite von 650 mm vor und enthält zudem zugunsten der Behinderten die international gültige Verpflichtung zum Einbau von mindestens einer Türe pro Seite mit einer lichten Breite von 800 mm. Im Strassenbahn- und Busverkehr liegt die obere Grenze realisierter Türen bei etwa 1300 mm. Überbreite Türen von 1800 bis 1900 mm sind bisher nur bei Doppelstockwagen gebräuchlich.

Bei Fahrzeugen mit Treppeneinstiegen und Haltestangen, welche den Fahrgastfluss kanalisieren, spricht man von der Zahl der Türspuren. Eine Türspur misst bei einspurigen Türen etwa 700 mm, bei mehrspurigen Türen etwa 600 mm. Bei treppenlosen Fahrzeugen hielt sich diese Bezeichnung, obschon dies vom Ablauf des Fahrgastwechsels her nicht gerechtfertigt ist und oft ein Türmass realisiert wird, welches kein ganzzahliges Vielfaches von 600 mm darstellt, beispielsweise 1000 mm. Um dieses Mass mit der Bezeichnungsweise der Türspuren in Einklang zu bringen, dehnte man den Begriff der einspurigen Türe bis zu einer Breite von rund einem Meter aus oder man spricht von eineinhalbspurigen Türen.

3.32.22 Einstiegstreppen

Weisen Wagenboden und Perron einen Höhenunterschied von mehr als etwa 250 mm auf, so sind Treppen erforderlich. Rampen kommen wegen ihrer Entwicklungslänge nicht in Frage. Die Wagenbodenhöhe unterscheidet sich je nach Fahrzeugtyp sehr stark. Bei Fernverkehrswagen sind etwa 1250 mm üblich, bei Normalspurtriebwagen sogar 1300 mm. Die Wagenboden von S-Bahn- und U-Bahnfahrzeugen befindet sich etwa 1000 mm über der Schienenoberkante. Konventionelle Strassenbahnen und Autobusse zeigen eine Wagenbodenhöhe von etwa 700 bis 900 mm, während diese bei Niederflurfahrzeugen oft bei nur etwa 350 mm liegt [67], [109].

Tab. 3-14: Einstiegshöhen über SOK ausgewählter Fahrzeuge [105], [468].

Fahrzeugtyp	Wagenbodenhöhe	
	Hochflur	Niederflur
Reisezugwagen SBB, Binnenverkehr, schwere Stahlbauart	1285 mm	-
Personentriebwagen RBe 4/4 der SBB	1280 mm	-
Reisezugwagen SBB, Internationaler Verkehr, Typ UIC-Z1	1250 mm	-
Einheitsreisezugwagen DR, Typ Y	1250 mm	-
Reisezugwagen SBB, Binnenverkehr, Einheitswagen IV	1180 mm	-
Personentriebwagen RBDe 4/4 der SBB	1101 mm	-
Reisezugwagen SBB, Binnenverkehr, Einheitswagen III	1065 mm	-
Reisezugwagen SBB, Binnenverkehr, Einheitswagen II	1020 mm	-
Reisezugwagen SBB, Binnenverkehr, Leichtstahlwagen	1000 mm	-
Reisezugwagen SBB, Binnenverkehr, Einheitswagen I	980 mm	-
Gelenktram Be 4/6, Serie 1600, Zürich	910 mm	-
Gelenktram Typ GT8/8, Würzburg	910 mm	310 mm
Reisezugwagen SBB, Brüniglinie, Einheitstyp	875 mm	-
Niederflur-Gelenktram Grenoble	875 mm	345 mm
Reisezugwagen SBB, Brüniglinie, Mitteleinstieg	872 mm	-
Gelenktram Be 4/6, Genf	870 mm	480 mm
Gelenktram Be 4/6, Serie 2000, Zürich	830 mm	-
Standardlinienbus I, BRD	740 mm	-
Gelenktram Typ 6NG, Kassel	720 mm	350 mm
Gelenktram Be 4/8, Bern	710 mm	350 mm
Standardlinienbus II, BRD	710 mm	-
Niederflur-Gelenkbus, MAN-Typ NG 272	590 mm	340 mm
Gelenktram Typ GT6N, Bremen	350 mm	300 mm
Gelenktram Typ GTW-ZR, Bonn	350 mm	290 mm
Autobus Neoplan, Typ Metroliner	320 mm	320 mm
Niederflur-Gelenktrolleybus Neoplan, Basel	320 mm	320 mm

Um die Stehplatzfläche im Fahrzeug und den Raum für die Aggregate unter dem Wagenboden nicht übermässig zu verkleinern sowie um gegebenenfalls Antriebsanlagen oder Fahrwerke unterzubringen, besteht die Tendenz zu steilen Fahrzeugtreppen, welche ergonomisch ungünstiger sind als die optimalen Gebäudetreppen. Dies gilt insbesondere für den Fernverkehr.

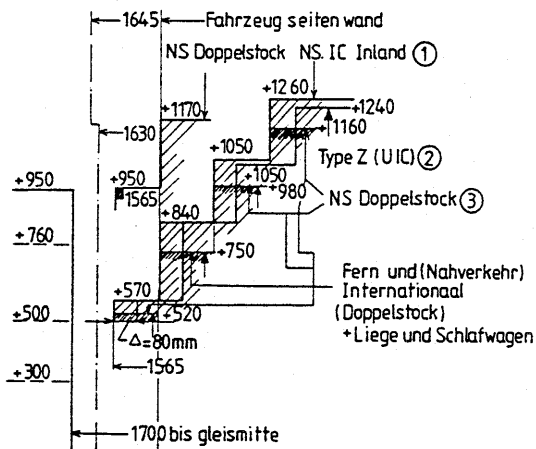


Abb. 3-36: Einige Fernverkehrseinstiege [597].

Für Autobusse wurden in den deutschen Normen folgende Treppenkonfigurationen festgelegt:

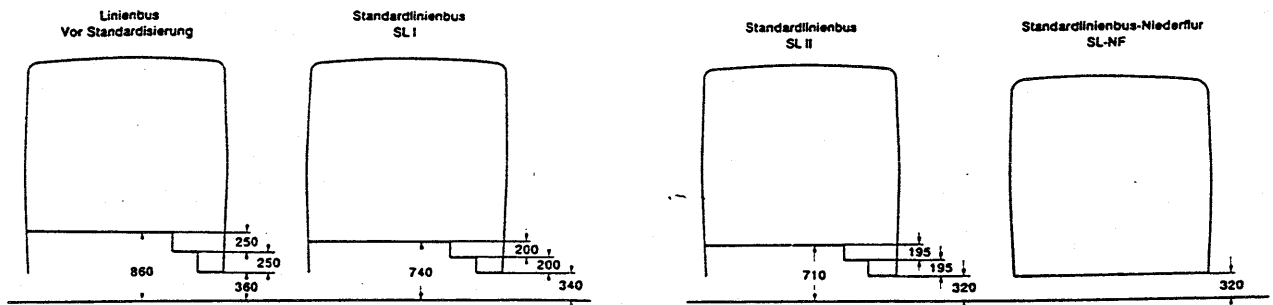


Abb. 3-37: Stufenabmessungen verschiedener Busgenerationen [174].

3.32.23 Stauräume

Die Stauräume eines Fahrzeuges haben die zweifache Funktion eines Puffers und eines Speichers:

- **Pufferfunktion:** Oftmals ist die Kapazität der Fahrzeugtüren grösser als jene der Durchgänge zu den Aufenthaltsbereichen. In diesen Fällen müssen die Stauräume dafür sorgen, dass trotz ungenügender Abflussverhältnisse kein Rückstau bei der Fahrzeugtüre auftritt.
- **Speicherfunktion:** Wird die Sitzplatzkapazität eines Fahrzeuges überschritten, so werden als nächstes die gut zugänglichen Stehplatzflächen belegt, also die Stauräume. Um zu vermeiden, dass der Türquerschnitt verstellt wird, sehen einige Nahverkehrsfahrzeuge sogenannte Drängelräume mit einer Bautiefe von etwa 350 mm vor.

Die Grösse der Stauräume wird bestimmt durch die Fahrzeugbreite, allfällige Sitzplätze gegenüber der Türe sowie dem in Längsrichtung zur Verfügung stehenden Platz, minimal die Türbreite. Bei Nahverkehrsfahrzeugen mit durchgehender Doppelbestuhlung misst die Stauraumfläche oft lediglich etwa 1 m^2 und bietet damit nur drei bis vier Fahrgästen Platz. Doppelstockwagen verfügen dagegen über Stauraumflächen von 5 m^2 und mehr. Vor allem bei Nahverkehrssystemen ist es gebräuchlich, Klappsitze im Stauraum anzuordnen, die naturgemäss gerade dann benützt werden, wenn die Stehplatzfläche am dringendsten benötigt würde.

3.32.24 Treppen im Fahrzeuginnern

Im Fahrzeuginnern wird möglichst auf Treppen verzichtet. Ausschlaggebend dafür sind namentlich Sicherheitsüberlegungen. Unumgänglich sind Treppen bei Doppelstockfahrzeugen. In jüngster Zeit werden Treppen im Fahrzeuginnern bei jenen Niederflurfahrzeugen angewandt, bei welchen der Wagenboden nicht auf der ganzen Fahrzeuglänge tiefergelegt ist. Bezüglich der möglichen Treppenordnung von Doppelstockwagen differenziert [597] sieben verschiedene Typen:

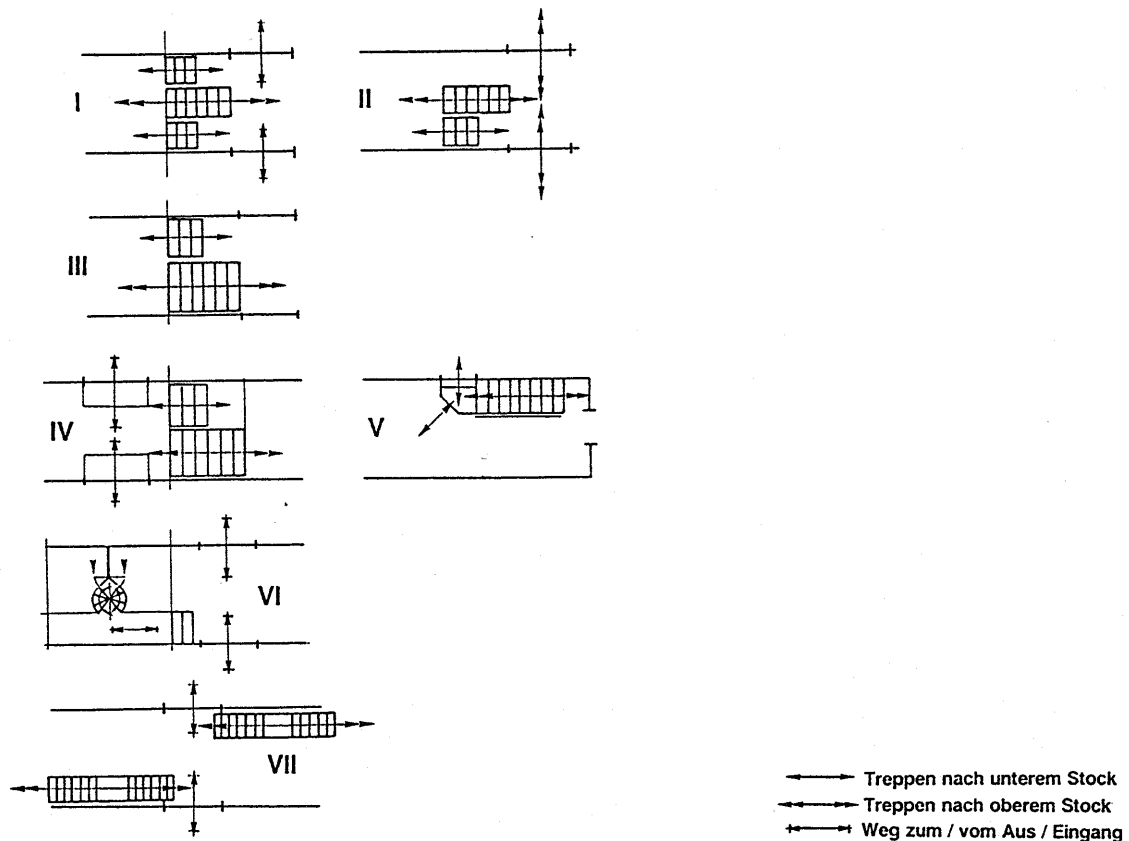


Abb. 3-38: Mögliche Treppenordnungen bei Doppelstockwagen [597].

Gebräuchlich sind vor allem die Treppenordnungen I und III. Bei der Zwei-Treppen-Lösung steht für beide Treppen die halbe innere Fahrzeugbreite von etwa 1300 mm zur Verfügung. Modellversuche haben gezeigt, dass diese asymmetrische Anordnung nicht zu einer behinderten Zirkulation oder zu einer Verzögerung des Fahrgastwechsels führt [595]. Realisiert wurde sie bei-

spielsweise bei den Doppelstockwagen der NS und der SBB. Bei der Drei-Treppen-Lösung, angewandt bei den Doppelstockwagen von SNCF und DR, müssen die beiden schmalen Treppen ein Breitenminimalmass einhalten, welches einen Viertel der Fahrzeugbreite überschreitet (Doppelstockwagen SNCF: rund 800 mm). Damit verbleibt für die Treppe in das andere Stockwerk nur eine reduzierte Breite (Doppelstockwagen SNCF: rund 940 mm). Die Leistungsfähigkeit der beiden Stockwerkzugänge ist damit unausgeglichen [38], [105], [597].

Bei dreiteiligen Gelenkstrassenbahnen mit niederflurigem Mittelteil wurden bisher als seitliche Aufgänge direkt bei der Türe des Mittelteils (Basel BLT, Freiburg, Mannheim) oder als Treppen vis-à-vis der Einstiegstüre zu einem hochgelegenen Seitengang (Würzburg) ausgeführt. Die Treppen zu den Endabteilen von Niederflurstrassenbahnen mit konventionellen Motordrehgestellen werden in der Gangflucht angeordnet.

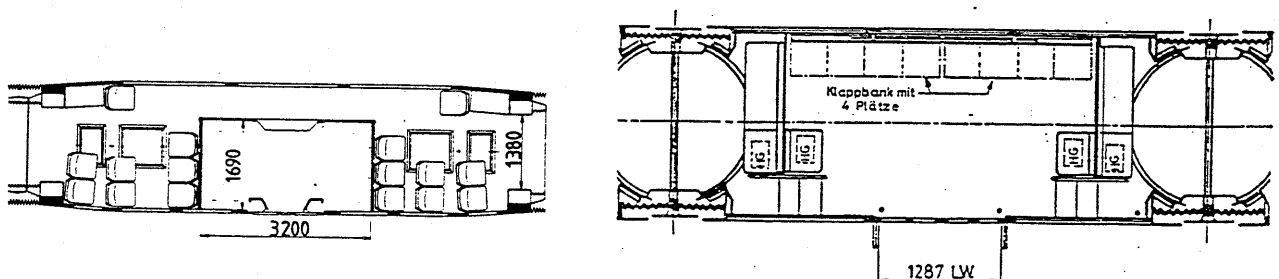


Abb. 3-39: Treppenanordnungen bei Niederflurstrassenbahnen mit niederflurigem Mittelteil. Links: Treppe zu Seitengang, Typ Würzburg [294]; rechts: Seitliche Aufgänge zum Fahrgastraum, Typ Basel BLT (Zeichnung: Schindler).

3.32.25 Verbindungswege im Fahrzeuginnern

Als Verbindungswege im Fahrzeuginnern haben jene Flächen zu gelten, welche nicht wenigstens einseitig von direkt zugänglichen Sitzplätzen gesäumt sind. Sie sind selten, treten aber namentlich bei Fernverkehrswagen in Form von Seitengängen auf, die eine lichte Breite von etwa 710 bis 790 mm aufweisen [105], [424]. Infolge der Begrenzung durch Wände ist dem Fahrgast das Ausweichen nicht möglich. Insbesondere können sich kreuzende Fahrgäste nicht in die Sitzreihen begeben. Zudem schätzt es der Fahrgast nicht, wenn er mit der Begrenzungswand in Berührung kommt, weshalb die Gangbereiche grosszügig dimensioniert werden müssen.

3.32.26 Verbindungswege zwischen verschiedenen Fahrzeugen

Eine Verbindung zwischen zwei Wagen ist zum ersten bei der Eisenbahn üblich sowie zum zweiten zwischen den Wagenteilen von Gelenkfahrzeugen. Sie spielen im vorliegenden Zusammenhang keine Rolle.

3.32.27 Gänge

Die Gänge eines Fahrzeuges dienen dazu, die Fahrgäste von den Einstiegen zu ihren Sitzplätzen zu führen sowie zusätzlich im Nahverkehr als Stehplatzflächen. Diese Funktionsmischung verbietet es, den vollen Betrag der Gangfläche als Stehplatzraum in Rechnung zu stellen und erfordert eine lichte Breite, welche das Passieren zweier Fahrgäste ermöglicht. Die konstruktive Breite der

Gänge ist allerdings nur beschränkt aussagekräftig für die nutzbare Breite des Gangbereiches. Genügt nämlich die bauliche Sitzbreite nicht, so reichen sitzende Fahrgäste in den Gang und verstellen einen Teil des Querschnittes. Bei Niederflurfahrzeugen können zudem Podeste den Gangraum mitbeanspruchen, weshalb nicht der gesamte lichte Raum zwischen zwei Sitzreihen vollwertig nutzbar ist.

Für Nahverkehrsfahrzeuge wurden anlässlich von Versuchen 690 mm für Gänge als optimal erkannt und in vom VÖV Deutschland in die Empfehlung 6.030.2 aufgenommen [523]. Bei U-Bahnen von 3100 mm Breite wurden die Masse der Gänge auf 790 mm angehoben [311]. Bei der deutschen Empfehlung für Stadtbahnwagen (VÖV 6.030.1) wurde dieser Wert nur beim Typ 240 eingehalten, während für den Typ 265 lediglich noch 630 mm vorgesehen sind [530].

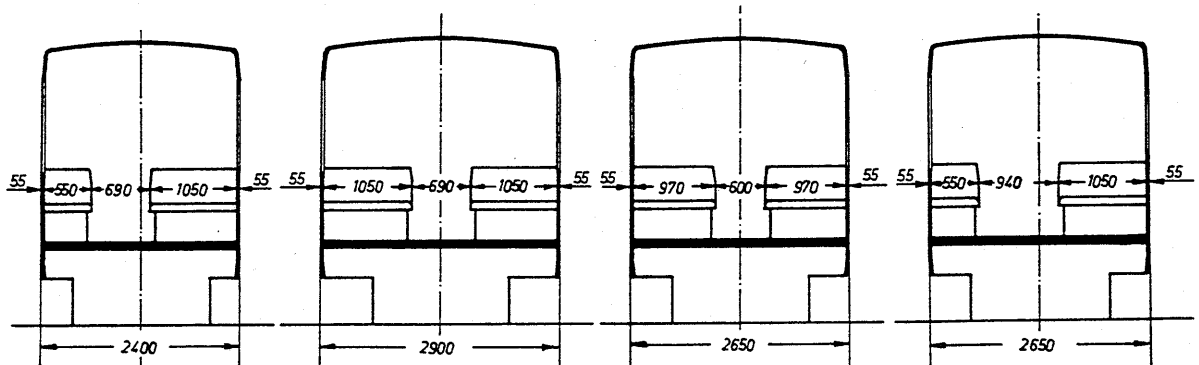


Abb. 3-40: Fahrzeugquerschnitte gemäss VÖV-Typenempfehlung 6.030.1 [384].

Tab. 3-15: Gangbreiten bei ausgewählten Fahrzeugen [10], [67], [294], [468], [496], [530], [554].

Wagentyp	1. Klasse	2. Klasse
Niederflur-Gelenktram Würzburg	-	875 mm
Niederflur-Gelenktram Kassel	-	774 mm
U-Bahn München und Nürnberg	-	730 mm
Tram Be 4/6, TPG Genf	-	722 mm
VÖV-Stadtbahnwagen Typ 240	-	690 mm
Tram Be 4/6, Serie 2000, Zürich	-	670 mm
VÖV-Stadtbahnwagen Typ 265	-	630 mm
Autobus GMC Transbus (USA)	-	560 mm
Autobus Van Hool A-120	-	560 mm
Standardlinienbus I	-	530 mm
Einheitswagen I SBB	685 mm	530 mm
Leichtstahlwagen SBB 1937	690 mm	520 mm
Einheitswagen IV SBB	635 mm	520 mm
Autobus GMC RTS 2 (USA)	-	510 mm
Zwischenwagen ICE DB	636 mm	506 mm
Einheitswagen III SBB	636 mm	500 mm
Einheitswagen II SBB	635 mm	480 mm
Standard-Überlandlinienbus	-	480 mm
Einheitswagen SBB Brünig	562 mm	466 mm
Leichtstahlwagen SBB Brünig	550 mm	427 mm

3.32.28 Sitzplatzbereiche

Ein Sitz soll bei Fernverkehrsfahrzeugen in der 1. Klasse rund 650 mm breit sein, in der 2. Klasse mindestens 500 mm [105]. Werte von 580 mm für Einzelsitze und von 1050 bis 1080 mm für Doppelsitze werden im Nahverkehr postuliert [311], [523]. Für Autobus-Doppelsitze wurden allerdings auch schon lediglich 925 mm oder 463 mm pro Person empfohlen [496].

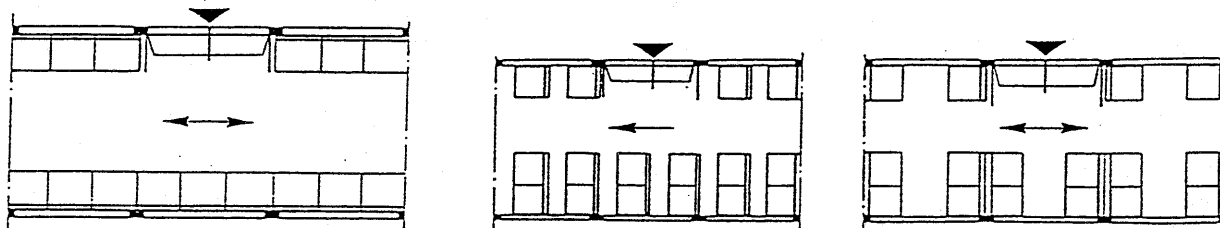


Abb. 3-41: Längs-, Parallel- und Vis-à-vis-Bestuhlung [67].

Bei Vollbahnwagen sind Abteil-Sitzteiler von 2000 bis 2300 mm in der 1. sowie von etwa 1700 bis 2000 mm in der 2. Klasse üblich, wobei nationale Unterschiede auftreten können [105]. Das Normalmass bei Vorortfahrzeugen beträgt beispielsweise bei einigen ausgewählten europäischen Staatsbahnen [595]:

- SNCF, FS 1540 mm
- NS 1650 mm
- DB, SBB 1750 mm
- DSB 1850 mm

Der Doppelstockwagen der SNCF weist bei einem Sitzteiler von 1540 mm eine Fläche von 0.36 m²/P (2.8 P/m²) in der 2. Klasse und von 0.41 m²/P (2.4 P/m²) in der 1. Klasse auf [38]. Für den Nahverkehr (Stadtbahnwagen) nennt die Typenempfehlung 6.030.1 des VÖV einen Sitzteiler von 1650 mm. Bei U-Bahnen empfiehlt [306] mindestens eine Sitzplatzfläche von 0.4 m²/P.

Bei Autobussen werden in Frankreich seit den Achzigerjahren Parallelbestuhlungen mit Sitzabständen von 750 bis 800 mm angewandt (Sitzteiler 1500 bis 1600 mm) [85]. Der Sitzteiler von Bussen mit Parallelbestuhlung liegt in der BRD seit den Siebzigerjahren minimal bei etwa 720 mm, so dass die Fläche pro Sitz etwa 0.33 m² und die Fahrgastdichte rund 3.0 P/m² beträgt [67], [496]. In den Sechzigerjahren wurden bei Sitzbreiten von 450 mm und Sitzabständen von 700 mm sogar Flächen von nur 0.315 m²/P beziehungsweise Dichten von 3.2 P/m² realisiert [502].

Tab. 3-16: Platzverhältnisse der Sitzplätze ausgewählter Fahrzeuge [38], [67], [105], [384], [496].

Fahrzeug	Bestuhlung	Breite [mm]	Teiler **) [mm]	Fläche [m ² /P]	Dichte [P/m ²]
ICE-Zwischenwagen DB, 1. Kl.	Vis-à-vis	710	2288	0.81	1.2
Fernverkehrswagen DR, 1. Kl.	Vis-à-vis	650	2200	0.72	1.4
Einheitswagen IV SBB, 1. Kl.	Vis-à-vis	660	2055	0.68	1.5
ICE-Zwischenwagen DB, 2. Kl.	Vis-à-vis	580	1960	0.57	1.8
Einheitswagen IV SBB, 2. Kl.	Vis-à-vis	520	1869	0.49	2.1
Stadtbahnwagen VÖV 240	Vis-à-vis, Einzel	570	1650	0.47	2.1
Fernverkehrswagen DR, 2. Kl.	Vis-à-vis	500	1800	0.45	2.2
U-Bahn München/Nürnberg	Vis-à-vis	515	1700	0.44	2.3
Stadtbahnwagen VÖV 240	Vis-à-vis, Doppel	535	1650	0.44	2.3
Doppelstockwagen SNCF, 1. Kl	Vis-à-vis	532 *)	1540	0.41	2.4
S-Bahn Berlin, BR 480	Vis-à-vis	485 *)	1700	0.41	2.4
S-Bahn Berlin, BR 485	Vis-à-vis	480 *)	1630	0.39	2.6
Autobus Van Hool A-120	Parallelbestuhlung	500	1500	0.38	2.6
Stadtbahnwagen VÖV 265	Vis-à-vis, Einzel	460	1650	0.38	2.6
Stadtbahnwagen VÖV 265	Vis-à-vis, Doppel	463	1650	0.38	2.6
Doppelstockwagen SNCF, 2. Kl	Vis-à-vis	468 *)	1540	0.36	2.8
Gelenktram Typ 2000 VBZ	Parallel, Doppel	475	1500	0.36	2.8
Gelenktram Typ 2000 VBZ	Parallel, Einzel	465	1500	0.35	2.9
Gelenktram Be 4/6 TPG	Parallelbestuhlung	461	1500	0.35	2.9
Standard-Überlandlinienbus	Parallelbestuhlung	473	1440	0.34	2.9
Stadtlinienbus VÖV-SL I	Parallelbestuhlung	460	1400	0.32	3.1
Autobus GMC RTS-2 (USA)	Parallelbestuhlung	430	1440	0.30	3.3

*) Schätzung

**) Bei Parallelbestuhlung doppelter Sitzabstand

3.32.3 Konflikte zwischen den Fahrzeuggrundkomponenten und den Einzel-elementen der fahrgastbezogenen Grundkomponente

Die optimale Gestaltung der Einzelemente der fahrgastbezogenen Grundkomponente wird durch die übrigen Grundkomponenten konkurrenziert. Eine reine Volumenkonkurrenz liegt vor, wenn die Lage des Einzelementes frei wählbar, das Volumen aber gegeben ist. Bei einer Ortskonkurrenz ist auch die Anordnung nicht beliebig möglich. Die fahrgastbezogene Grundkomponente wird von den übrigen drei Grundkomponenten folgendermassen konkurrenziert:

- durch das Fahrwerk mit Radaufhängung und Federung: Bauhöhe, Bautiefe, Baulänge, Lage, Wagenbodenhöhe bei konventionellen Drehgestellen
-> Orts- und Volumenkonkurrenz, Konkurrenz gross
- durch die Antriebseinrichtungen mit Motor und Kraftübertragung: Bauhöhe, Bautiefe, Baulänge, teilweise Lage
-> Vorwiegend Volumenkonkurrenz, Konkurrenz mässig
- durch die Führungs-, Steuerungs- und Kontrolleinrichtungen, Lage des Führerstandes, Zugänglichkeit der Apparaturen
-> Volumenkonkurrenz, Konkurrenz klein

In grösster Konkurrenz zu einer optimalen Raum- und Einstiegsgestaltung steht demnach das Fahrwerk. Seine Anforderungen diktiert weitgehend die Türanordnung, sofern nicht der Fahrzeugboden auf der ganzen Länge höher als das Fahrwerk liegt [154].

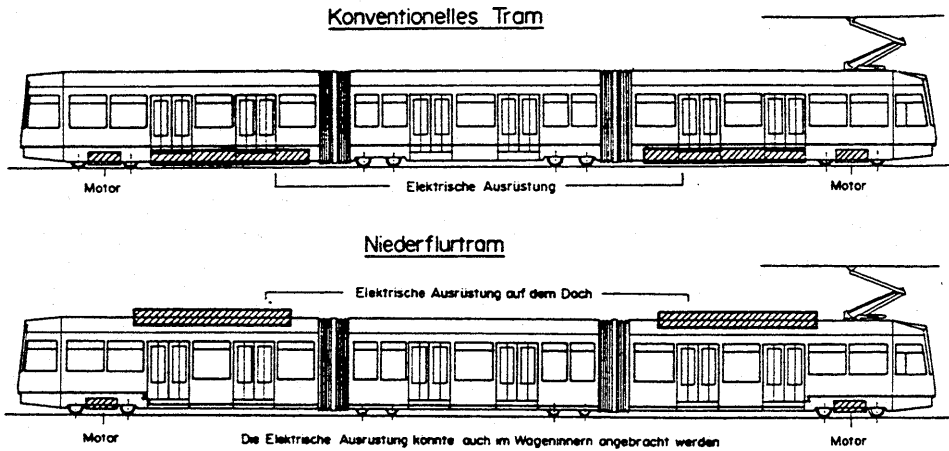


Abb. 3-42: Anordnung der elektrischen Ausrüstung bei einem konventionellen Tram und bei einem ähnlichen Niederflurtram [36].

3.33 Fahrzeugkonzepte

3.33.1 Systematik der Typisierung

Die Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs zeichnen sich durch eine grosse äusserliche Vielfalt aus. In Bezug auf ihre Fahrgastflusseigenschaften lassen sie sich dagegen auf Grundtypen zurückführen, wobei folgende Kriterien angewandt werden können:

- *Zahl der Stockwerke:* Das Lichtraumprofil lässt häufig zwei Stockwerke zu.
- *Anordnung der Einstiege im Fahrzeug:* Aus Sicht des Fahrgastwechsels lassen sich die Einstiege unterteilen in solche, welche direkt in ein Abteil führen, in solche mit einseitigem Abfluss und solche mit beidseitigem Abfluss.

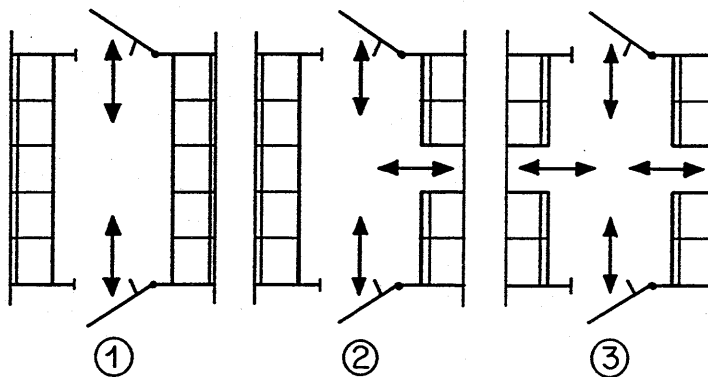


Abb. 3-43: Grundsätzliche Einstiegstypen: 1. Abteileinstieg; 2. Einstieg mit einseitigem Abfluss; 3. Einstieg mit zweiseitigem Abfluss.

- *Ausführung der Einstiege:* Konstruktiv wie auch bezüglich des Fahrgastwechsels spielt es vor allem eine Rolle, ob der Einstieg eben ist oder Treppenstufen aufweist.

Diese drei Kriterien stehen für den Benützungskomfort im Fahrzeug (Länge der Wege, Anordnung der Plätze, Höhendifferenzen), die Rückstauempfindlichkeit (Abflussmöglichkeiten) und die Fahrgastwechselzeit (ebener Einstieg oder Treppe).

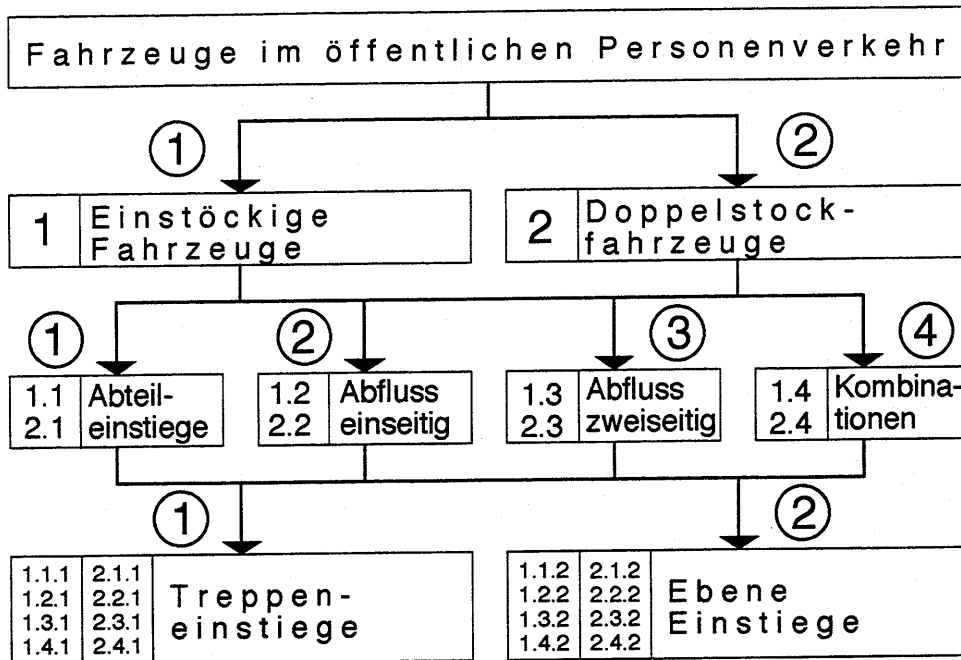


Abb. 3-44: Typisierung der Personenfahrzeuge nach fahrgastwechselrelevanten Kriterien.

3.33.2 Fahrzeugtypisierung

3.33.21 Vollbahnfahrzeuge, Fernverkehr

Die Personenwagen der Eisenbahn entwickelten sich in Kontinentaleuropa von Grossbritannien beeinflusst nach dem Vorbild der Postkutsche. Diese zeichneten sich durch Abteileinstiege aus, was bei den Eisenbahnwagen übernommen wurde. Anstelle einer einzigen Fahrgastzelle wurden deren mehrere auf einem Fahrgestell vereinigt, untereinander aber zunächst nicht durch einen Gang verbunden. Der in den USA gebräuchliche Durchgangswagen mit Mittelgang war mit seiner Grossraumbauweise eine eigenständige Schöpfung und besass nur zwei Endeingänge. Die Abteilwagen (Typ 1.1.1) waren in Europa bei einigen Bahngesellschaften, insbesondere in Grossbritannien und Frankreich, während des ganzen 19. Jahrhunderts gebräuchlich und wurden erst gegen dessen Ende zunächst in den D-Zügen abgelöst. Nachteilig hatte sich bei ihnen nicht zuletzt die infolge ihrer Längstrittbretter auf 2650 mm begrenzte Wagenbreite erwiesen. Lange vermochten sie sich aber Dank ihrer hervorragenden Fahrgastwechseleigenschaften auf den Vorortsbahnen zu halten. Beibehalten blieb die Idee der Einzelabteile bei den ab 1870 geschaffenen Seitengangwagen (Typ 1.2.1). Der Seitengangwagen wurde in den Fünfzigerjahren von der UIC zum Normwagen für den internationalen Verkehr erklärt, bei den meisten europäischen Bahnen wird dieser Typ indessen auch im Langstreckeninlandverkehr eingesetzt. Erst in den Siebzigerjahren wurde der Mittelgangwagen von der UIC für internationale Züge normiert [424], [576].

In der Schweiz wurden Abteilwagen nur von den Westschweizer Bahnen eingesetzt, welche sich an französischen Vorbildern orientierten. Die bis etwa 1870 gebauten Fahrzeuge waren um die Jahrhundertwende indessen verschwunden. Bereits 1872 hatte eine entsprechende Bestimmung Aufnahme im Eisenbahngesetz gefunden [128]. Wenig gebräuchlich waren auch Seiten-

gangwagen für den schweizerischen Inlandverkehr. Dafür ging man in den Dreissigerjahren vom Endeinstieg ab, indem man sogenannte Leichtstahlwagen mit Einstiegen in den Viertelpunkten schuf [516]. Diese haben sich auf die Dauer im Fernverkehr nicht durchgesetzt, ebensowenig die Fahrzeuge mit Mitteleinstieg. Heute sind Fahrzeuge mit Endeinstiegen üblich. Man erreicht damit eine grosse, freizügig gestaltbare Fahrgastzelle mit zwei klar definierten Einstiegsbereichen. Die Zahl der Zwischentüren im Fahrzeug lässt sich gering halten. Doppelstockwagen haben im europäischen Fernverkehr bisher im Gegensatz den den USA und Kanada keine Verbreitung gefunden, da das Lichtraumprofil auf klassischen Strecken keine komfortablen Platzverhältnisse gestattet. In jüngster Zeit haben starke Streckenbelastungen diesbezüglich zu neuen Entwicklungen geführt, namentlich zu den in Entwicklung befindlichen "Super-TGV" sowie dem Rollmaterial von Bahn 2000 der SBB [282].

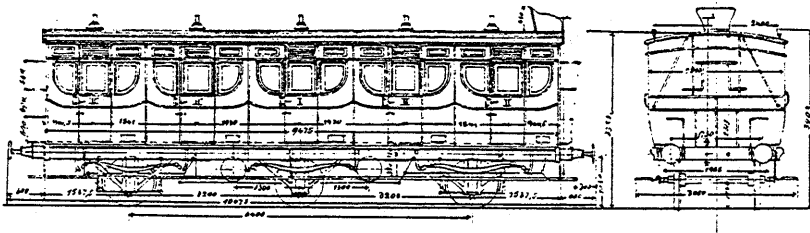


Abb. 3-45: Reisezugwagen Typ 1.1.1, dreiachsiger Abteilwagen, 1. und 2. Klasse, der Berlin-Podsdam-Magdeburger-Eisenbahn, gebaut ab 1854 [576].

Wagenende 2

Wagenende 1

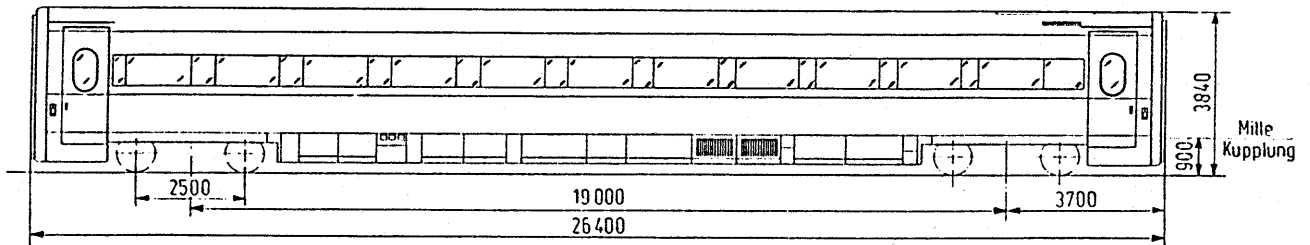


Abb. 3-46: Reisezugwagen Typ 1.2.1, vierachsiger Mittel- und Seitengangwagen, Zwischenwagen des ICE der DB, 2. Klasse, gebaut ab 1986 (Abbildung: DB).

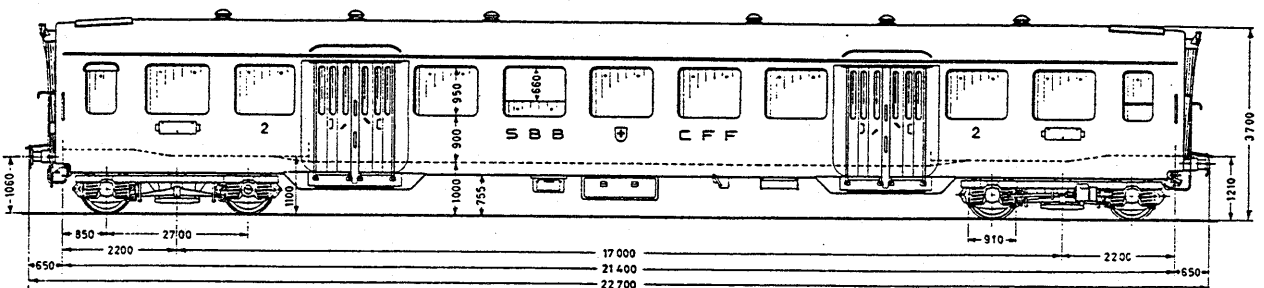


Abb. 3-47: Reisezugwagen Typ 1.3.1, vierachsiger Mittelgangwagen mit Einstiegen in den Viertelpunkten der SBB, 2. Klasse, gebaut 1937 bis 1954 [516].

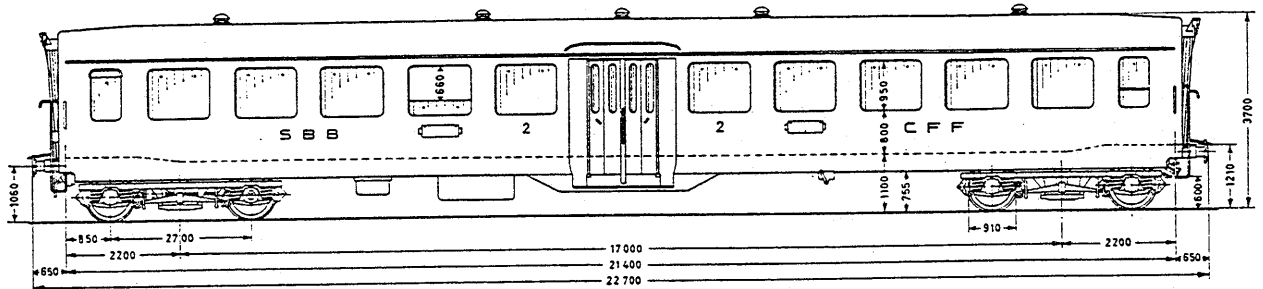


Abb. 3-48: Reisezugwagen Typ 1.3.1, vierachsiger Mittelgangwagen mit Mitteleinstieg der SBB, 2. Klasse, gebaut 1953 bis 1957 [516].

3.33.22 Vollbahnfahrzeuge, Nahverkehr

Bis gegen 1925 waren im Nahverkehr vorzugsweise die Abteilwagen im Gebrauch (Typ 1.1.1). Eine Kombination von Abteil- und Durchgangswagen war in Italien unter dem Namen "Centoparti" bekannt, fand aber auch bei den britischen Bahnen, den deutschen Länderbahnen und später im Ruhrschnellverkehr einige Verbreitung. Zu jedem der Abteile gehörte zwar eine Aussentüre, doch waren die Abteile zusätzlich mit einem Mittel- oder Seitengang untereinander verbunden (Typ 1.1.1). Zweck dieser Konstruktion war eine gleichmässige Ausnützung des Wagens sowie ein rascher Fahrgastwechsel [105], [424]. Man hatte vor allem bei grosser Dichte wartender Fahrgäste auf dem Bahnsteig beobachtet, dass ohne Rücksicht auf die Auslastung des Zuges die nächstliegende Türe gewählt wurde. Es musste daher ein Ausgleich im Innern des Fahrzeuges ermöglicht werden [204]. In Kauf genommen wurde bei den Abteilwagen eine schlechte Tragwirkung des Wagenkastens, was eine hohe Stabilität des Rahmens voraussetzte [576]. In Grossbritannien werden sie noch heute im Vorortverkehr eingesetzt. Während einiger Zeit entstanden Fahrzeuge, welche zwei Endeingänge sowie einen Mitteleinstieg aufwiesen, so in Deutschland (Typ 1.4.1). Den wohl letzten Vertreter dieser Gattung bildet der Vorortstriebwagen RABDe 12/12 der SBB.

Im Nahverkehr schwankt heute die Zahl der Eingänge pro Fahrzeug zwischen zwei und vier, wobei kaum Fahrzeuge mit ausschliesslich Endeingängen eingesetzt werden, da im Nahverkehr eine Minimierung der Weglängen angestrebt wird und ein abgeschlossener Grossraum kaum Vorteile verspricht. Typische Türverteilungen sind zwei Türen in den Viertelpunkten, drei Türen ungefähr in den Drittelpunkten oder vier Türen mit beidseits je einem Abteil (Typ 1.3.1). Ausgeprägte S-Bahn-Fahrzeuge stellen die Züge der Berliner und Hamburger S-Bahn sowie der Triebwagen BR 420 der DB dar. Eine interessante Bauart des zweitürigen Vorortswagens bildet der FS-Wagen mit abgesenktem Mittelteil und Einstieg (Typ 1.3.2).

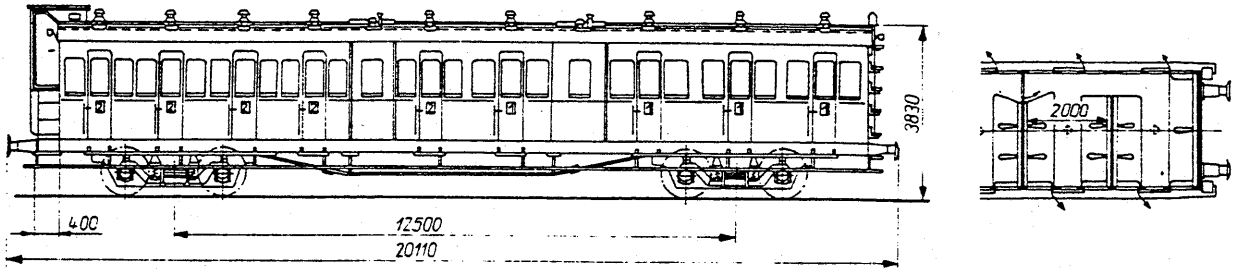


Abb. 3-49: Reisezugwagen Typ 1.1.1, vierachsiger deutscher Abteilwagen mit Seitengang der Länderbauart [105].

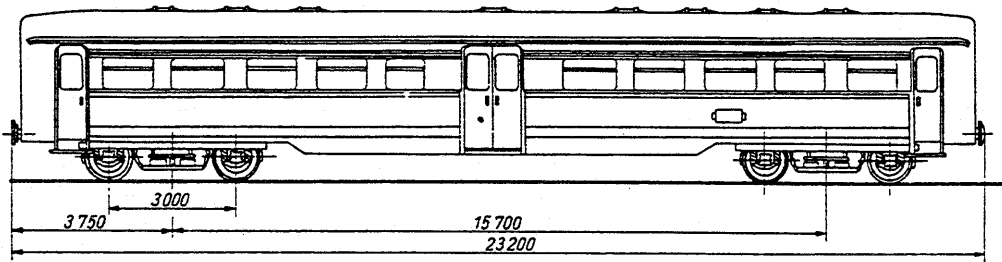


Abb. 3-50: Reisezugwagen Typ 1.4.1, vierachsiger Durchgangswagen der DR mit Mittel- und End-einstieg, gebaut ab 1936 [105].

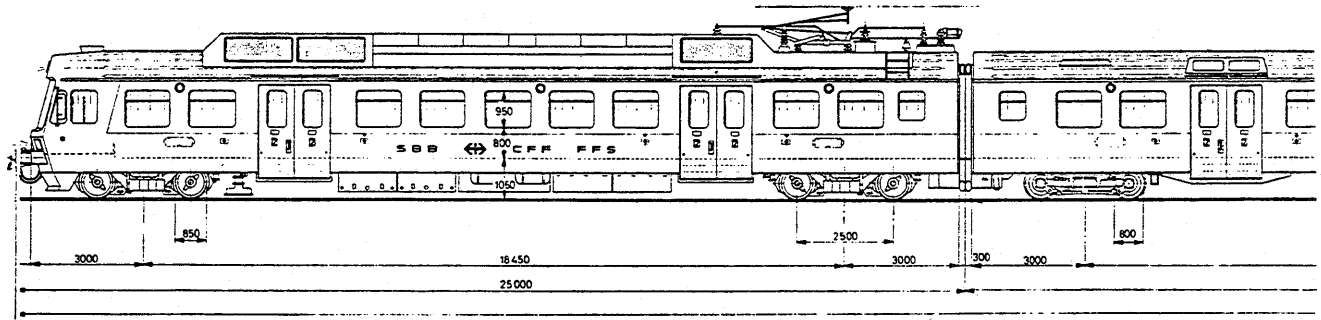


Abb. 3-51: Triebwagenzug Typ 1.3.1 mit zwei Einstiegen in den Viertelpunkten, RABDe 8/16 der SBB, gebaut 1974 bis 1975 [467].

16 2/3 Hz ~ 15 kV

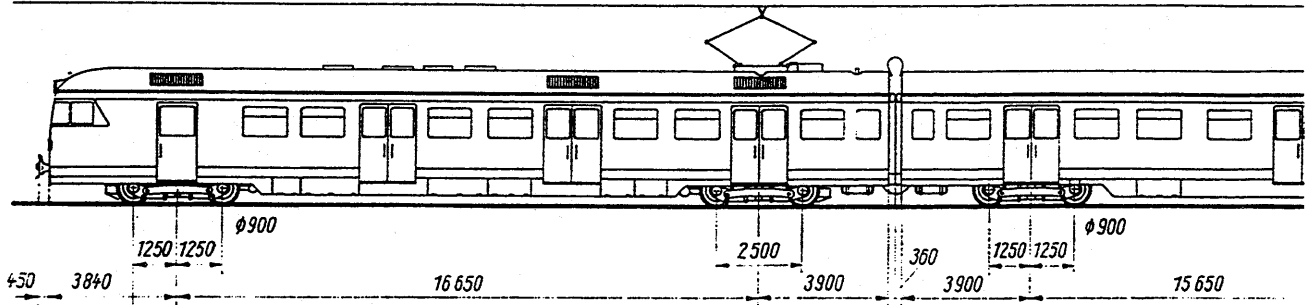


Abb. 3-52: Triebwagenzug Typ 1.3.1 mit drei Einstiegen, BR 427 der DB, gebaut 1964 [587].

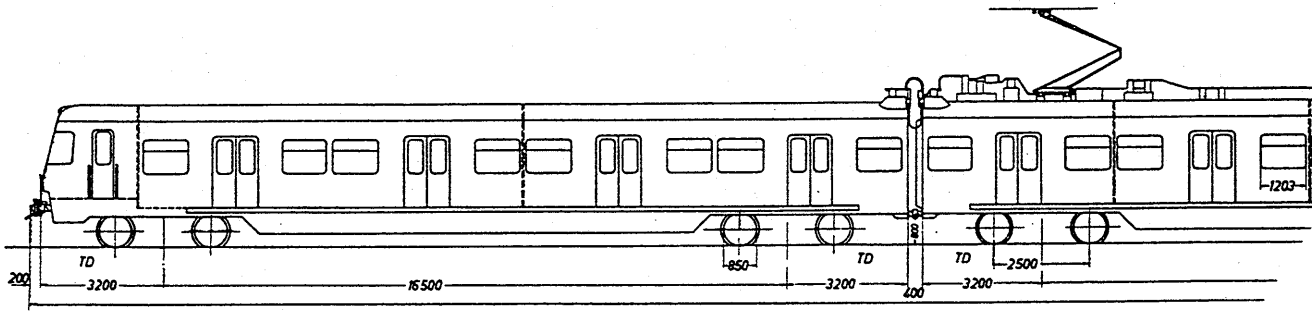


Abb. 3-53: Triebwagenzug Typ 1.3.1 mit vier Einstiegen, BR 420 der DB, gebaut ab 1970 [405].

Doppelstockfahrzeuge entstanden ab 1857 in Frankreich, Indien, Deutschland und Österreich, haben sich aber erst nach dem Ersten Weltkrieg in grösserem Ausmass verbreitet. Damals wie heute wurden sie für den Agglomerations- und S-Bahn-Verkehr gebaut, obschon sie mit ihrer hohen Sitzplatzzahl pro Laufmeter Zug und ihrer geringen Stehplatzfläche eher für den Mittelstreckenverkehr geeignet sind [393], [595]. Bemerkenswerterweise verliess die Preussische Eisenbahnverwaltung den Doppelstockwagen beim Berliner Vorortsverkehr bereits um 1880 wieder zugunsten des Abteilwagens, da er zu lange Fahrgastwechselzeiten aufwies [314], [393]. Drei typische neuere Entwicklungslinien sind Doppelstockwagen mit Endeinstieg (Typ 2.2.1, NS, SNCF, SBB), mit Einstieg in das untere Geschoss (Typ 2.3.2, DR) sowie mit Mitteleinstieg (Typ 2.3.2, USA). Eine Sonderbauart stellen die Doppelstockgliederzüge der DR dar (Typ 2.3.1) [105], [577]. Bisher erst als Prototyp existiert bei der SNCF ein Doppelstockfahrzeug mit drei Türen. Es zeigen sich dabei beträchtliche Schwierigkeiten in der Raumaufteilung sowie Verluste an Sitzplatzkapazität. Erschwerend fällt bei der Konzeption von Doppelstockwagen generell ins Gewicht, dass infolge der eingeschossigen Perrons eine Verbindung der beiden Stockwerke im Fahrzeug selbst vorgesehen werden muss. Doppelgeschossige Perrons haben das Stadium von Ideenskizzen bisher nicht verlassen, wurden aber bereits 1909 für die Berliner Stadtbahn in Betracht gezogen [101]. Doppelstockwagen werden derzeit im Nah- und Kurzstreckenverkehr in mehreren Ländern Europas, in den USA, in Kanada und in Australien eingesetzt [282].

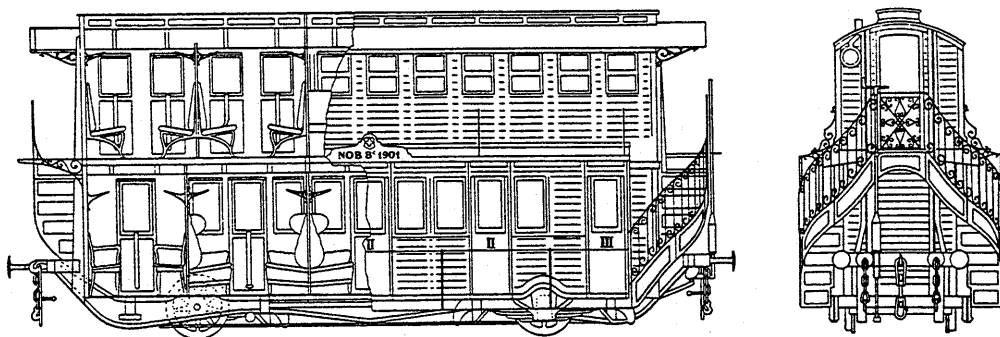


Abb. 3-54: Reisezugwagen Typ 2.2.1, Doppelstockwagen der Schweizerischen Nordostbahn, gebaut 1875 (Abbildung: SIG).

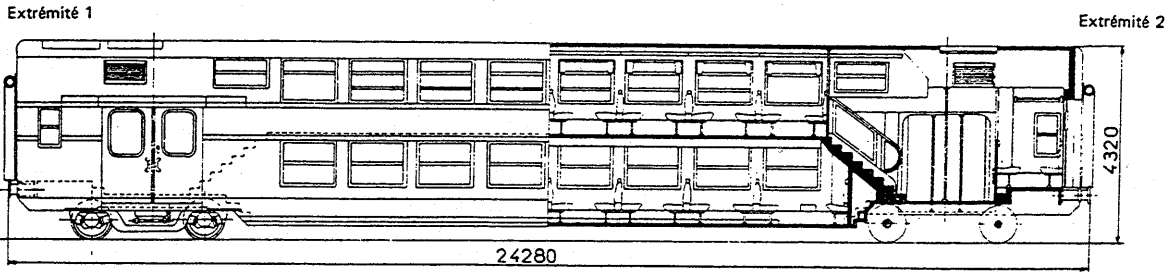


Abb. 3-55: Reisezugwagen Typ 2.2.1, Doppelstockwagen der SNCF mit Eindeinstieg, gebaut ab 1975 [345].

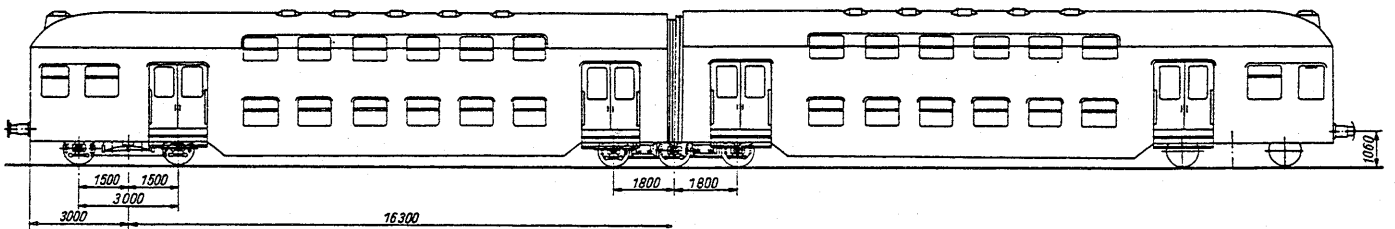


Abb. 3-56: Reisezugwagen Typ 2.3.1, Gliederzug DR, gebaut ab 1954 [105].

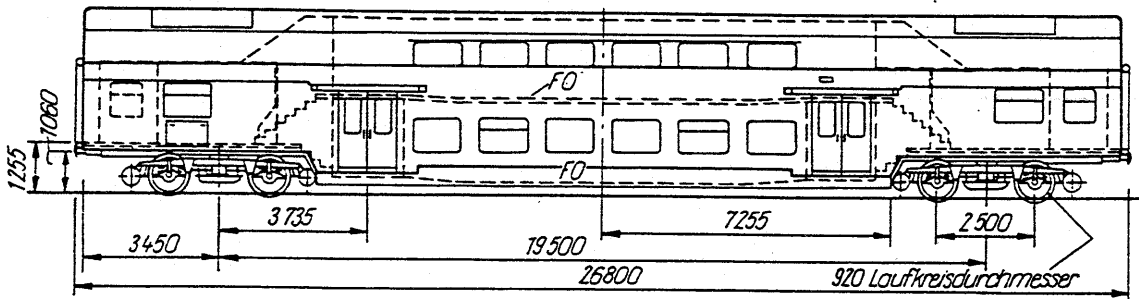


Abb. 3-57: Reisezugwagen Typ 2.3.2, Doppelstockwagen der DR mit Einstieg in das Untergeschoss, gebaut ab 1972 [105].

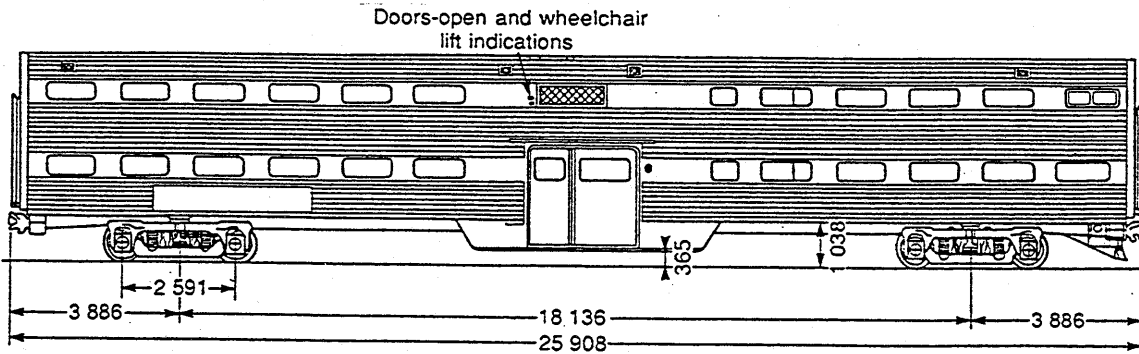


Abb. 3-58: Reisezugwagen Typ 2.3.2, Doppelstockwagen für den Vorortverkehr der Metra Chicago [577].

3.33.23 Schmalspurbahnen

Die Fahrzeuge von Schmalspurbahnen wurden in ihrer Grundrissgestaltung von den Vollbahnfahrzeugen abgeleitet. Die Typenvielfalt ist geringer und beschränkte sich während Jahrzehnten auf zwei- und vierachsige Fahrzeuge mit Endestiegen (Typ 1.2.1). Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden die meisten Schmalspurbahnen in Europa stillgelegt. Auf den verbliebenen Netzen wurden für Bahnen mit Überlandcharakter weiterhin Fahrzeuge mit End- oder teilweise Mitteleinstiegen gebaut, während Bahnen mit Vorortcharakter allmählich auf Einstiege in den Viertelpunkten übergingen. In jüngster Zeit wurden auch für schmalspurige Überlandbahnen Fahrzeuge mit abgesenkten Mittelteilen entwickelt.

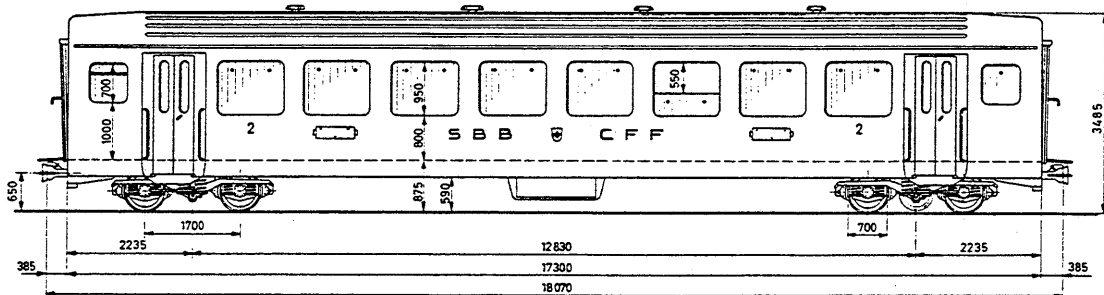


Abb. 3-59: Schmalspurreisezugwagen Typ 1.2.1, Reisezugwagen für längere Distanzen mit Endestiegen der SBB, 2. Klasse, gebaut 1966 bis 1969 [468].

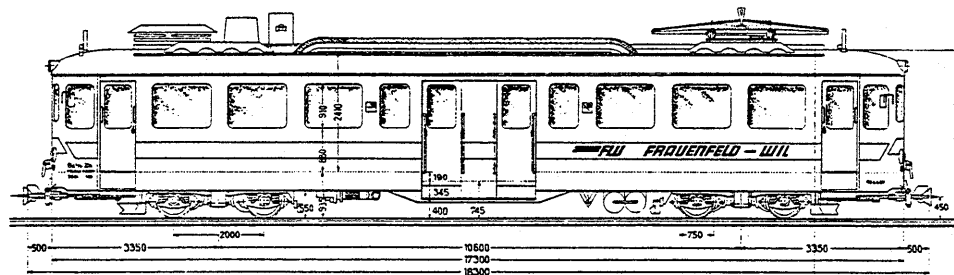


Abb. 3-60: Schmalspurtriebwagen Typ 1.3.1, Triebwagen für kurze Distanzen mit Mitteleinstieg der Frauenfeld-Wil-Bahn, gebaut 1947 (Abbildung: FW).

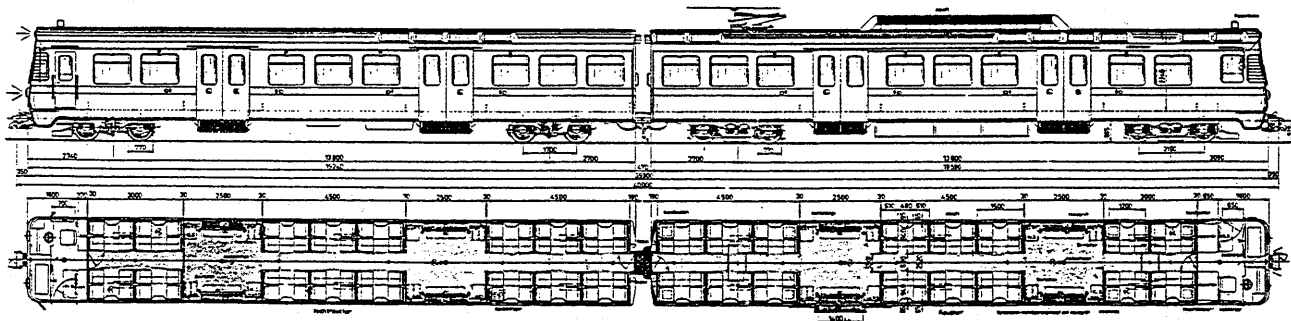


Abb. 3-61: Schmalspuriger Vororttriebzug Typ 1.3.1, Doppeltriebwagen des Regionalverkehrs Bern-Solothurn, gebaut 1974 bis 1978 (Abbildung: SIG).

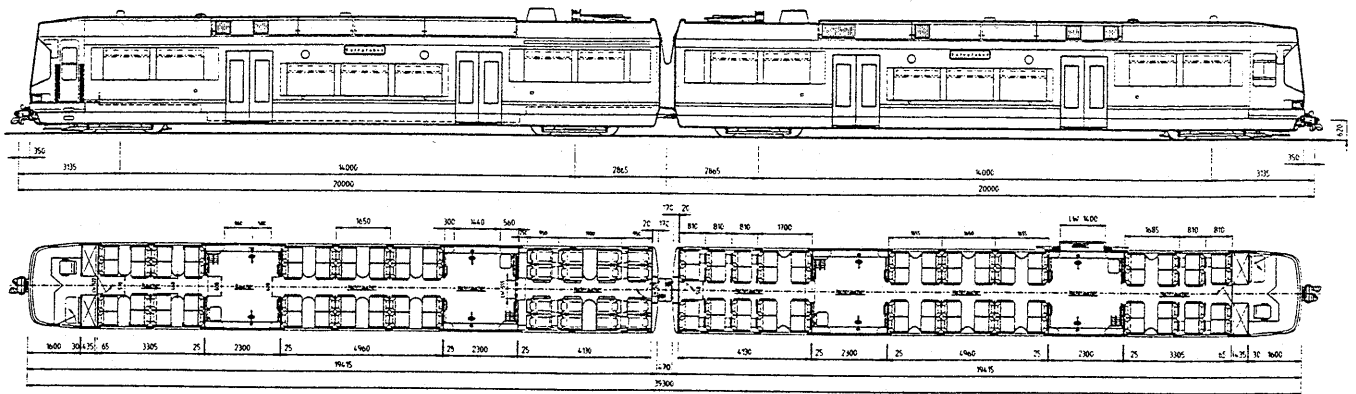


Abb. 3-62: Schmalspuriger Vororttriebzug Typ 1.3.2, Doppeltriebwagen des Regionalverkehrs Bern-Solothurn mit Tiefeinstieg, gebaut ab 1992 (Abbildung: SWP).

3.33.24 U-Bahn- und Stadtbahnfahrzeuge

Die Grundrissgestaltung der Fahrzeuge von U-Bahnen wird kaum durch Randbedingungen eingeschränkt. Verläuft die Strecke mehrheitlich unterirdisch, so verlieren einige Nachteile einer hohen Türanzahl an Gewicht (Wärmeverlust, Störungen durch Klimaeinwirkungen). Hingegen hat eine kurze Haltezeit oberste Priorität. Dies führt zu Fahrzeugen mit einem sehr hohen Türanteil. Wird eine Vis-à-vis-Bestuhlung gewählt, so werden in der Regel zwei Abteile zwischen zwei Türen angeordnet, in selteneren Fällen drei bis vier. Bei Längsbestuhlung liegt zwischen den beiden Türen eine Distanz von etwa 5 Metern. Meist bestehen U-Bahn-Fahrzeuge aus Einzelwagen (allenfalls betrieblich untrennbar miteinander verbunden), deren Länge einem Vielfachen der Fenster- und Türteilung entspricht. Gelenkfahrzeuge mit Jacobs-Drehgestellen, welche eine Reduktion der Zahl aufwendiger Bauteile versprechen, sind seltener und als Optimierung zwischen dem Fahrzeug und den vorhandenen festen Anlagen zu betrachten.

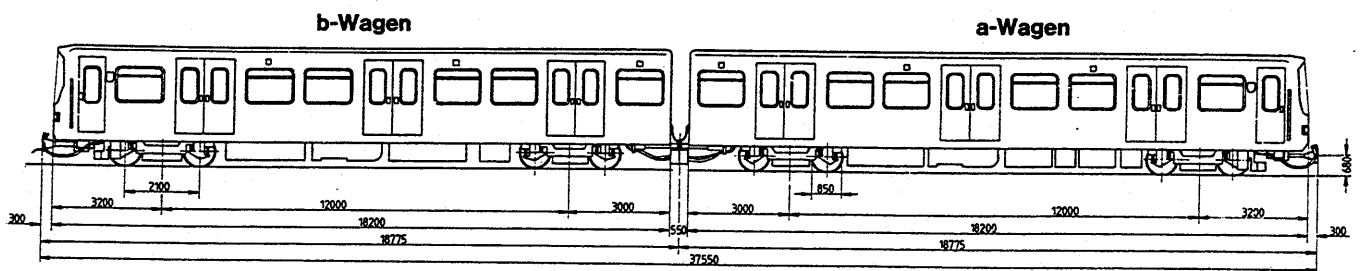


Abb. 3-63: U-Bahnwagen Typ 1.3.2, Doppeltriebwagen der U-Bahn München mit Quersitzen (Abbildung: BBC).

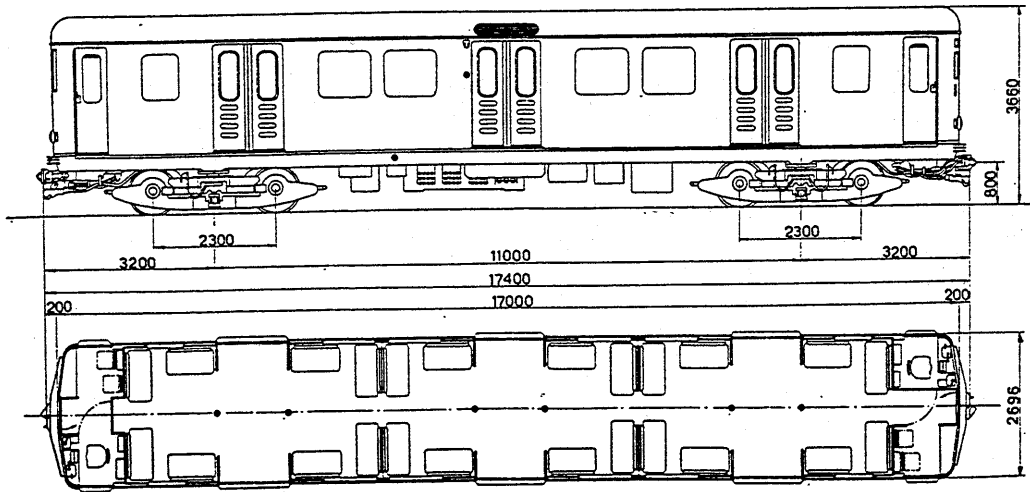


Abb. 3-64: U-Bahnwagen Typ 1.3.2, Triebwagen C1 der U-Bahn Stockholm mit Längssitzen (Abbildung: SL).

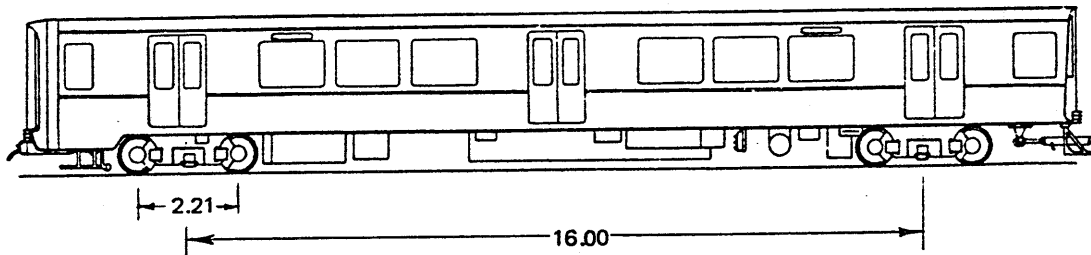


Abb. 3-65: U-Bahnwagen Typ 1.3.2, Triebwagen der U-Bahn Washington [554].

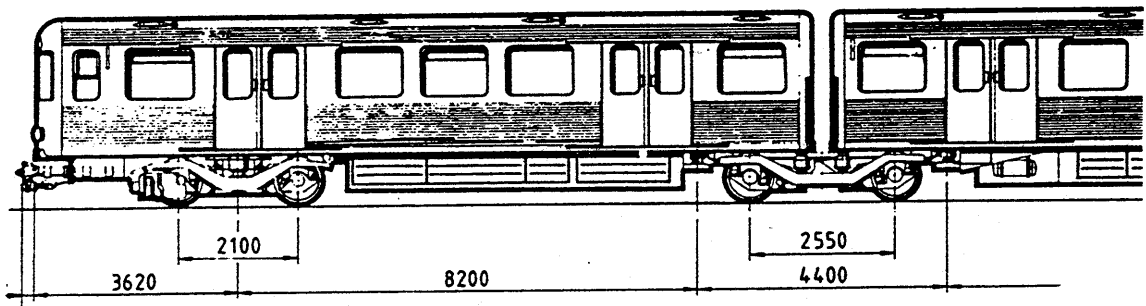


Abb. 3-66: U-Bahnwagen Typ 1.3.2, dreiteiliger Triebwagen der U-Bahn Hamburg (Abbildung: HHA).

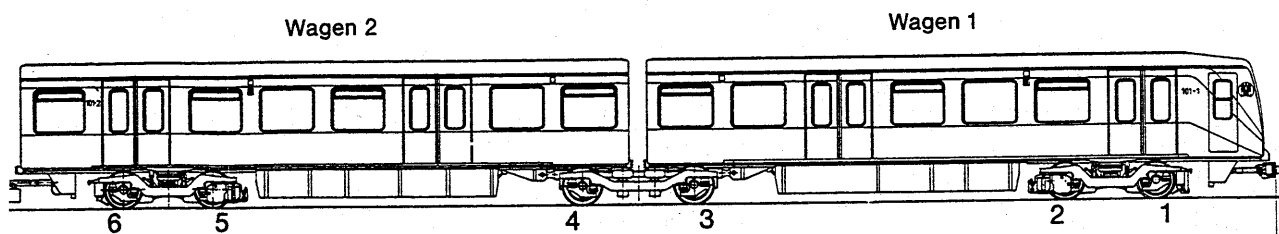


Abb. 3-67: U-Bahnwagen Typ 1.4.2, vierteiliger Triebwagen der U-Bahn Hamburg (Abbildung: ABB).

Stadtbahnfahrzeuge werden nach ähnlichen Gesichtspunkten konzipiert wie S-Bahn- und U-Bahn-Fahrzeuge. Sie unterliegen aber durch die teilweise Mitbenützung des Strassenraumes und die entsprechend bescheideneren Streckenausbaugrade grösseren Restriktionen bezüglich Länge und Breite. Recht häufig ist daher der Gelenkwagen anzutreffen. Üblicherweise wird auch hier der typische Nahverkehrseinstieg mit doppelspuriger Türe und beidseits einem bis zwei Abteilen angewandt. Bei Stadtbahnen mit Billettverkauf durch den Fahrer sind allerdings Eindeinstiege beim Führerstand notwendig.

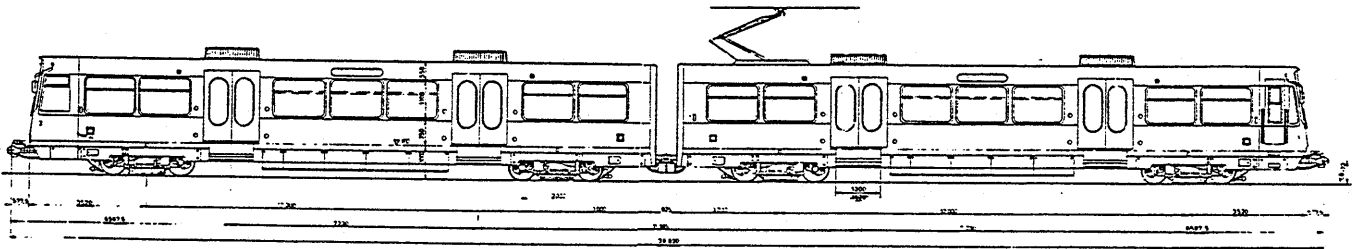


Abb. 3-68: Stadtbahnwagen Typ 1.3.1/2, Doppeltriebwagen der Stadtbahn Stuttgart mit Klapptritten für Niedrigbahnsteige (Abbildung: BBC).

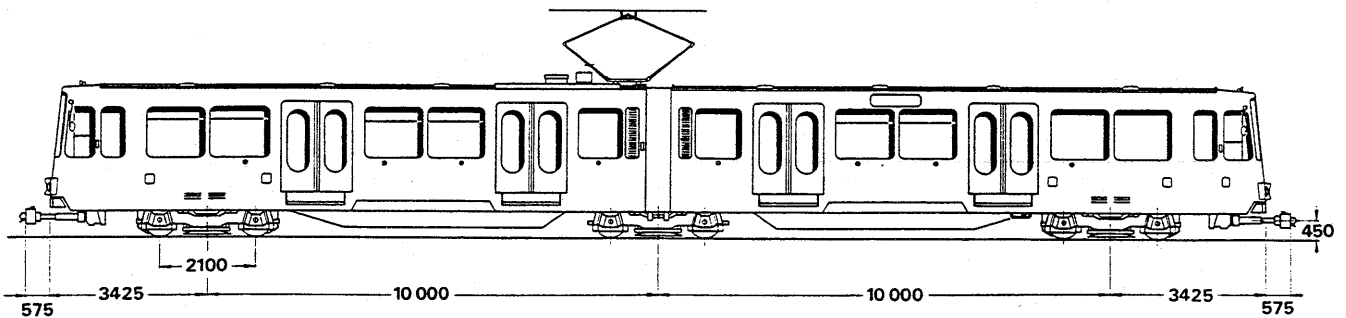


Abb. 3-69: Stadtbahnwagen Typ 1.3.2, B 80 C der Dortmunder Stadtwerke (Abbildung: ABB).

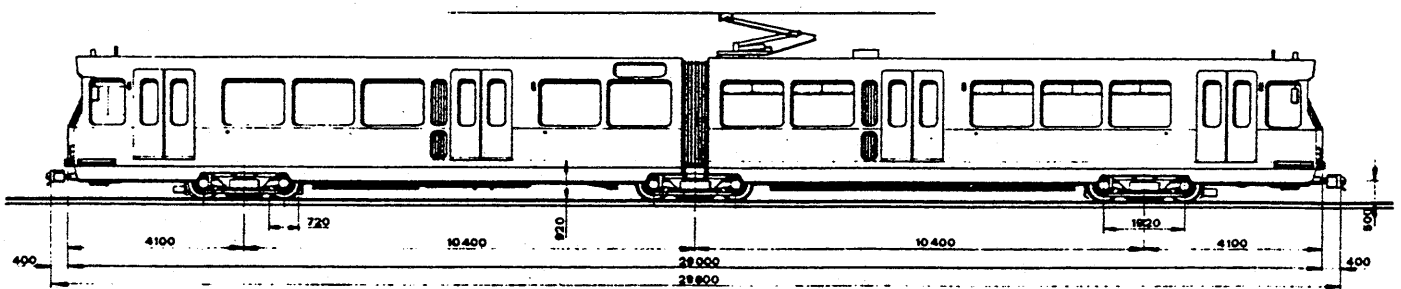


Abb. 3-70: Stadtbahnwagen Typ 1.4.2, Gelenktriebwagen der Stadtbahn Utrecht, eineinhalb bis zwei Abteile beidseits der Türe, gebaut ab 1982 (Abbildung: SIG).

3.33.25 Strassenbahnfahrzeuge

Im Strassenbahnbereich sind ein- und mehrteilige einstöckige Fahrzeuge mit einer sehr unterschiedlichen Anordnung der Türen üblich. Doppelstöckige Fahrzeuge, welche in Grossbritannien aus rechtlichen Gründen (Anhängerverbot) und zur Vermeidung von Stehplätzen eine grosse Verbreitung hatten (15'000 Fahrzeuge im Jahre 1925), sind praktisch verschwunden. Dem Vorteil des grossen Sitzplatzangebotes stand die stark verlängerte Fahrgastwechselzeit gegenüber [581]. Die während langer Zeit üblichen Fahrzeuge mit End- oder seltener mit Mitteleinstiegen sind mit dem Fahrgastfluss und der Entwicklung von Gelenkwagen neuen Grundrissaufteilungen gewichen. Die Vielfalt der Konstruktionen wird durch die engen Kurvenradien und die diversen Abfertigungsarten hervorgerufen. Bestimmend wirken unter anderem die Lage der Gelenke und der Drehgestelle. Hat der Fahrer noch Abfertigungsaufgaben, so muss bei der Führerkabine eine Türe angeordnet werden. Ist das Fahrzeug für den Fahrgastfluss mit stationärem Kondukteur eingerichtet, so befindet sich eine Einstiegstüre am Fahrzeugende.

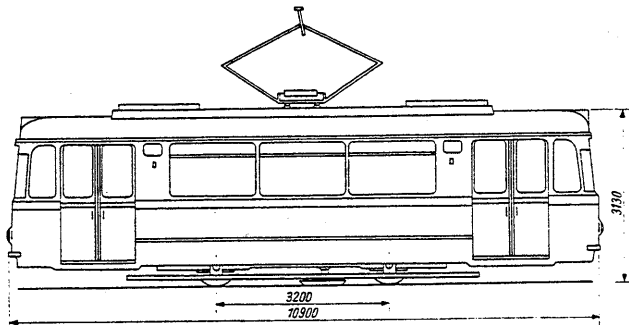


Abb. 3-71: Strassenbahnwagen Typ 1.2.1, Eindeinstiegswagen T2-57 des VEB Waggonbau Gotha, gebaut 1957 bis 1961 [601].

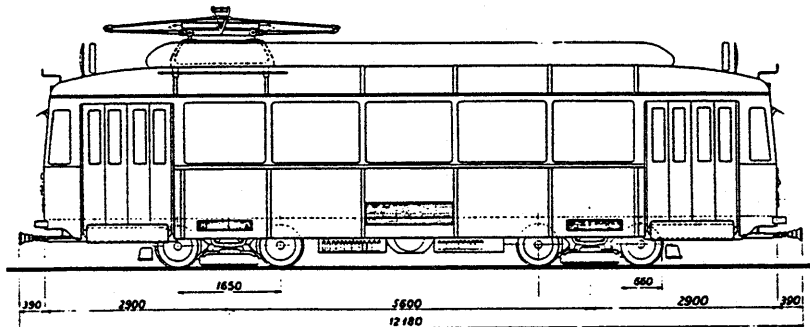


Abb. 3-72: Strassenbahnwagen Typ 1.2.1, Einheitstriebwagen VST, Einheitstyp II, Be 4/4 der Strassenbahn Neuchâtel, gebaut 1947 (Abbildung: Verkehrshaus der Schweiz).

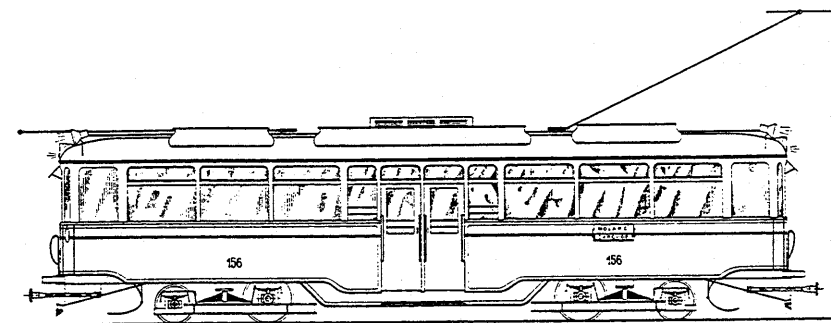


Abb. 3-73: Strassenbahnwagen Typ 1.3.1, Mitteleinstiegswagen der CGTE Genève, gebaut 1920 [50].

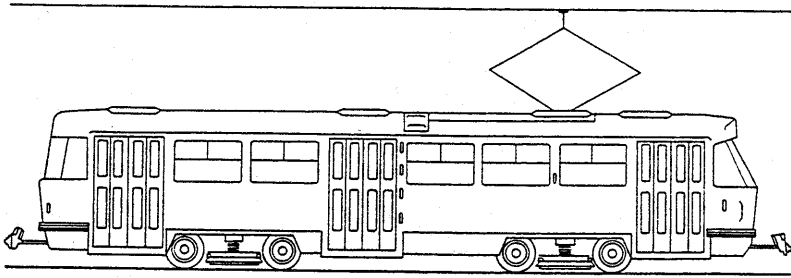


Abb. 3-74: Strassenbahnwagen Typ 1.4.1, T4D von Tatra mit Mittel- und Endestiegen, geliefert ab 1969 in die ehemalige DDR [601].

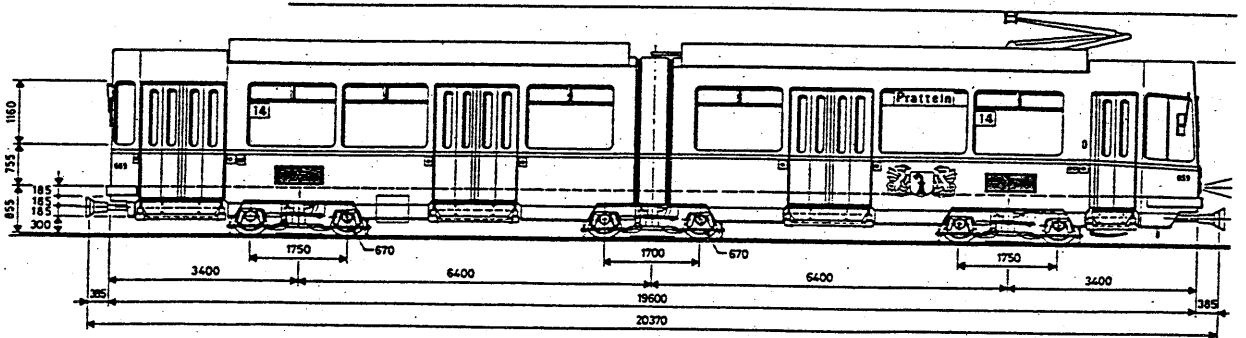


Abb. 3-75: Strassenbahnwagen Typ 1.4.1, zweiteiliges Gelenktram Be 4/6 der Basler Verkehrsbetriebe, gebaut ab 1990 (Abbildung: SWP).

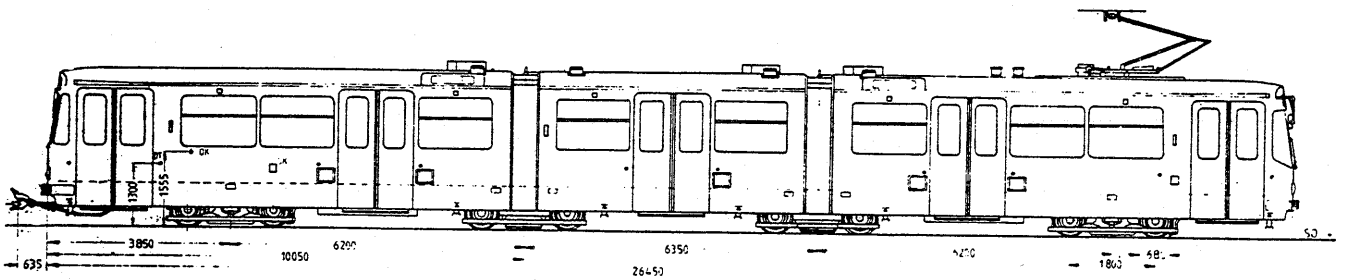


Abb. 3-76: Strassenbahnwagen Typ 1.4.1, dreiteiliges Gelenktram der HEAG Darmstadt, gebaut 1982 (Abbildung: HEAG).

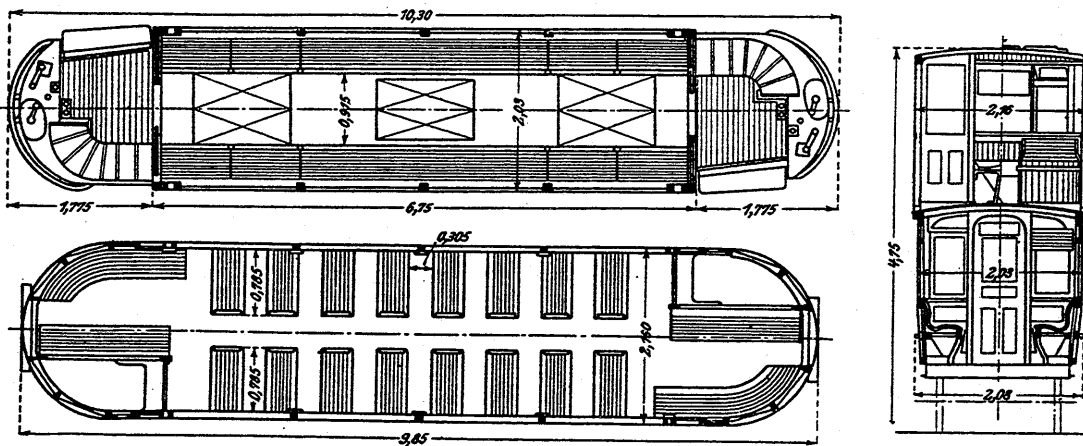


Abb. 3-77: Doppelgeschossiger Strassenbahnwagen von London, Zwanzigerjahre [581].

Dass der Fahrgastwechsel im Rahmen des Gesamtangebotes des öffentlichen Verkehrs seine Bedeutung für Komfort und Betriebsführung hat, beweist die Geschichte der Niederflurtechnik. Der wohl früheste Niederflurwagen wurde im Jahre 1891 für die Pferdebahn Wien geschaffen. Aus dem Jahr 1896 stammt der erste Niederflurtriebwagen der U-Bahn Budapest. Um den ersten Weltkrieg wurden in den USA einige hundert Niederflurtramwagen in Betrieb gesetzt. Beispielsweise beschaffte New York im Jahre 1912 über 200, ebenfalls 1912 die Strassenbahn Brooklyn hundert sowie zwischen 1916 und 1920 die Bostoner Strassenbahn 405 Niederflur-Strassenbahnwagen. Aus den Zwanziger- und Dreissigerjahren sind etwa der Mittelflurtriebwagen der CGTE Genf von 1920, die Anhängewagen von Amsterdam und Leipzig aus den Jahren 1922 und 1926 oder der Essener Montos-Wagen von 1932 mit lenkbaren Einzelradfahrwerken zu nennen [568].

In breitem Masse durchsetzen konnten sich aber alle diese Konstruktionen nicht. Entweder handelte es sich um zwei- oder vierachsige Fahrzeuge mit Mitteleinstieg und kleinem Fassungsvermögen, deren Fahrgestelle und Antriebe zwar erprobt und robust waren, die aber die bekannten betrieblichen Nachteile von Mitteleinstiegsfahrzeugen aufwiesen. Oder aber die neuartigen Fahrwerke stellten die damaligen Technik vor kaum zu überwindende Probleme. Nach dem Zweiten Weltkrieg erwies sich der Fahrzeugbau bezüglich der Einstiegsverhältnisse als wenig innovativ. Als neue Entwicklung wurden lediglich Ende der Vierziger- und Anfang der Fünfzigerjahre vermehrt Kleinraddrehgestelle verwendet. So wurde 1948 in Italien die Normierung eines vierachsigen Tramwagens mit vorderem Motordrehgestell und hinterem Kleinradlaufgestell geprüft und ein entsprechender Prototyp gebaut. Ausdrücklich hoffte man, die ungünstigen Traktionseigenschaften durch kürzere Haltezeiten auszugleichen. Das gleiche Konzept verfolgte Schindler im Jahre 1952 mit den drei Triebwagen Be 2/4 "Bugatti" der Basler Verkehrsbetriebe. Ein ähnliches Fahrzeug, ein Exportprodukt der Waggonfabrik Schindler, verkehrte schliesslich ab 1956 als Gelenkwagen in Rotterdam [568].

In jüngster Zeit ist die Entwicklung von Niederflur-Strassenbahnfahrzeugen intensiviert worden. Unter Niederflurfahrzeugen werden alle Strassenbahntypen verstanden, bei welchen zumindest eine der Türen eine deutlich reduzierte Einstiegshöhe aufweist. Dabei sind drei Entwicklungslinien zu unterscheiden [172]:

- Gruppe 1 Der abgesenkte Teil des Fahrzeuges beschränkt sich auf einen kleinen Teil der Gesamtfläche (10 bis 15 % Niederflur).
- Gruppe 2 Der überwiegende Teil des Fahrzeugbodens weist eine deutlich reduzierte Höhe über Schienenoberkante auf (60 bis 70 % Niederflur).
- Gruppe 3 Der gesamte Wagenboden ist abgesenkt (100 % Niederflur).

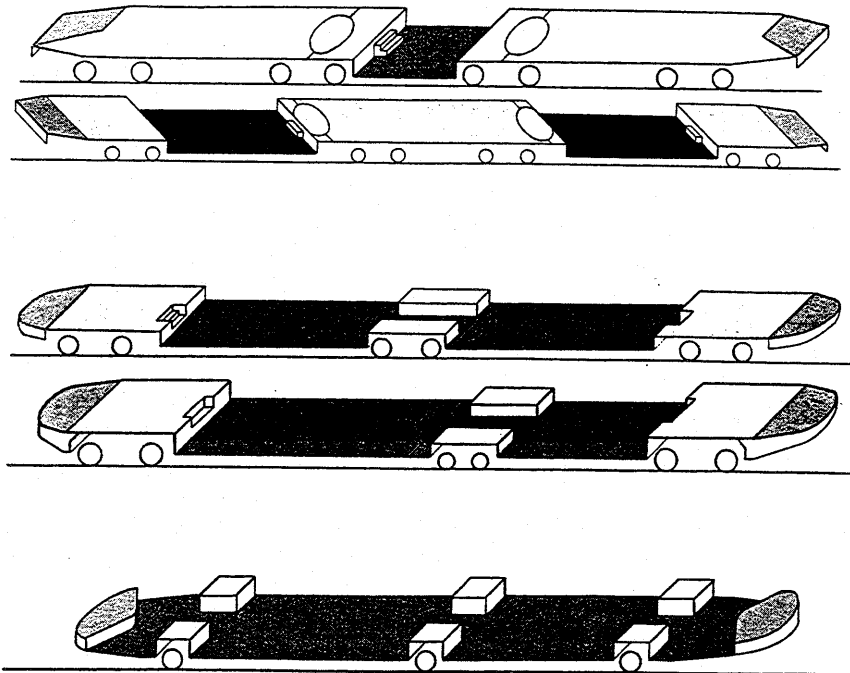


Abb. 3-78: Schematische Darstellung der Niederflurkonzepte. Oben: Gruppe 1; Mitte: Gruppe 2; unten: Gruppe 3 [338].

Bei der Gruppe 1 wird nur der Einstieg selbst und dessen unmittelbare Umgebung abgesenkt. Sowohl Motor- als auch Laufdrehgestelle sind von konventioneller Bauart. Konstruktiv anspruchsvoller ist die Gruppe 2, indem für einen mehrheitlich tiefgelegenen Wagenboden die Laufdrehgestelle neu entwickelt werden müssen. Die Motordrehgestelle sind von konventioneller Bauart und haben hochgelegene Endabteile zur Folge. Erst die Gruppe 3 bringt den vollen Nutzen eines tiefen Wagenbodens. Technologisch besteht zwischen der Gruppe 2 und der Gruppe 3 ein Sprung, indem bei letzterer auch die schwierigen Antriebsaggregate neu entwickelt werden müssen. Der Übergang zur Einzelradaufhängung ohne durchgehende Achse ist unvermeidbar, eine Konstruktion, welche bei Schienenfahrzeugen bisher praktisch unbekannt war.

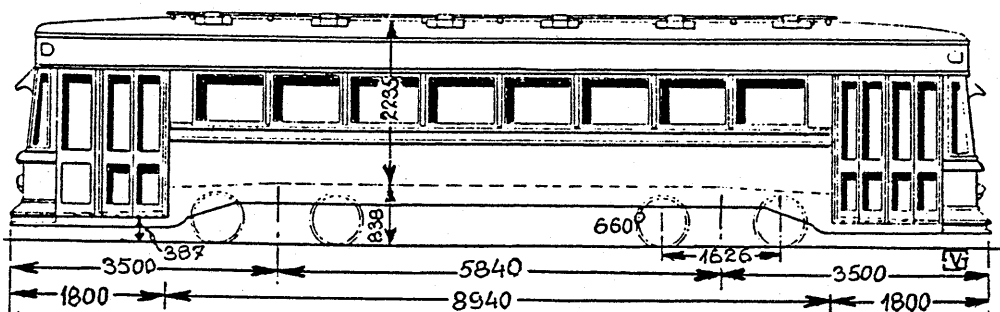


Abb. 3-79: Strassenbahnwagen Typ 1.2.2, Tramwagen von Wilmington mit Tiefenstieg bei den Endplattformen [261].

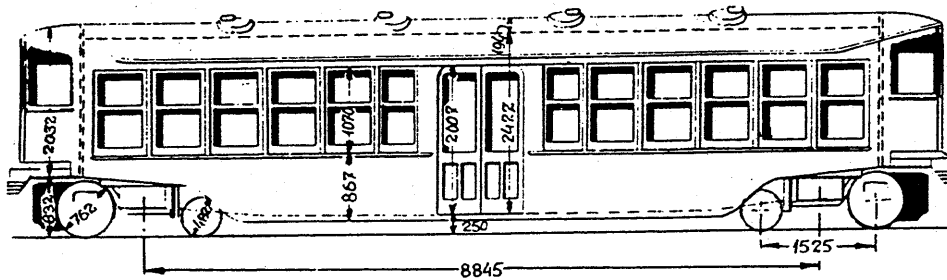


Abb. 3-80: Strassenbahnwagen Typ 1.3.2, Niederflur-Mitteinstiegswagen der New York Railway Co, gebaut 1912 [1].

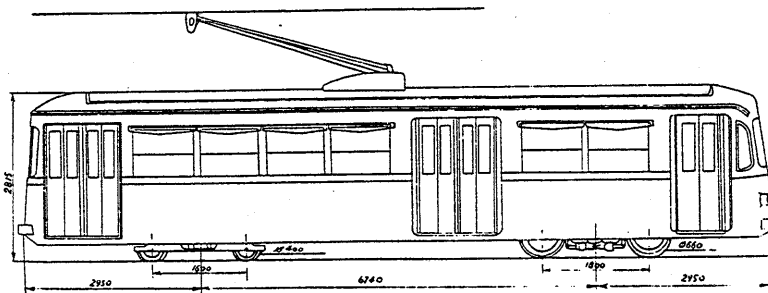


Abb. 3-81: Strassenbahnwagen Typ 1.4.1/2, Triebwagen der A.T.A.C. Roma mit hochflurigem Motor- und niederflurigem Laufdrehgestell, gebaut 1948 [602].

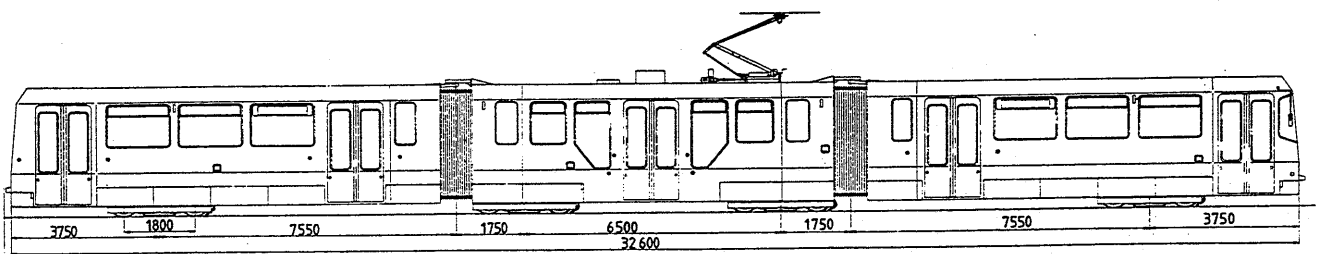


Abb. 3-82: Strassenbahnwagen Typ 1.4.2, Niederflurgelenktram Gruppe 1 der Strassenbahn Würzburg, gebaut 1988 (Abbildung: LHB).

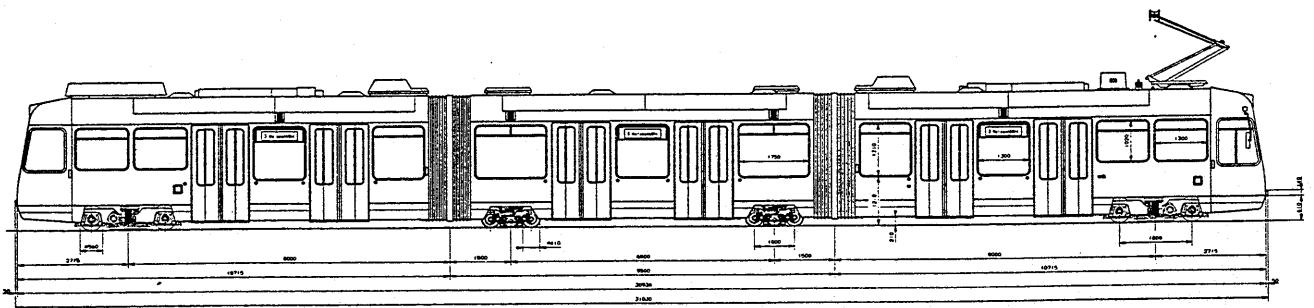


Abb. 3-83: Strassenbahnwagen Typ 1.3.1, Niederflurgelenktram Gruppe 2 der Verkehrsbetriebe Bern mit kleinen Laufrädern, gebaut 1990 (Abbildung: ACMV).

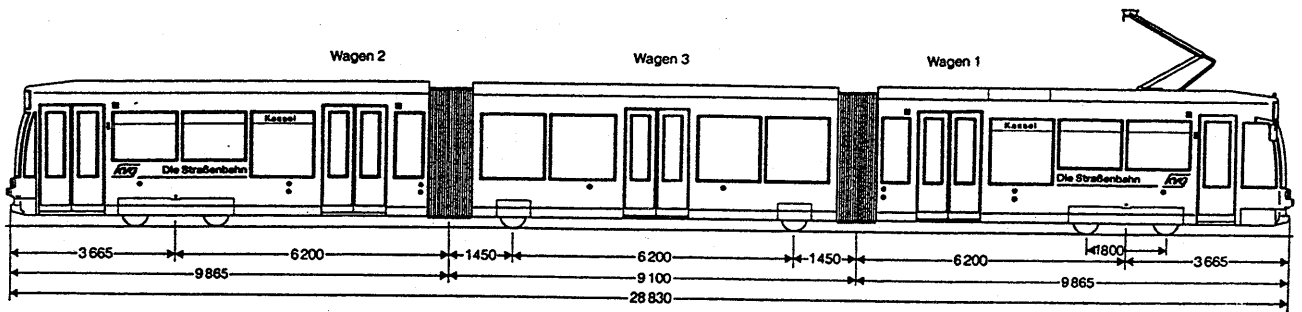


Abb. 3-84: Strassenbahnwagen Typ 1.4.1/2, Niederflurgelenktram Gruppe 2 der Kasseler Verkehrsgesellschaft mit Loseradlaufwerk der nicht-angetriebenen Räder, gebaut ab 1990 (Abbildung: KVG).

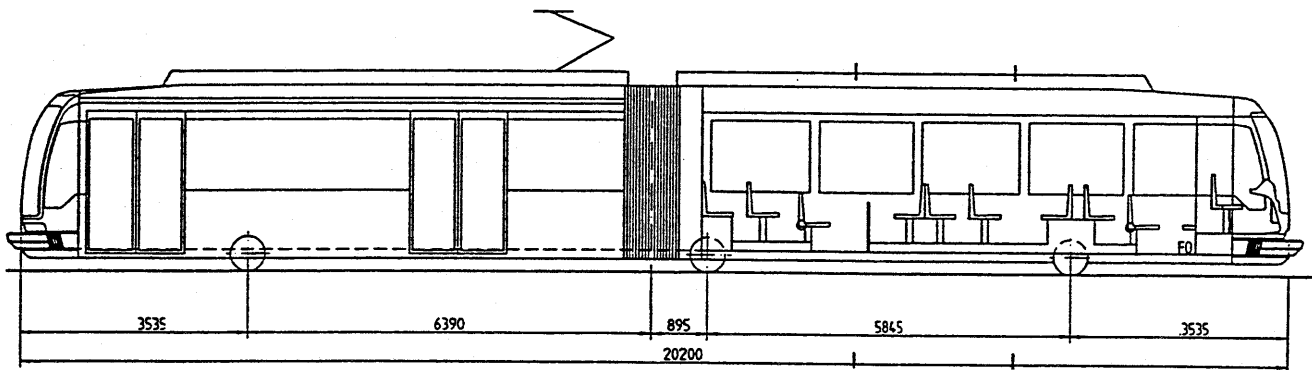


Abb. 3-85: Strassenbahnwagen Typ 1.4.2, Niederflurgelenktram Gruppe 3 Prototyp VDV, gebaut 1991 (Abbildung: Entwicklungsgemeinschaft).

3.33.26 Strassenfahrzeuge

Mit wenigen Ausnahmen orientierte sich der Autobusbau bis nach dem Zweiten Weltkrieg am Lastwagenbau. Erst um 1951 löste er sich davon und gleichzeitig akzentuierte sich die Trennung in Linienbusse und Ausflugsbusse. Bei ersteren entstand zunächst eine grössere Zahl unterschiedlicher Konzepte, verursacht durch stark variierende Vorstellungen der einzelnen Anbieter und Abnehmer. Ebenfalls nach dem Zweiten Weltkrieg wurde die Bauart der Gelenkbusse geschaffen, wobei der Gelenktrolleybus von 1941 in Mailand eine Pionierrolle spielte. Eine grössere Verbreitung erfuhren sie aber erst in den Sechzigerjahren. Nur eine Episode bildete der aufgrund der besonderen Rechtslage entstandene Eineinhalbdeckbus in der BRD.

Die in Europa sehr ähnlichen Anforderungen liessen ab 1959 die Idee zur Normierung aufkommen. Es bildeten sich schliesslich zwei-, drei- und viertürige Standardlinienbusse und drei- beziehungsweise viertürige Standardgelenkbusse heraus. Zweitürige Standard- und dreitürige Gelenkbusse sind in Deutschland üblich, in der Schweiz werden drei- beziehungsweise viertürige Fahrzeuge bevorzugt und in Italien ist schliesslich der viertürige Standardbus stark verbreitet. Bei den Standardbussen ist immer eine Türe vor der Vorderachse angeordnet. Bei zweitürigen Bussen befindet sich die hintere Türe unmittelbar vor der Hinterachse. Bei dreiteiligen und viertürigen Zweiachsbussen wird ein Einstieg oder ein Doppeleinstieg in der Fahrzeugmitte sowie eine weitere Türe unmittelbar hinter der Hinterachse angeordnet [67], [98]. Doppelstockfahrzeuge haben sich in Grossbritannien sehr stark durchgesetzt, sind aber in Kontinentaleuropa die Ausnahme

geblieben (Berlin). In Ländern mit tiefen Lohnkosten, in welchen der Autobus von einem Kondukteur begleitet werden kann, müssen die Fahrgäste nicht beim Chauffeur vorbeigeführt werden. Es finden sich deshalb beispielsweise in Lateinamerika Buskonstruktionen, bei welchen die vorderste Türe hinter der ersten Achse angeordnet ist. Ähnliche Überlegungen werden bei Betrieben angestellt, welche vollständig auf den Billettverkauf und die Kontrolle im Fahrzeug verzichtet haben [594].

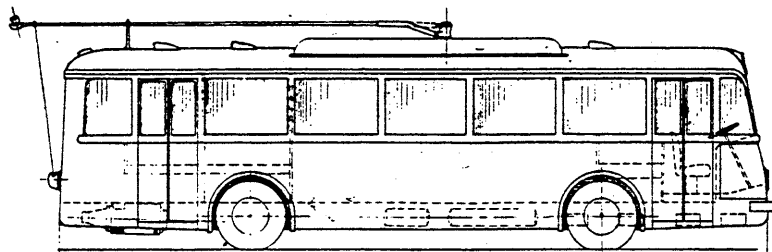


Abb. 3-86: Autobus Typ 1.4.1, zweitüriger Zweiachstrolleybus der CGTE Genève, gebaut 1942 und 1948 [50].

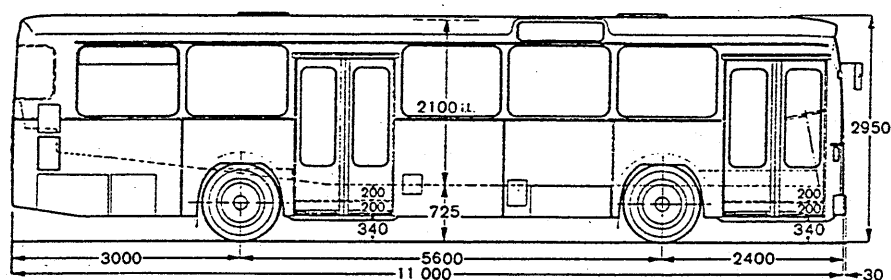


Abb. 3-87: Autobus Typ 1.4.1, zweitüriger Zweiachs-Standardlinienbus I [67].

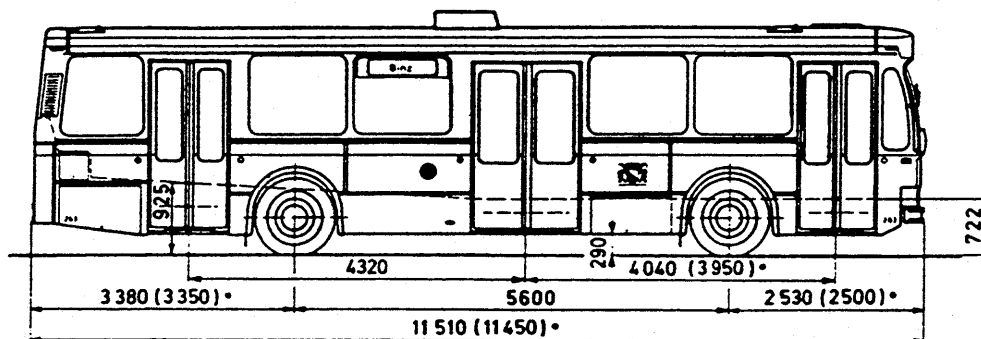


Abb. 3-88: Autobus Typ 1.4.1, dreitüriger Zweiachsbus Saurer SH 560-25, Verkehrsbetriebe Zürich [67]

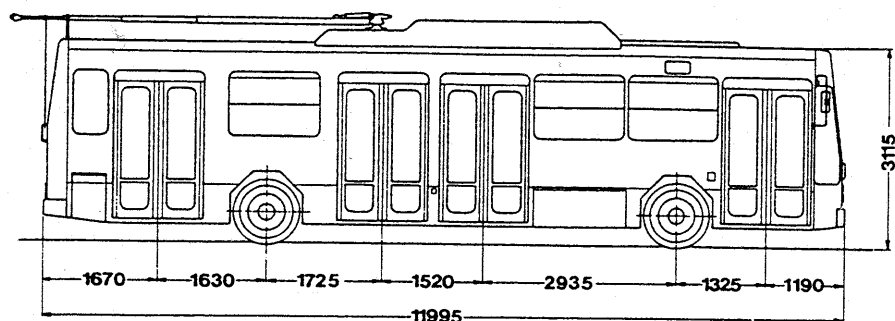


Abb. 3-89: Autobus Typ 1.4.1, viertüriger Zweiachstrolleybus der Mailänder Verkehrsbetriebe, Bauart FIAT/IVECO/C.G.E., 1983 [240].

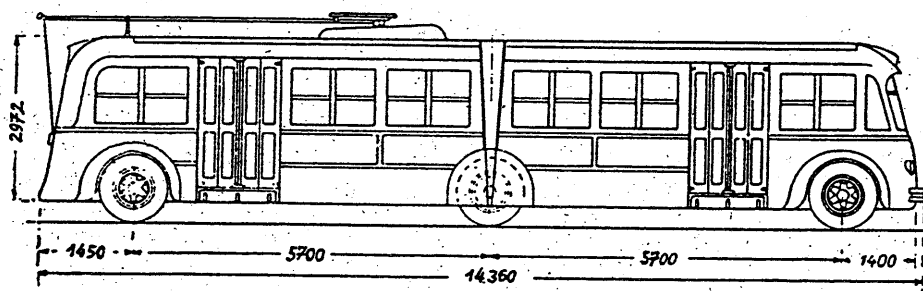


Abb. 3-90: Trolleybus Typ 1.3.1, Gelenkbus mit zwei Türen der Verkehrsbetriebe Mailand, gebaut 1941 (Abbildung: Pabst).

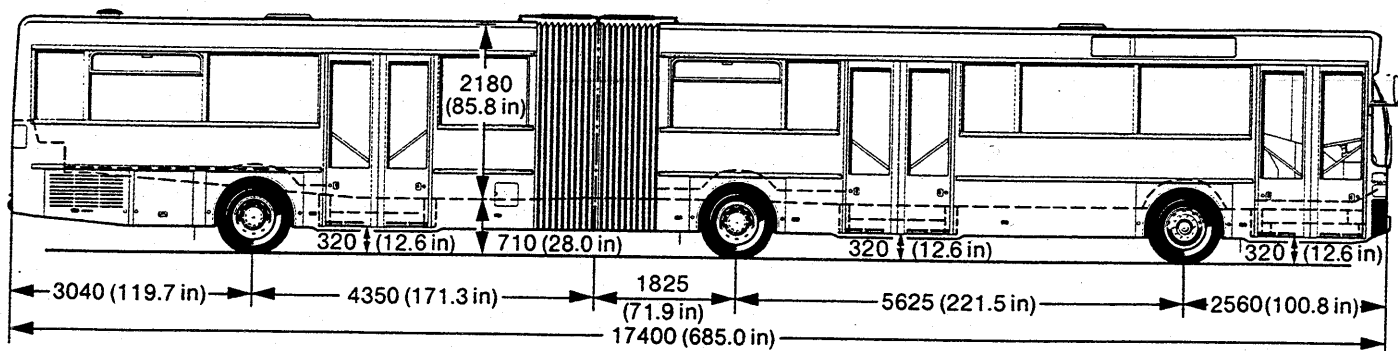


Abb. 3-91: Autobus Typ 1.4.1, dreitüriger Gelenkbus Mercedes O 405 G (Abbildung: Mercedes).

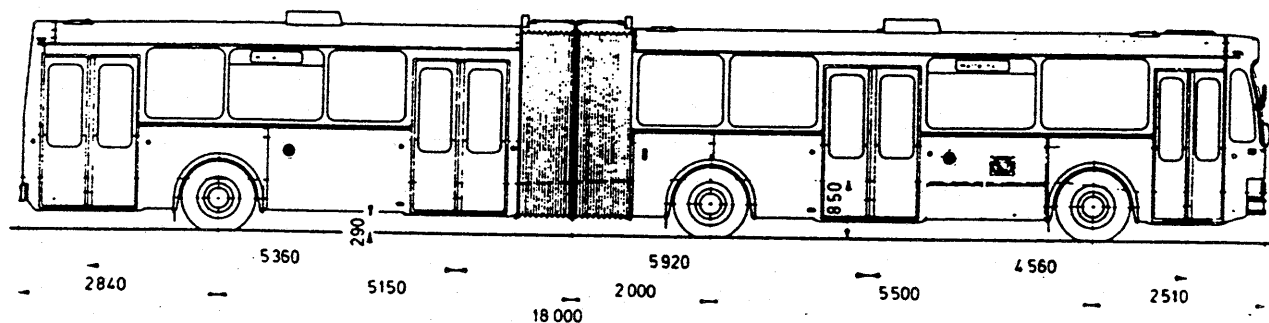


Abb. 3-92: Autobus Typ 1.4.1, viertüriger Gelenkbus FBW 91 GL der Verkehrsbetriebe Zürich, gebaut 1978 (Abbildung: VBZ).

Noch seltener als bei der Strassenbahnen blieben Niederflurkonzepte bei den Autobussen und besonders bei der Eisenbahn. Mitte der Sechzigerjahre erlebte der Anderthalbdeck-Bus mit Tief Einstieg an der hintersten Türe in der BRD eine kurze Blüte. 1975 wurde in Deutschland ein Mittelflur-Gelenkbus mit einer Wagenbodenhöhe von 540 mm vorgestellt. Im Folgejahr präsentierte die Firma NEOPLAN ein Niederflurkonzept für einen Bus mit einer Einstiegshöhe von nur 300 mm als Gegenvorschlag zum Standardlinienbus II. Leider konnte sich dieser Niederflurbus damals nicht durchsetzen.

Die neueren Entwicklungen gingen zunächst von konventionellen Konstruktionskonzepten aus. Dies führte zu Schwierigkeiten bei der Unterbringung von Motor und Antrieb, was vor allem in Frankreich dem Mittelflurbus zu grosser Verbreitung verholfen hat [216]. Bei einteiligen Bussen hat sich eine Lösung mit mittelflurigem Heckbereich herauskristallisiert. Bei zweitürigen Bussen können damit beide Einstiege im niederflurigen Fahrzeugbereich angeordnet werden. Bei Gelenkbussen befindet sich der Motor im Nachläufer, wobei der gesamte Nachläufer mittelflurig ausgeführt wird. Die beiden Türen des Vorderwagens sind niederflurig. Neue Wege gehen Konstruktionen, welche den Antrieb durch Radnabenmotoren vorsehen. Dadurch lässt der gesamte Wagenboden mit allen Fahrzeugeinstiegen tieferlegen. Die Fahrzeuge dieser Bauart befinden sich noch im Frühstadium.

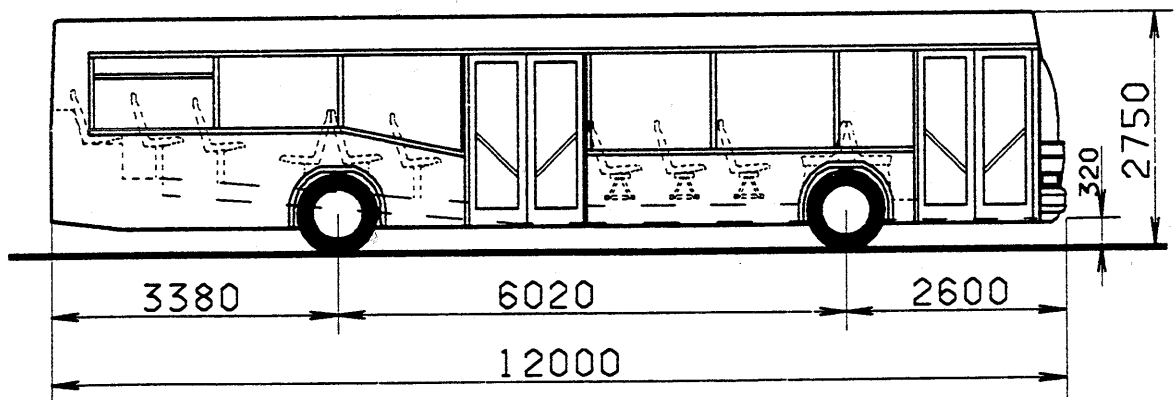


Abb. 3-93: Autobus Typ 1.4.1/2, Niederflur-Standardbus zweitürig (Abbildung: NEOPLAN).

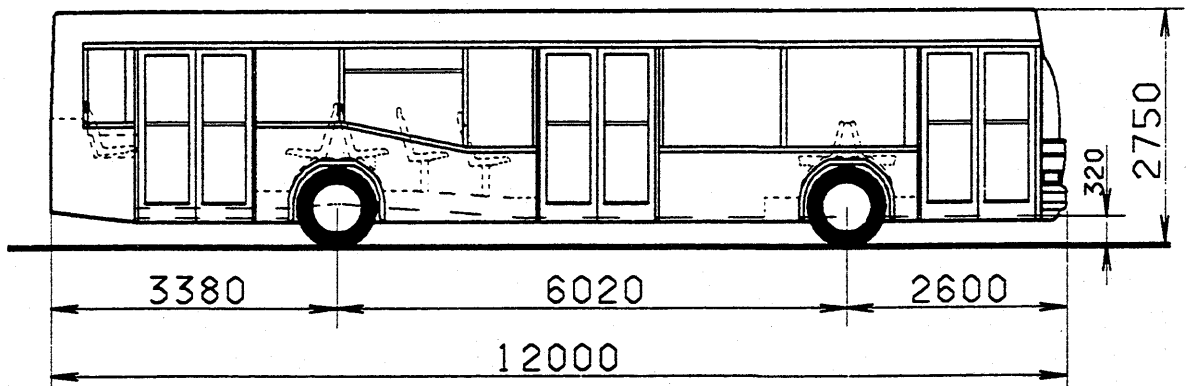


Abb. 3-94: Autobus Typ 1.4.1/2, Niederflur-Standardbus dreitürig (Abbildung: NEOPLAN).

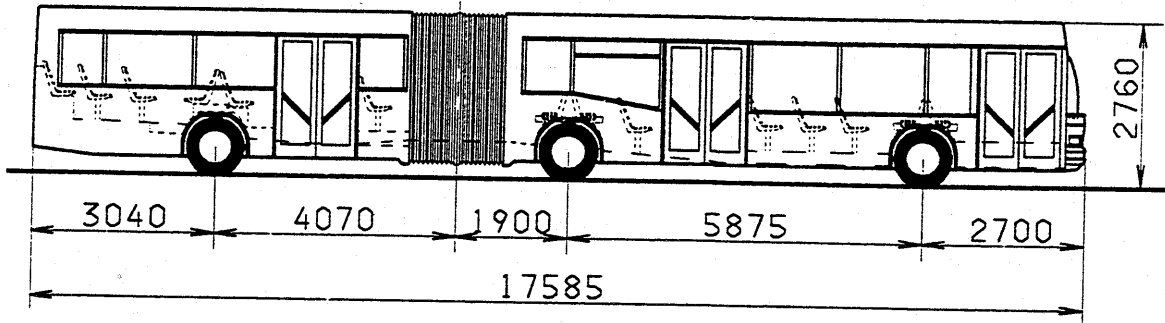


Abb. 3-95: Autobus Typ 1.4.1/2, Niederflur-Gelenkbus dreitürig (Abbildung: NEOPLAN).

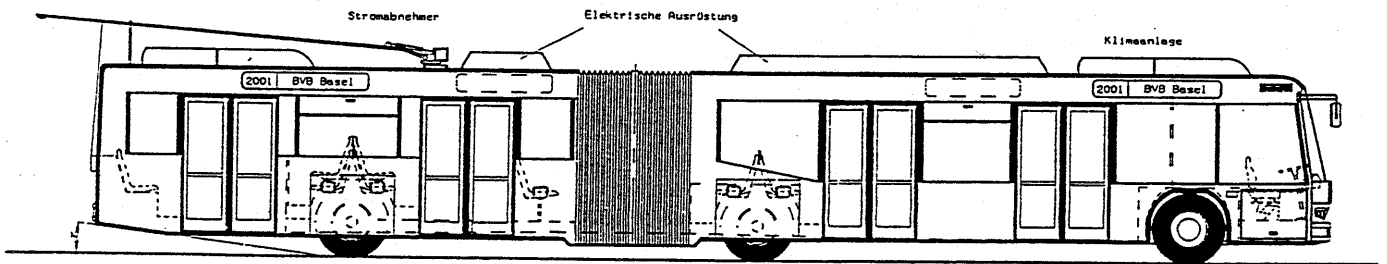


Abb. 3-96: Niederflurgelenktrrolleybus Typ 1.3.2, Neoplan, BVB Basel (Abbildung: NEOPLAN).

3.4 Linienbetrieb

3.4.1 Fahrgastverhalten

3.4.1.1 Fahrtweiten

Die Fahrtweitenverteilung ist bei gegebener gesamter Verkehrsleistung ein Mass für die zu erwartenden Fahrgastwechselzahlen in einem Netz. Dabei ist zu unterscheiden zwischen den mittleren Fahrtweiten innerhalb eines Netzes und jenen auf einer einzelnen Linie:

- Die mittlere Fahrtweite eines Netzes ist eine Funktion der Gebietscharakteristiken, zum Beispiel der Siedlungsgrösse und -verteilung, der Verteilung der Arbeitsplätze und des Ausbaustandes des Verkehrsnetzes.
- Die mittlere Fahrtweite auf einer Linie ist abhängig von ihrer Länge, der Netzbildung und damit der Funktion im Netz.

Bereits 1889 stellte Lill sein beim Eisenbahnverkehr beobachtetes einfaches Fahrlängengesetz auf, mit welchem er den Gravitationsansatz begründete [346], [388]:

$$(3-17) \quad r = \frac{M}{d^2}$$

wobei	r	Zahl der Reisen
	M	Verkehrsbedürfnis (konstante Zahl)
	d	Fahrtweite

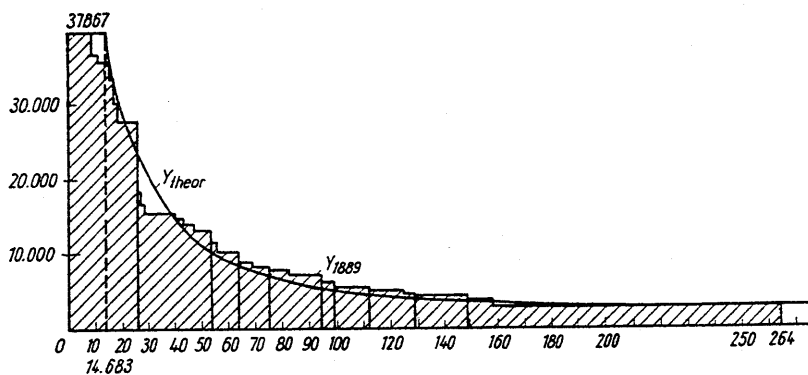


Abb. 3-97: Beispiel für das Lill'sche Reisegesetz [388].

Die einfache Fahrlängenverteilung nach Lill gilt nicht, wenn eine reiselängenspezifische Konkurrenz durch andere Verkehrsmittel besteht, dies namentlich im Langstreckenbereich durch den Flugverkehr und im Nahverkehr, wo kurze Distanzen zu Fuss, mit dem Velo oder mit dem Auto zurückgelegt werden.

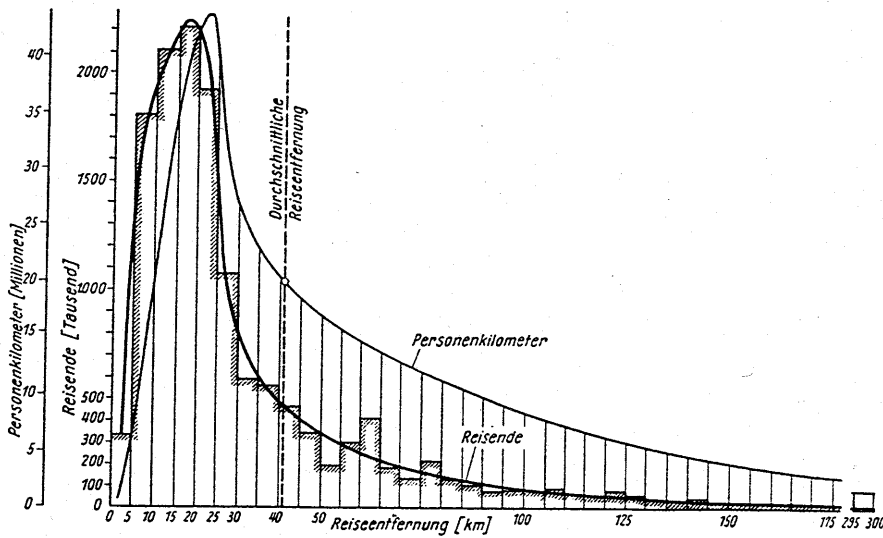


Abb. 3-98: Fahrgastzahl und Personenverkehrsleistung der Niederländischen Eisenbahn nach Distanzbereich, um 1960 [346].

Im Nahverkehr ist die Häufigkeitsverteilung typischerweise linksschief, weshalb [388] zu ihrer Beschreibung die Erlang-k-Funktion vorschlägt:

$$(3-18) \quad A(a) = e^{-k \cdot a} \cdot \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(k \cdot a)^n}{n!}$$

$$(3-19) \quad k = \left(\frac{d_m}{s_d} \right)^2$$

$$(3-20) \quad a = \frac{d}{d_m}$$

wobei A Anteil einer bestimmten Fahrtweite [-]
 d Fahrtweite [m]
 s_d Standardabweichung der Fahrtweite [m]

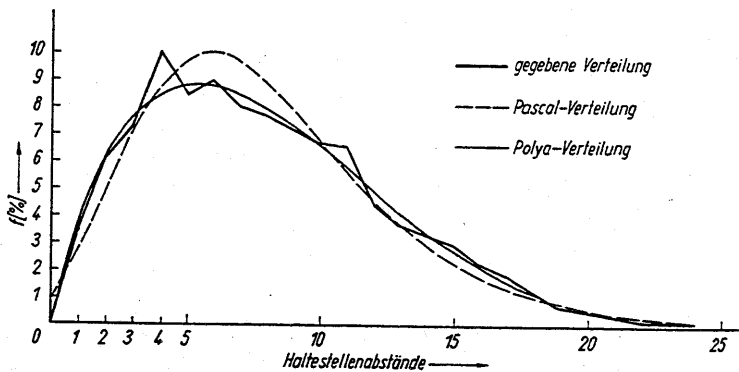


Abb. 3-99: Verteilung der Fahrtweiten bei der Berliner U-Bahn am 16. Oktober 1927 [388].

Da die Erlang-k-Funktion nur ganzzahlige Werte von k akzeptiert, wird entweder der näherliegenden ganzzahlige Wert verwendet oder es werden die beiden benachbarten Werte errechnet und anschliessend linear interpoliert [388], [425]. Bei der S-Bahn Berlin wurde eine durchschnittliche Fahrtweite von 5.5 km, bei der Métro Paris eine solche von 3.5 km beobachtet [422]. Die Städte in der ehemaligen DDR zeigten mittlere Fahrtweiten von 2.5 bis 4.5 km, wobei kleinere Städte die tieferen Werte aufwiesen. Das Verhältnis von Standardabweichung und Mittelwert beträgt im Schnitt etwa 0.65. Der k -Wert nach Erlang ergibt sich damit zu 2.3, also 2 oder 3.

Tab. 3-17: Fahrtweiten ausgewählter Städte, Standardabweichung und k -Wert nach Erlang [388].

Stadt	\bar{r} km	$\pm s_r$ km	k
Schwerin	2,63	1,68	2,46
Halle (Saale)	2,86	1,61	3,16
Magdeburg	3,54	2,47	2,06
Wuppertal	4,29	3,06	1,97
Nürnberg	4,51	2,41	3,50 = max
Düsseldorf	4,52	3,33	1,84 = min
Bremen	5,18	3,36	2,38
Köln	5,40	3,66	2,19
Hamburg (Straßenbahn)	5,61	3,64	2,38
München	5,70	3,68	2,39
Westberlin (U-Bahn)	5,98	4,26	1,97
Hamburg (U-Bahn)	6,03	3,82	2,48

Zur Abhängigkeit der Teilfahrtweite der Fahrgäste von der Linienlänge liefert nur [34] für Zürich einen Anhaltspunkt. Demnach strebt sie auf einer bestimmten Linie einem Grenzwert zu, der im Falle von Zürich bei etwa sieben Haltestellenabschnitten liegt. Dieser Wert hängt in starkem Mass mit dem Liniennetzkonzept beziehungsweise der Funktionszuweisung zusammen und dessen Aussagekraft bleibt daher limitiert. Bei einer mittleren Haltestellendistanz von 400 m leitet sich immerhin eine Fahrtweite von 2.8 km ab, also erwartungsgemäss weniger als die der Grösse der Stadt entsprechende mittlere Fahrtweite [34]. Aus der mittleren Teilfahrtweite von etwa 6 Haltestellenabschnitten sowie aus den Umsteigeranteilen gemäss [244] (einmaliges Umsteigen von 48 % und mehrmaliges Umsteigen von 12 % der Benutzer) lässt sich eine mittlere Fahrtweite auf dem Netz von rund 4.1 km abschätzen. Dies fügt sich gut in die Zahlen anderer Städte ein und liegt um rund 70 % über der mittleren Fahrtlänge auf einer Linie.

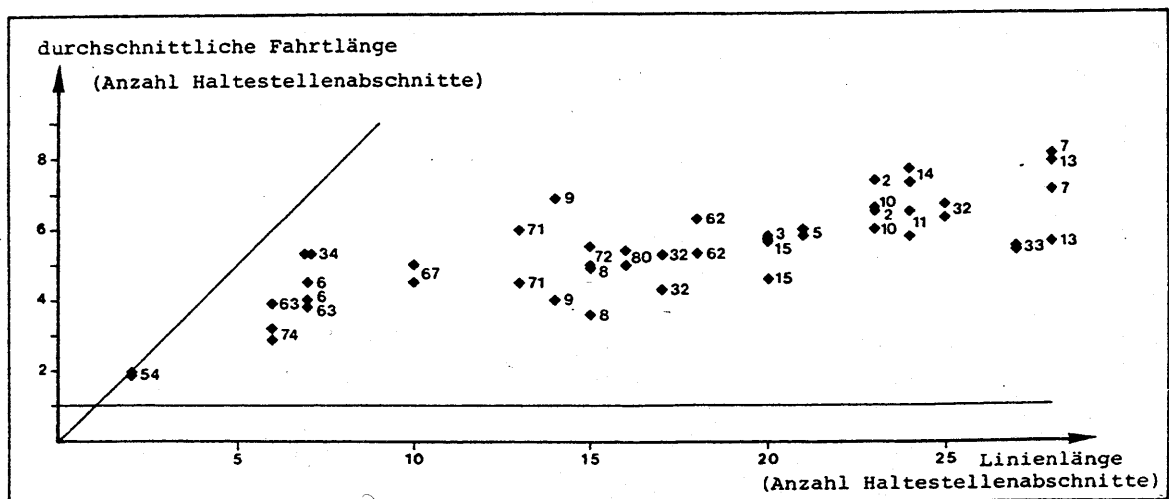


Abb. 3-100: Durchschnittliche Teilfahrtlänge in Funktion der Linienlänge, VBZ Zürich [34].

3.41.2 Fahrplanabhängigkeit des Fahrgastzustromes

Die Fahrgäste richten sich mit steigender Kursfolgezeit zunehmend besser auf den Fahrplan aus. [167], [464] und [475] haben dabei folgende Feststellungen gemacht:

- Bei Kursfolgezeiten von unter 5 Minuten kann mit konstantem Fahrgastzugang gerechnet werden.
- Bei Kursfolgezeiten von über 15 Minuten ist die Annahme eines konstanten Fahrgastzuganges unzulässig.

Im wichtigen Intervallbereich zwischen 5 und 15 Minuten bestehen abweichende Beobachtungen. Nach [343] ist bereits ab 7 Minuten Kursfolge eine Anpassung der Fahrgäste an den Fahrplan zu erwarten, wobei dieses Verhalten in der Morgenspitze besonders ausgeprägt ist. Es ist zudem abhängig von der Merkbarkeit der Kursfolgezeiten. Wiederholen sich die Abfahrtszeiten stündlich, so ist der Anteil der sich am Fahrplan orientierenden Fahrgäste spürbar grösser als bei den übrigen Intervallen. Letztere Bemerkung von [343] könnte den Widerspruch zur Angabe von [92] erklären, welcher bei Kursfolgezeiten von 7 oder 8 Minuten noch keinen Fahrplaneinfluss feststellen konnte. Als Gründe für ein örtlich unterschiedliches Fahrgastverhalten nennt [343] aber auch die Fahrplanzuverlässigkeit, den Fahrtzweck, die Tageszeit, die Reiselängen und die Haltestellenausstattung.

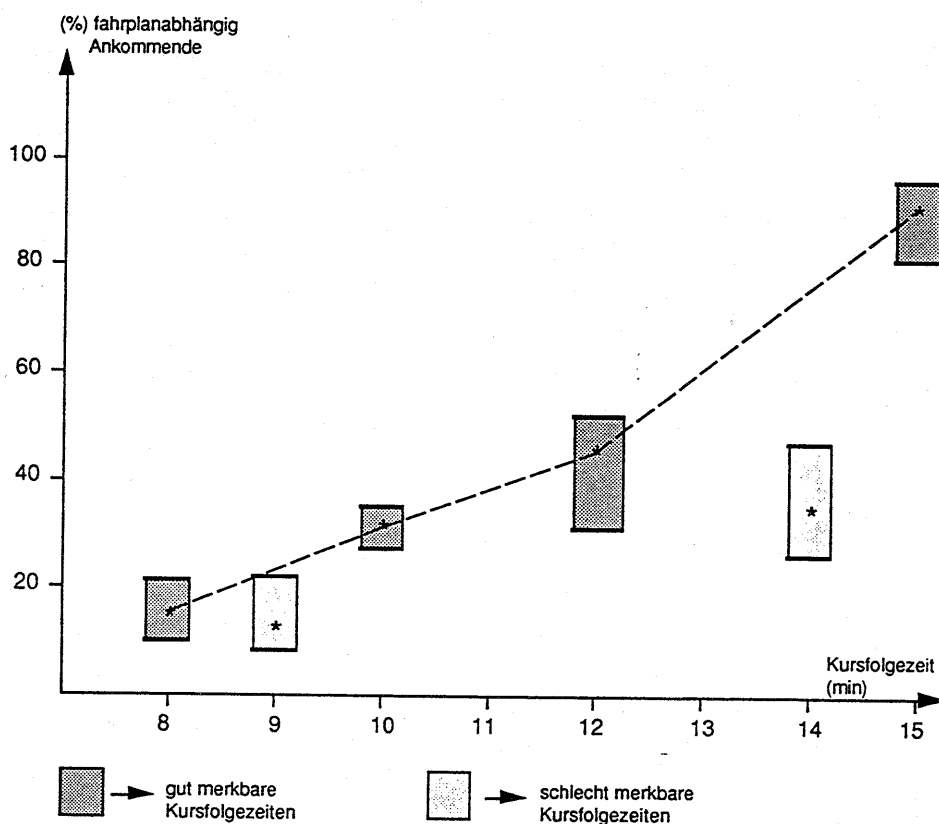


Abb. 3-101: Fahrplanorientiertes Verhalten der Fahrgäste in den Nebenverkehrszeiten in Funktion der Taktfolge ([67] nach [343]).

3.41.3 Tagesganglinie des Verkehrsaufkommens im Nahverkehr

Die Tagesganglinie der Nachfrage nach öffentlichen Verkehrsleistungen kommt durch folgende Faktoren zustande:

- Die Nachfrage als Ganzes verändert sich in Funktion der Aktivitäten des Menschen im Tagesverlauf.
- Der Modal Split des öffentlichen Verkehrs ist nicht bei allen Verkehrszwecken identisch. Seine Angebotseigenschaften verhelfen ihm zu einem hohen Marktanteil beim Pendlerverkehr, verhindern aber umgekehrt eine gute Marktstellung beim Gelegenheitsverkehr. Die Tagesganglinie wird dadurch zusätzlich überhöht [43], [496].

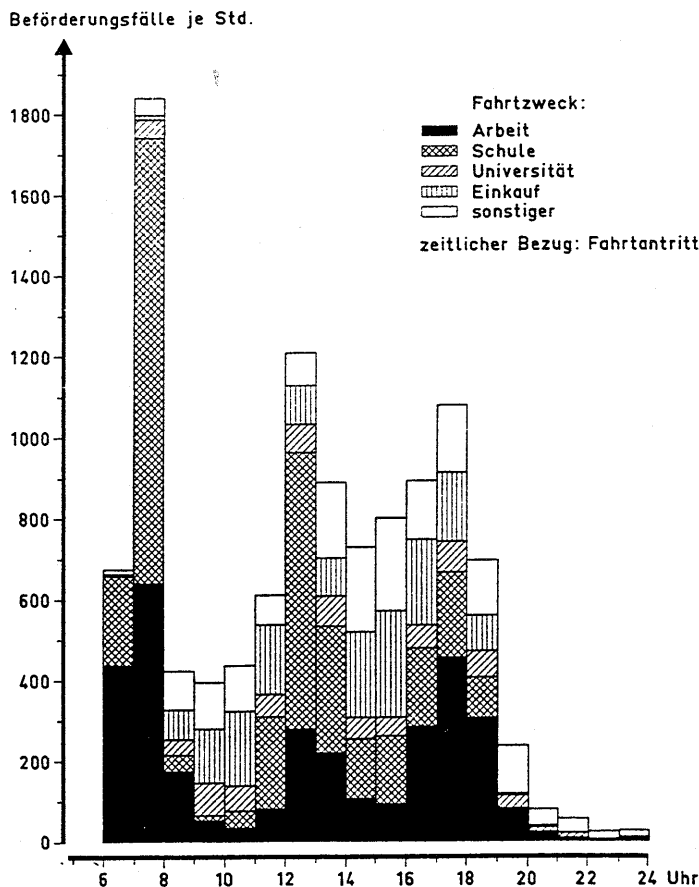


Abb. 3-102: Tagesganglinie des Verkehrsaufkommens im öffentlichen Verkehr nach Verkehrszweck [496].

Die Gesamtbelastung des Netzes zeigt je eine Spitze am Morgen und am Abend. Hinzu kommt ein kleines Maximum am frühen Nachmittag [102], [396], [403], [425], [496]. In der Morgenspitzenstunde werden dabei in Lastrichtung über 25 % der gesamten täglichen Verkehrsmenge befördert [434], in der Spitzenviertelstunde allein sogar 8 % [386].

Prozentanteile der Fahrgäste/Stunde
am Tagesverkehrsaufkommen

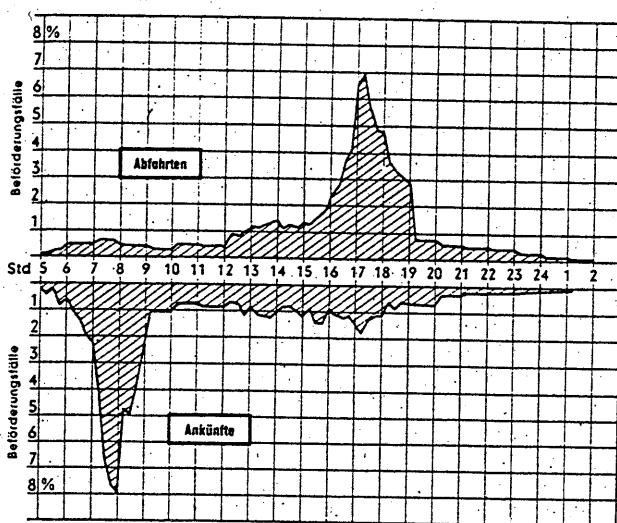
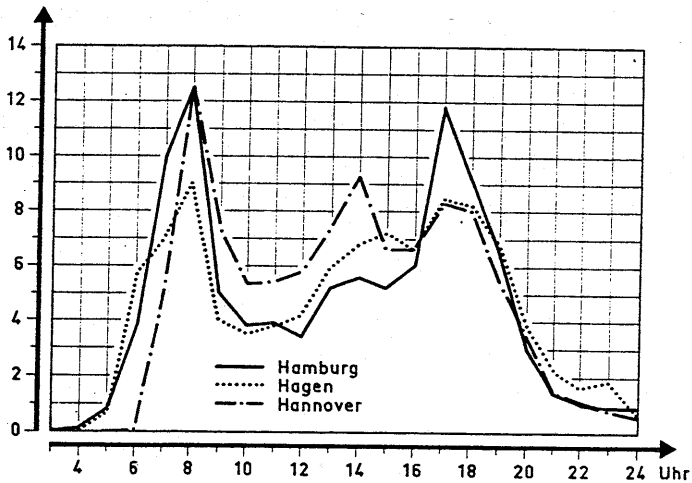


Abb. 3-103: Oben: Typische Tagesganglinie der Beförderungsfälle auf Nahverkehrsnetzen [496].
Unten: Tagesganglinie des Verkehrsaufkommens bei der Hamburger S-Bahn am Hauptbahnhof Hamburg, getrennt nach Hauptverkehrsrichtungen [386].

3.42 Betriebsauslegung und Haltezeiten im ungestörten Betrieb

3.42.1 Betriebsauslegung

Die Basis der Betriebsauslegung bilden das Verkehrsaufkommen, das Fassungsvermögen der Transportgefäße und die Umlaufzeit:

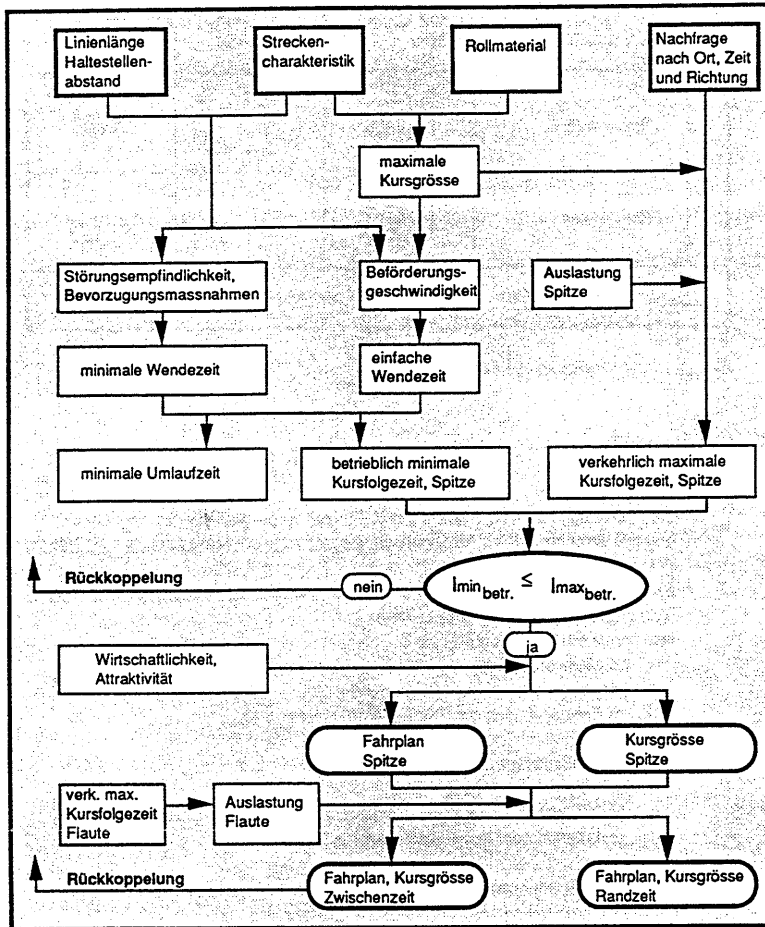


Abb. 3-104: Ablauf der Betriebsauslegung einer öffentlichen Verkehrslinie [67].

Das Verkehrsaufkommen und die fahrdynamischen Eigenschaften werden als gegeben betrachtet. Für das anzunehmende Fassungsvermögen ist neben den eingesetzten Fahrzeugen die zugelassene Fahrzeugauslastung massgebend, wofür zwei Kontrollgrössen bestehen:

- **Komfort:** Der Stehplatzbelegungsgrad darf aus Komfortgründen eine bestimmte Grösse nicht überschreiten.
- **Betrieb:** Bei höherer Stehplatzbelegung darf sich die Fahrgastwechselzeit nicht übermässig verlängern.

Bezüglich der Bemessungstehplatzdichte sprechen [306] und [502] von $0.125 \text{ m}^2/\text{P}$ oder 8 P/m^2 . Tiefere Stehplatzbelegungsgrade nennt [67] mit 4 P/m^2 für den Nahverkehr und 3 P/m^2 für den Agglomerationsverkehr in der Spitzenzeit sowie 0 P/m^2 in den Zwischenzeiten. Durchgesetzt haben sich mittlerweile 4 P/m^2 , die unter anderem von [469] bestätigt werden. Befragungen bei Versuchen mit Doppelstockwagen ergaben aber, dass selbst dieser Wert von den Fahrgästen nur über kurze Distanzen akzeptiert wird. Da bei hoher Auslastung des Fahrzeuges der Fahrgastrückstau an den Haltestellen die Umlaufzeit beeinflusst, ist die Angabe einer maximalen Auslastung ohnehin nur mit Blick auf die zulässigen Haltezeitverlängerungen sinnvoll.

3.42.2 Feste Haltezeitanteile

3.42.21 Überblick

Die festen Haltezeitanteile werden durch jene Vorgänge verursacht, welche den Fahrgastwechsel einleiten und nach dessen Abschluss die Abfahrbereitschaft des Kurses herzustellen. Sie sind nur insofern fest, als dass ihre Länge vom Umfang des Fahrgastwechsels unbeeinflusst bleibt. Der feste Haltezeitanteil nach dem Fahrgastwechsel wird gelegentlich als Latenzzeit bezeichnet [48]. Dieser Begriff soll auch für den Anteil vor dem Fahrgastwechsel benützt werden. Als Teilprozesse innerhalb der beiden Latenzzeiten nennt [298] beispielhaft die folgenden Punkte:

Tab. 3-18: Teilprozesse der Latenzzeiten I und II nach [298].

Latenzzeit I: Vor dem Fahrgastwechsel	Latenzzeit II: Nach dem Fahrgastwechsel
Zeitdifferenz zwischen Bremsruck und Türfreigabe Türbetätigung Zeitdauer zum Öffnen der Türen	Erkennen, dass der Fahrgastwechsel abgeschlossen ist Zeitdauer zum Schliessen der Türen Kontrolle, dass Türen geschlossen sind Zeitdauer bis zum Anfahruck

Der Zeitaufwand für die verschiedenen Teilprozesse lässt sich nach seinen Charakteristiken folgendermassen typisieren:

- Reaktionszeiten des Fahrpersonals
- Reaktionszeiten der Fahrgäste
- Reaktionszeiten der Fahrzeugsteuerung
- Türöffnungs- und -schliesszeit
- Mindestoffenzeit der Fahrzeurtüre

Unterschiedliche Türöffnungs- und -schliesszeiten, das Verhalten des Fahrers beim Abschluss des Verkaufsvorganges, die Zahl und Art routinemässiger Tätigkeiten vor der Abfahrt sowie die Handlungen, welche zur Einleitung des Fahrtvorganges notwendig sind, lassen die Latenzzeiten von Fahrzeugtyp zu Fahrzeugtyp differieren [48]. Die Latenzzeiten variieren zudem infolge der Art der Teilprozesse und von deren gegenseitiger Abhängigkeit je nach Abfertigungssystem und technischer Ausrüstung des Kurses:

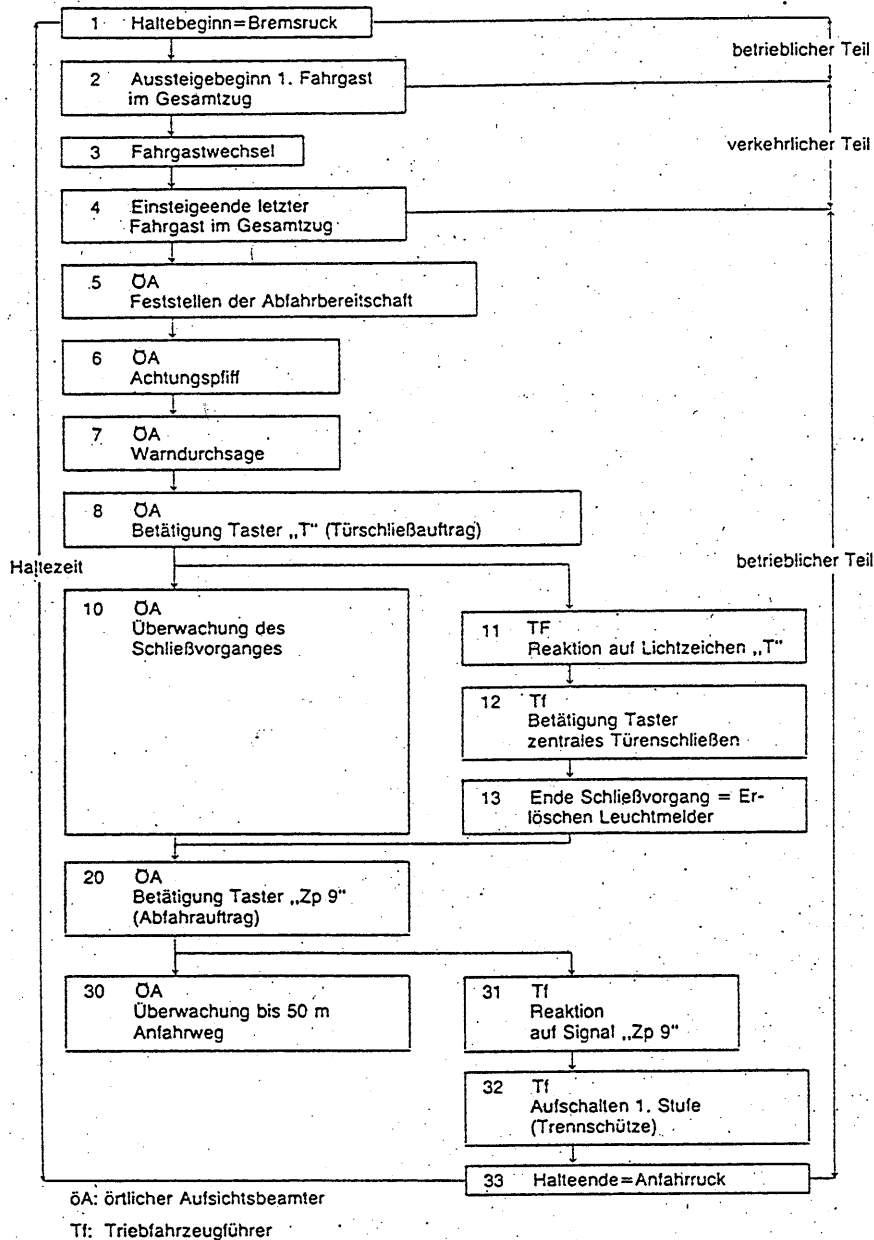


Bild XII/5: Ablaufstudie für Abfertigung durch örtliche Aufsichtsbeamte.

Abb. 3-105: Ablaufstudie für die Abfertigung von S-Bahnen mit Abfertigung durch örtliche Aufsichtsbeamte [133].

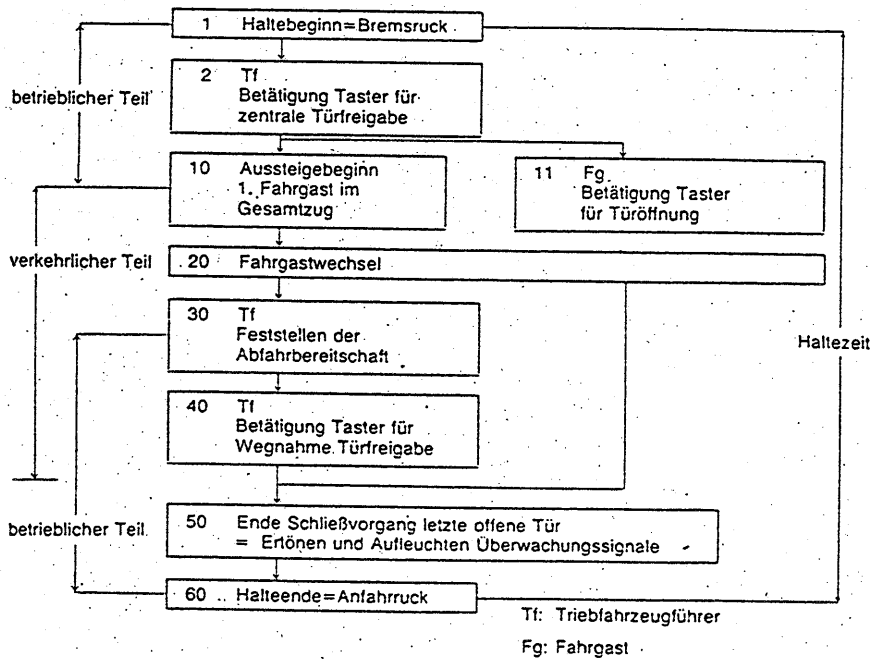


Abb. 3-106: Ablaufstudie für die Abfertigung von S-Bahnen mit Selbstabfertigung [133].

3.42.22 Reaktionszeiten des Fahrpersonals

Die Reaktionszeit des Fahrpersonals spielt eine Rolle bei der Freigabe der Türen, beim Schliessen der Türen nach Beendigung des Fahrgastwechsels sowie beim Einschalten des Fahrzeuges nach dem Schliessen aller Türen. Die erste Reaktionszeit tritt nicht auf, wenn die Türen vor dem Stillstand des Kurses zur Öffnung freigegeben werden können. Werden die Türen vor Beendigung des Fahrgastwechsels verriegelt, so schliessen sie unmittelbar nach Ablauf der Mindestoffenzeit und die Reaktionszeit entfällt ebenfalls. Die dritte Reaktionszeit wird eliminiert, wenn das Fahrzeug bereits vor Ablauf des Schliessvorganges eingeschaltet werden kann. Der Fahrstrom müsste dabei durch die Rückmeldung der Türschliessung freigegeben werden. Die Elimination der ersten zwei Reaktionszeiten ist üblich, jene der dritten hingegen nicht.

3.42.23 Reaktionszeiten der Fahrgäste

Unter der Reaktionszeit der Fahrgäste wird die gesamte Zeit von der Türfreigabe bis zum Beginn des Fahrgastwechsels, allenfalls unter Abzug der Türöffnungszeit, verstanden. Handelt es sich um aussteigewillige Fahrgäste, so wird die mittlere Reaktionszeit klein bleiben, da sich diese Fahrgäste zumeist bereits in der Umgebung der Türe aufhalten. Bei einsteigenden Fahrgästen, welche öfters auf dem Perron eine Wegstrecke zur Fahrzeugtüre zurücklegen müssen, ist die Reaktionszeit grösser. Die Reaktionszeit der Fahrgäste lässt sich durch eine Zwangsöffnungseinrichtung und durch die Speicherung des Haltewunsches reduzieren, da dadurch das Drücken des Türöffnungsknopfes entfällt. Halтанforderungstasten im Fahrgastraum mit ihrem grossen Abstand zu den Türen bergen dagegen die Gefahr in sich, dass sich die Fahrgäste erst spät von den Sitzen erheben und sich der Fahrgastwechsel dadurch verzögert.

3.42.24 Reaktionszeiten der Fahrzeugsteuerung

Ein massgeblicher Zeitverlust durch Steuervorgänge kann zwischen dem Einschalten des Fahrzeuges und dem Anfahrdruck auftreten. Dieser Zeitanteil hat die Tendenz, bei elektronischen Fahrzeugsteuerungen grösser zu sein als bei Direktkontroller- und Hüpfsteuerungen. Es ist auch hier denkbar, dass dieser Zeitanteil durch die Aktivierung der Fahrzeugsteuerung vor dem Schliessen der Türen beseitigt wird, sodass sich das Fahrzeug unmittelbar nach Meldung der Türschliessung in Bewegung setzt.

3.42.25 Türöffnungszeit, Türschliesszeit

Die Türöffnungs- und -schliesszeit wird bestimmt durch folgende Beziehung:

$$(3-21) \quad t_{T,\text{tot}} = \frac{B_T}{n_T \cdot v_T} + t_S + t_T$$

wobei	n_T	Zahl der Türflügel [-]
	B_T	gesamte Breite der Türe [m]
	v_T	Bewegungsgeschwindigkeit der Türflügel [m/s]
	t_S	zusätzliche Zeitanteile für das Ein- und Ausschwenken bei Schwenkschiebetüren [s]
	t_T	zusätzliche Zeitanteile für das Ein- und Ausklappen von Treppen oder Trittbrettern, sofern dies nicht simultan mit der Türbewegung erfolgt [s]

Die Bewegungsgeschwindigkeit v_T der Türflügel wird limitiert durch:

- Die erforderlichen Beschleunigungs- und Bremskräfte müssen von den Antrieben erzeugt und von der Lagerung aufgenommen werden können.
- Die kinetische Energie der Türe darf nicht so gross sein, dass Menschen oder Gegenstände verletzt oder beschädigt werden, bevor ein Klemmschutz wirksam wird.

Die Türsysteme lassen sich danach unterteilen, in welcher Weise sich der Türflügel bewegt [105]:

- Drehen: Drehflügeltüre, Innenschwingtüre
- Falten: Falлтüre, Drehfalttüre
- Schieben: Schiebetüre, Schwenkschiebetüre, Aussenschwingtüre

Sehr kleine Zeiten werden bei elektrisch angetriebenen Falлтüren erreicht, während grosse Schwenkschiebetüren einen beträchtlichen Zeitaufwand erfordern. Falлтüren und Schwenkschiebetüren erfordern gemäss [251] zwischen 1.2 und 1.8 Sekunden. Sind zusätzlich Klapp- oder Schwenktrittstufen vorhanden, so steigt demnach der Zeitbedarf beim Öffnen auf 3.5 s und beim Schliessen auf 4.0 s. Die Türschliesszeiten von 3.0 bis 7.0 s, die [48] nennt, liegen wesentlich über obigen Werten, ebenso die je 4.0 s für das Öffnen und Schliessen der Basler Verkehrsbetriebe. Für zwei unterschiedliche Fahrzeugtypen in Zürich hat [34] Türöffnungszeiten von 2.2 beziehungsweise 1.4 s (druckluftbetrieben/elektrisch) und Türschliesszeiten von 2.0 beziehungsweise 1.0 s ermittelt. Einige Beispiele für die Türbewegungsgeschwindigkeit sind ([34], eigene Messungen):

•	Doppelstockwagen SBB	$v_T = 0.16 \text{ m/s}$	Schwenkschiebetür	[207]
•	Niederflurstrassenbahn Grenoble	$v_T = 0.20 \text{ m/s}$	Schwenkschiebetür	[557]
•	Gelenktram Serie 1601 ff. Zürich	$v_T = 0.29 \text{ m/s}$	Falttüre	[34]
•	Niederflurstrassenbahn Genf	$v_T = 0.36 \text{ m/s}$	Falttüre	[557]
•	Gelenktram Serie 2001 ff. Zürich	$v_T = 0.53 \text{ m/s}$	Falttüre	[34]

Überschlägig kann bei Falttüren mit 0.4 m/s und bei Schwenkschiebetüren mit 0.2 m/s gerechnet werden.

3.42.26 Mindestoffenzeit

Die Mindestoffenzeit stellt sicher, dass sich eine Türe nicht unmittelbar nach dem Durchqueren des Türquerschnittes durch einen Fahrgast und vor dem nachfolgenden Fahrgast schliesst. Die Länge der Mindestoffenzeit ist demnach von der Zeitlücke zwischen zwei Fahrgästen sowie von deren Streuung abhängig. Hohe Mindestoffenzeiten erfordern Treppeneinstiege, da ausgeprägte Spitzenwerte bei gehbehinderten Fahrgästen zu erwarten sind. Bei ebenerdigen Einstiegen kann sie hingegen gesenkt und eine Zwangsschliessvorrichtung vorgesehen werden. Die Zwangsschliessung ist durch den Fahrer zu bedienen und verspricht vor allem im Verspätungsfall Zeitersparnisse. Die Mindestoffenzeit wurde in Wien mit 3.0 s gemessen [251]. [323] hat bei der Strassenbahn Hannover nur rund 2 s, [34] dagegen in Zürich 2.8 bis 3.9 s gefunden. Der VÖV der BRD fordert in seinen Richtlinien 6.22.1 eine Mindestdauer von 1.5 s [525]. Im Mittel ist mit etwa 2.5 s zu rechnen.

3.42.27 Grösse der Latenzzeiten

Aus den nutzbaren Literaturangaben (zusammengestellt in Tab. A3-1) kann eine Latenzzeit I von 2 s, eine Latenzzeit II von 6 s und eine gesamte feste Haltezeit von 8 s abgeleitet werden. Während die Latenzzeit II bei allen Quellen positiv ist, kann die Latenzzeit I negativ werden, wenn die Türen frühzeitig geöffnet werden und der Fahrgastwechsel vor dem Stillstand des Fahrzeuges beginnt. Entsprechende Beobachtungen hat [298] in Stuttgart gemacht. Im weiteren hat er festgestellt, dass ein Anteil von 6.65 bis 8.15 s der Latenzzeit II, welche total 9.15 bis 14.56 s beträgt, auf die Zeit zwischen Türschliessimpuls und Anfahrdruck entfällt. Demnach verstreichen 2.5 bis 6.4 s zwischen dem Ende des Fahrgastwechsels und dem Erteilen des Türschliessimpulses. Noch detaillierter hat sich [113] mit dieser Frage auseinandergesetzt:

Tab. 3-19: Zeitbedarf für die Vorgänge bei der Abfertigung eines S-Bahn-Zuges der DB-BR 420 [113].

	Vorgang	Mittelwert μ (sec)	Verteilungs- funktion (Typ)	Parameter k, s
1	Aussteigebeginn des ersten Fahrgastes im Gesamtzug (Bild 1) . . .	0,98	E	k = 4
2	Einsteigende letzter Fahrgast im Gesamtzug bis Fertigmeldung durch das Zub	5,72	E	k = 2
3	Fertigmeldung durch das Zub bis Betätigung des Schalters f. d. zentrale Türenschließen durch den Tf .	1,65	HP	s = 0,35
4	Betätigung des Schalters f. d. zentrale Türenschließen durch den Tf bis Ende des Schließvorgangs der zentral geschlossenen Türen . . .	2,73	E	k = 4
5	Ende des Schließvorgangs der zentral geschlossenen Türen bis Ende Schließen der durch das Zub freigeschalteten Tür	1,66	HP	s = 0,2
6	Ende des Schließvorgangs der durch das Zub freigeschalteten Tür bis Aufschalten 1. Stufe des Fahrschalters (Trennschütze)	3,67	E	k = 4
7	Aufschalten 1. Stufe des Fahrschalters (Trennschütze) bis Halteende = Anfahruck	1,70	E	k = 2
8	Einsteigende letzter Fahrgast im Gesamtzug bis Halteende = Anfahruck (Bild 2)	14,24	E	k = 11

Im Eisenbahnbetrieb hat [585] die Zeitanteile zwischen dem Fahrgastwechsel und der Abfahrt des Zuges gemessen, wobei er in die Signalfreigabezeit zwischen Freigabe der Zugsfahrt und Abfahrtauftrag sowie in die Reaktionszeit zwischen Abfahrtsauftrag und Anfahruck unterteilt:

Tab. 3-20: Signalfreigabezeiten und Reaktionszeiten im Vollbahnbetrieb [585].

Zeitanteil	Fernzüge A	Fernzüge B	Nahverkehr	alle Züge
Signalfreigabezeit	59.5 s	51.4 s	57.5 s	56.1 s
Reaktionszeit	6.5 s	6.6 s	6.5s	6.5 s

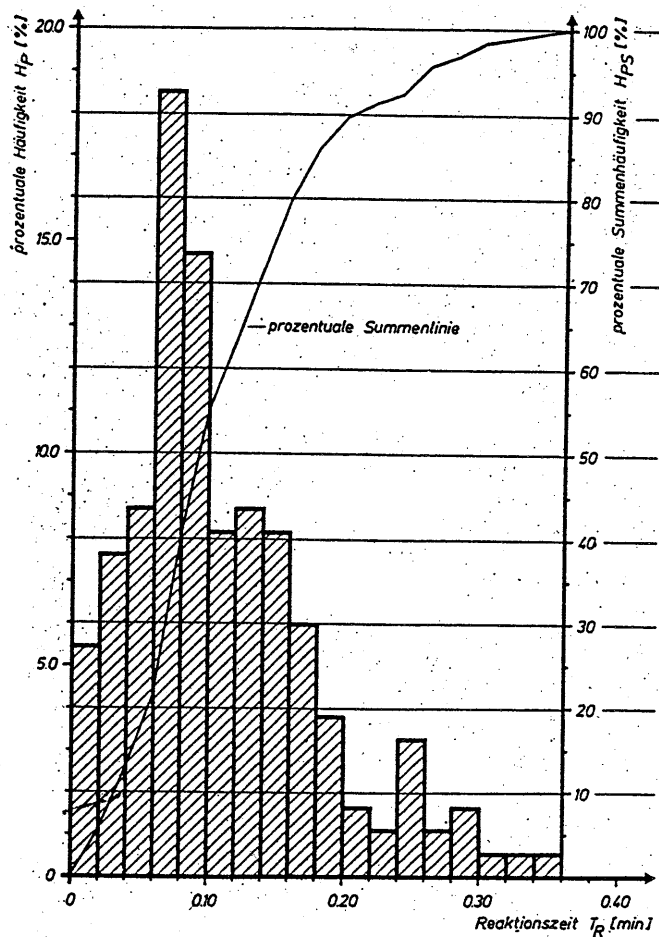
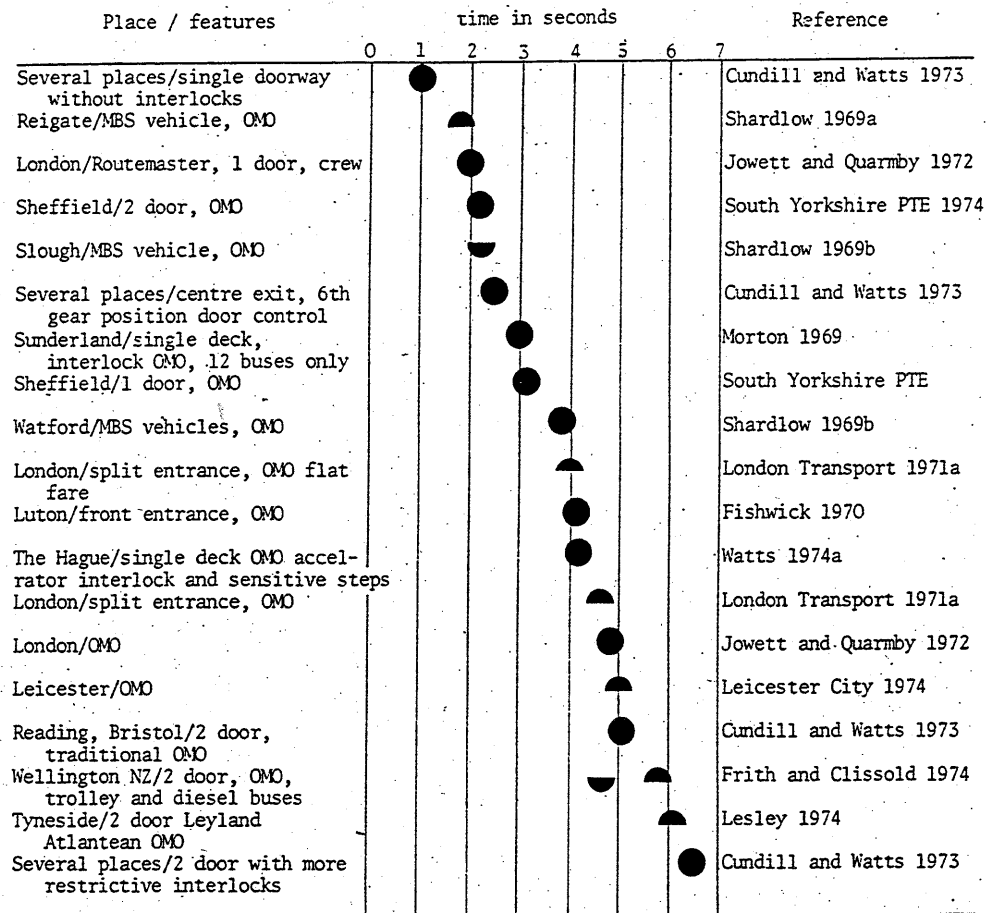


Abb. 3-107: Empirische Verteilung der Reaktionszeit am Beispiel der Fernverkehrszüge B in grossen Personenbahnhöfen der DB [585].

Behr (zitiert in [585]) hat bei seiner Untersuchung im Jahre 1938 für die Zeit zur Erteilung und Aufnahme des Abfertigungsauftrages den höheren Wert von 15.9 s ermittelt. Laut [585] ist dies namentlich darauf zurückzuführen, dass damals Dampfbetrieb vorherrschte und bis zum Anfahren einer Dampflokomotive mehr und zeitaufwendigere Handgriffe vorzunehmen sind. Bei den im Nahverkehr häufigen Abfertigungsvorgängen mit Mindestoffenhaltung der Türe, der darauf folgenden Türschliessung und Infahrtsetzung des Fahrzeuges kann mit folgender Aufteilung der Latenzzeit II gerechnet werden:

- Mindestoffenzeit 2.5 s
- Türschliesszeit 2.0 s
- Reaktionszeiten bis zum Anfahrruck 1.5 s
- Gesamte Latenzzeit II 6.0 s

Durch die Unterschiede im Abfertigungsverfahren können diese Werte je nach Situation stark voneinander abweichen:



Key: ◐ times obtained in peak period studies
 ◑ times for off-peak periods
 ● times for combined or unknown periods

Abb. 3-108: Feste Haltezeitanteile bei Autobussen in verschiedenen britischen Städten mit unterschiedlichen Abfertigungsverfahren. OMO = One-man-operation = Einmannbetrieb [90].

3.42.3 Gesamte Haltezeit

3.42.31 Mittelwerte der Haltezeit

Die starken Schwankungen der Fahrgastwechselzeit, welche von der jeweiligen Fahrgastwechselzahl abhängt, schränken die Aussagekraft eines Mittelwertes für die Haltezeit zwar ein. Es existiert dennoch eine beträchtliche Zahl von Angaben:

Tab. 3-21: Mittelwerte und Extremwerte von Haltezeiten nach Verkehrsmittel ([8], [27], [29], [80], [95], [106], [112], [134], [147], [207], [222], [223], [224], [244], [265], [267], [275], [277], [279], [281], [291], [305], [369], [385], [403], [419], [426], [427], [428], [431], [432], [489], [490], [505], [508], [510], [532], [543], [545], [552], [590]).

Kennwert	Verkehrsmittel			
	S-Bahn	U-Bahn	Tram	Autobus
Mittelwert	29 s	25 s	25 s	24 s
Kleinste Angabe	15 s	10 s	10 s	7 s
Minimum/Mittel	52 %	40 %	40 %	29 %
Grösste Angabe	60 s	47 s	60 s	55 s
Maximum/Mittel	207 %	188 %	240 %	229 %
Anzahl Angaben	16	11	26	19

Die mittleren Haltezeiten aller vier Verkehrsmittel liegen bei etwa 25 bis 30 s. Dies ist plausibel, da vergleichbare Türbelastungen vorliegen und die festen Haltezeitanteile durch ähnliche betriebliche Vorgänge bestimmt werden. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Bemerkung von [552], wonach bei der Londoner U-Bahn in der Spitzenzeit die Haltezeiten nicht unter 30 s gesenkt werden können. Auf einen engen Zusammenhang zwischen der Haltezeit und den Abfertigungsmethoden weist schliesslich [207] hin, welcher im Zürcher S-Bahn-Betrieb einen festen Haltezeitanteil von 32 s gefunden hat. Davon können bis zu 17 s auf die Abfertigung durch den Zugführer zurückgeführt werden.

3.42.32 Streuung der Haltezeit

Zur Streuung der Haltezeiten fanden sich elf Angaben, aus denen sich eine mittlere Standardabweichung bezogen auf das Mittel der Haltezeit von 36 % errechnet ([29], [70], [207], [244], [265], [425], [426], [432], [510], [590]). Verschiedene Untersuchungen zeigen eine linksschiefe Verteilung der Haltezeiten. [418] spricht beispielsweise von einer Chi-Quadrat-Verteilung und [426] für wenig frequentierte Haltestellen von einer Erlang-k-Verteilung. [29] wie auch [426] weisen darauf hin, dass sich die Verteilungsfunktion bei grösseren Haltezeiten einer Normalverteilung annähert. [425] präzisiert, dass bei Standardabweichungen von unter etwa 35 % eine Normalverteilung vorliegt, zwischen 30 und 80 % eine Erlang-Funktion und über 65 bis 80 % eine negative Exponentialverteilung.

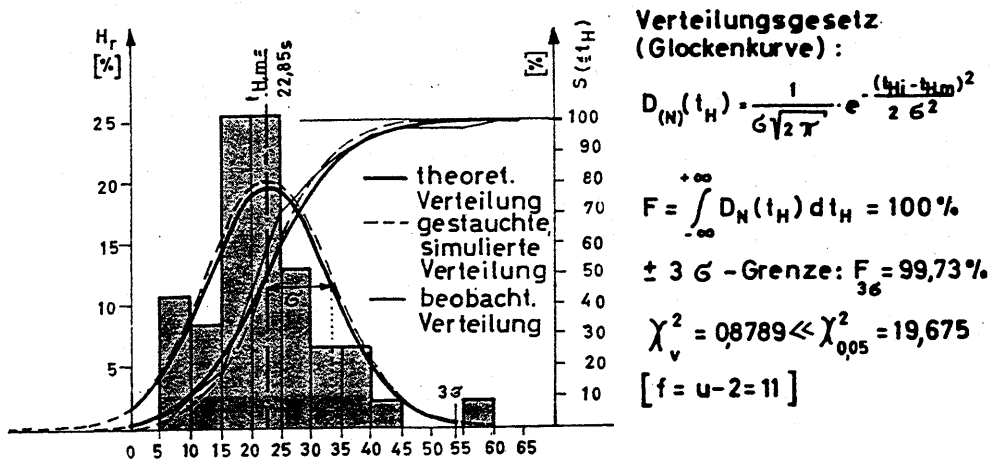


Abb. 3-109: Verteilungskurve der Haltezeiten in Nürnberg und Annäherung durch Normalverteilung [29].

Für die Varianz der Haltezeit in Funktion der Zahl der Ein- und Aussteiger hat [91] am Beispiel von Autobussen in Newcastle gefunden:

$$(3-22) \quad \sigma^2 = 5.1 + 22.5 \cdot F$$

wobei σ Standardabweichung [s]
 F Zahl der Einsteiger [P]

Diese Formel ist nicht allgemeingültig, da sie durch die Verknüpfung der Streuung mit der Fahrgastwechselzahl vom Türsystem und dessen Leistungsfähigkeit abhängt.

3.42.33 Anteil der Haltezeit an der Beförderungszeit

Bei der Quantifizierung des Anteils der Haltezeit an der Beförderungszeit offenbaren sich verschiedene Probleme:

- Die Definition der einzelnen Anteile ist in der Literatur nicht immer klar und deckungsgleich. Dies betrifft namentlich die Verlustzeiten, zu welchen einige Autoren auch die Langsamfahrt infolge von Behinderung zählen, andere wiederum nur den Stillstand des Kurses. In beiden Fällen bleibt zudem ungewiss, ob die Beschleunigungs- und Verzögerungsverluste zu den Fahr- oder Verlustzeiten gezählt werden.
- Die untersuchten Linien werden bezüglich ihrer Parameter wie mittlere Haltestellenabstände, Höchstgeschwindigkeiten und eingesetztes Rollmaterial meist nicht beschrieben.
- Die Art der Abfertigung wird nicht oder nur ungenau angegeben.

Für eine Unterteilung in Fahrzeiten, Haltezeiten und Verlustzeiten liessen sich total 30 Einzelangaben aus dem Nahverkehr beziehen. Davon betrafen deren 14 die Strassenbahn ([69], [70], [118], [304], [327], [373], [376], [427], [428]), 17 den Autobus ([91], [244], [376], [373], [593] und eine die S-Bahn ([298]). Die Analyse der Haltezeiten ergab einen Anteil der Fahrgastwech-

selzeit von 61 % und einen Latenzzeitanteil von 39 % [48], [269], [373]. Der Anteil der Störungen an Lichtsignalanlagen kann bei mittleren Verhältnissen (keine vollständige Bevorzugung) aufgrund von 12 Angaben ([34], [70], [304], [327], [376], [373], [413], [489]) auf 63 % der gesamten Störungsverlustzeiten geschätzt werden. Die übrigen 37 % entfallen auf andere Störquellen, davon etwa ein Drittel auf Behinderungen durch den Individualverkehr und zwei Drittel auf betriebsinterne Störungen [167].

Tab. 3-22: Zeitanteile der Beförderungszeit; gesamte Beförderungszeit = 100 %.

Verkehrsmittel	Fahrzeit	Fahrgastwechselzeit	Fixe Haltezeit	Signalverlustzeit	Übrige Verlustzeit
S-Bahn	81 %	12 %	7 %	0 %	0 %
Strassenbahn	61 %	12 %	7 %	13 %	7 %
Autobus	66 %	10 %	7 %	11 %	6 %
Durchschnitt	64 %	11 %	7 %	11 %	7 %

3.43 Gestörter Betrieb

3.43.1 Abgrenzung und Ursachen

3.43.11 Abgrenzung

Der Linienverkehr unterliegt vielfältigen störenden Einflüssen, welche die Kette der Produktionsabläufe unterbrechen oder aber Annahmen nicht zutreffen lassen, welche der Planung zugrunde gelegt worden waren. Genau genommen ist es dem Fahrer sogar unmöglich, den Fahrplan mit absoluter Exaktheit einzuhalten. Da der Fahrer eine Haltestelle nicht vorplanmässig verlassen sollte und da die Störeinflüsse meist auf die negative Seite wirken, überwiegen die Verspätungen. Im vorliegenden Zusammenhang werden vereinfachend Störungen betrachtet, welche sich auf andere Kurse übertragen, aber eine Kursfolgezeit nicht übersteigen. Die Störungsübertragung auf andere Kurse derselben Strecke kann erfolgen, wenn die Gemeinschaftsstrecke genügend lang ist, denn je grösser der Anteil der Fahrgäste mit freier Wahlmöglichkeit zwischen den Linien ist, desto grösser ist die Ähnlichkeit des Betriebsgeschehens mit jenem einer einzelnen Linie. [65] nennt hierzu untere Grenzwerte von 1000 bis 2000 m im Kernbereich eines Netzes und von 3000 bis 4000 m auf Aussenstrecken, wobei die höheren Werte für schwächer belastete Strecken gelten (20 Kurse pro Stunde), die niedrigeren Werte dagegen für stark belastete Strecken (40 Kurse pro Stunde).

3.43.12 Ursachen

Die Ursachen für grössere Fahrplanabweichungen gruppieren [34]/[67] in unvorhersehbare, zufällige Behinderungen (andere Verkehrsteilnehmer, Verkehrsregelungsanlagen, Fahrzeugstörungen, übermässig lange Türöffnungszeiten), situationsunabhängiges Fahrerverhalten und Verlängerung der Fahrgastwechselzeit nach Initialstörung. [304] spricht von betriebsexternen und betriebsinternen Störungen. Zu ersteren zählt er namentlich die Lichtsignalanlagen und den Links-

abbiegeverkehr. Die betriebsinternen Störungen umfassen eine ungünstige Liniengestaltung (Fahrplanvorgaben, Linienbündelungen und -längen), Störungen an Haltestellen sowie Störungen durch die Fahrzeugkonzeption und den Fahrgastservice. Eine andere Gliederung nimmt Bezug auf die Bewegungsphasen:

- Kurs ist in Bewegung
 - Beschleunigung: Schlechter Schienenzustand, Untermotorisierung beziehungsweise Überlast, schlechte Stromversorgung, verhaltene Fahrweise des Personals
 - Fahrt: Langsamfahrstellen, Behinderungen durch parallele Kolonnen, schlechte Stromversorgung, beschränkte Höchstgeschwindigkeit der eingereihten Fahrzeuge, verhaltene Fahrweise des Personals
 - Bremsen: Schlechter Schienenzustand, geringe Bremsleistung, verhaltene Fahrweise des Personals
- Kurs hält für Fahrgastwechsel
 - Fixe Haltezeitanteile: Überlange Reaktionszeiten des Personals, überlange Reaktionszeiten der Fahrgäste, verzögerte Bewegung der Fahrzeugtüren
 - Variabler Haltezeitanteil: Ungleichmässige Verteilung der Fahrgäste auf die Türen, höhere oder niedrige Fahrgastzahl als angenommen, niedrigere Bewegungsgeschwindigkeit als angenommen.
- Kurs hält infolge einer Behinderung
 - Behinderung an Haltestelle: Lichtsignalanlage, Querverfahren von Strassenfahrzeugen oder anderen Linienfahrzeugen, Blockierung der Wegfahrt durch Vorkurs an Doppelhaltestelle, Fahrzeugdefekt des Kurses
 - Behinderung auf der Strecke: Lichtsignalanlage, Querverkehr, Linksabbieger, Streckenblockierung durch Eigen- oder Fremdkollision, Fahrzeugdefekt des Kurses, Fahrzeugdefekt des Vorläufers

Schwankungen im Fahrgastaufkommen können betriebsintern durch unterschiedliche Taktzeiten der Linien verursacht werden. Die Linie mit dem grösseren Fahrplanintervall hat dabei abwechslungsweise die Fahrgäste von einem oder zwei Anschlusskursen einer häufiger verkehrenden Linie zu übernehmen. Umgekehrt erhalten die Kurse der nach dichtem Fahrplan fahrenden Linien nicht in jedem Fall Anschlussfahrgäste. Dieser Mechanismus hat sich beispielsweise deutlich gezeigt, als in Zürich während einiger Jahre ein gemischter 4-/6-Minuten-Betrieb durchgeführt wurde und dies mit einer ständigen Paketbildung auf der im kurzen Taktintervall verkehrenden Linie verbunden war [166].

Die Erststörung wird als Initialverspätung bezeichnet. Ob eine Störungsübertragung in Gang kommt hängt vom Verhältnis der Initialverspätung zur Kursfolgezeit und den Fahrzeitreserven ab. Die Häufigkeit, mit der ein Kurs auf seiner Fahrt Störungen irgendwelcher Art erleidet, folgt einer Verteilungskurve, welche vom Grad der Bevorzugung des öffentlichen Verkehrs abhängt:

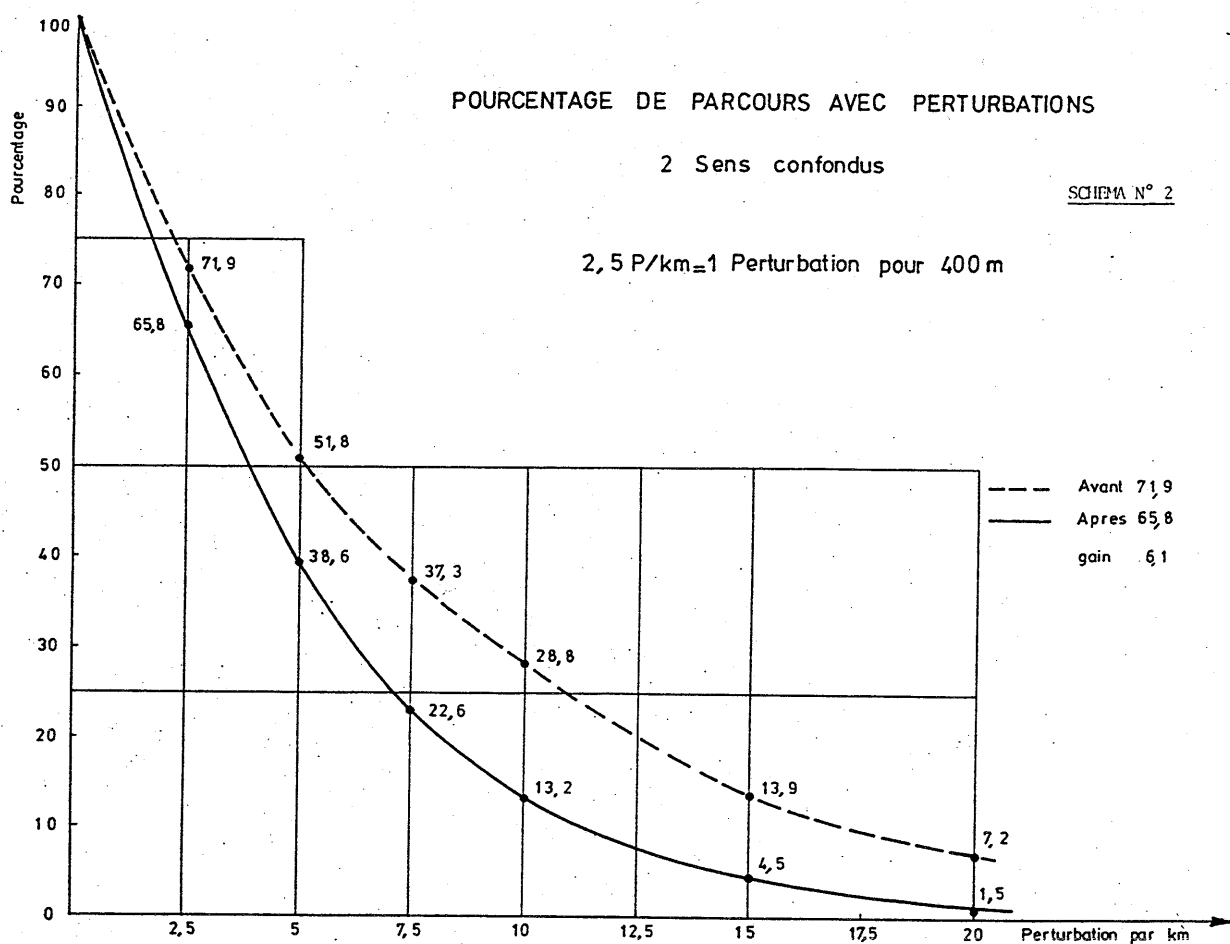


Abb. 3-110: Häufigkeit des Auftretens von Störungen bei Fahrten auf der Linie 195 der Pariser Verkehrsbetriebe zwischen Porte de Châtillon und der Metrostation Châtillon-Montrouge, Abschnitt der RN 306 [142].

3.43.2 Störungsaufschaukelung

3.43.21 Mechanismus und Modellannahmen

Erleidet ein Fahrzeug eine Initialverspätung, so warten bei dichtem Fahrplankontakt an der nächsten Haltestelle mehr Fahrgäste als üblich, wodurch sich die Fahrgastwechselzeit verlängert und der Besetzungsgrad des Fahrzeuges erhöht. Die Verspätung wächst dadurch an dieser und den folgenden Haltestellen an. Der Folgekurs findet weniger Fahrgäste vor als geplant und wird verfrüht. Wirkt dem der Wagenführer nicht durch eine langsamere Fahrweise entgegen, so holt er den vorherigen Kurs ein. Damit vergrößert sich wiederum seine zeitliche Distanz zu dessen Folgekurs. Obschon nicht initial gestört, wird er mit einer höheren Fahrgastzahl konfrontiert und erfährt wiederum eine Folgeverspätung. Der geschilderte Mechanismus wird als Störungsaufschaukelung bezeichnet und führt zur Zusammenballung von Kursen und zu Kurslöchern [34], [291], [293], [356], [552], [553].

Die genaue Abbildung des Störungsaufschaukelungsvorganges mittels mathematischer Beziehungen ist schwierig, da die Zahl der Einflüsse beträchtlich ist. [291] und [552] machen deshalb bei ihrem auch hier verwendeten Modell die folgenden vereinfachenden Annahmen:

1. Es besteht keine Fahrzeitreserve.
2. Die Menge der Einsteiger pro Zeiteinheit ist grösser als der Zulauf in derselben Zeit.
3. Der Fahrgastzufluss an jeder Haltestelle ist konstant.
4. Die Fahrgastwechselzeit ist linear von der Zahl der Einsteiger abhängig.
5. Die Fahrzeit aller Kurse zwischen zwei Haltestellen ist gleich und unabhängig von der Belastung.
6. Die Fahrgastzahlen und Fahrgastwechselzeiten stellen Mittelwerte dar.
7. Es wird nur eine Linie betrachtet.
8. Es werden alle wartenden Fahrgäste befördert.
9. Die Fahrgastwechselzeiten an allen Haltestellen sind im fahrplanmässigen Fall identisch.

Von den Annahmen stellen namentlich 1, 5 und 9 eine starke Vereinfachung der realen Situation dar.

3.43.22 Modell für Kurs mit Initialverspätung

Durch die Identität der einsteigenden Fahrgäste E eines Kurses mit der Zahl F der Fahrgäste, welche bis zum Schliessen der Türe zur Haltestelle gelangen, gilt:

$$(3-23) \quad e = \frac{E}{t_{H,F}}$$

$$(3-24) \quad f = \frac{F}{t_K}$$

$$(3-25) \quad t_{H,F} \cdot e = t_K \cdot f$$

wobei	$t_{H,F}$	Fahrgastwechselzeit an einer Haltestelle im fahrplanmässigen Fall, identisch für alle Haltestellen [s]
	t_K	Kursfolgezeit [s]
	E	Zahl der Einsteiger im fahrplanmässigen Fall [P]
	F	Zahl der zuströmenden Fahrgäste im fahrplanmässigen Fall [P]
	e	Zahl der Einsteiger pro Zeiteinheit [P/s]
	f	Zahl der zuströmenden Fahrgäste pro Zeiteinheit [P/s]

Damit beziehungsweise unter den vorerwähnten Annahmen entwickelt sich die Haltepunktbelastung folgendermassen:

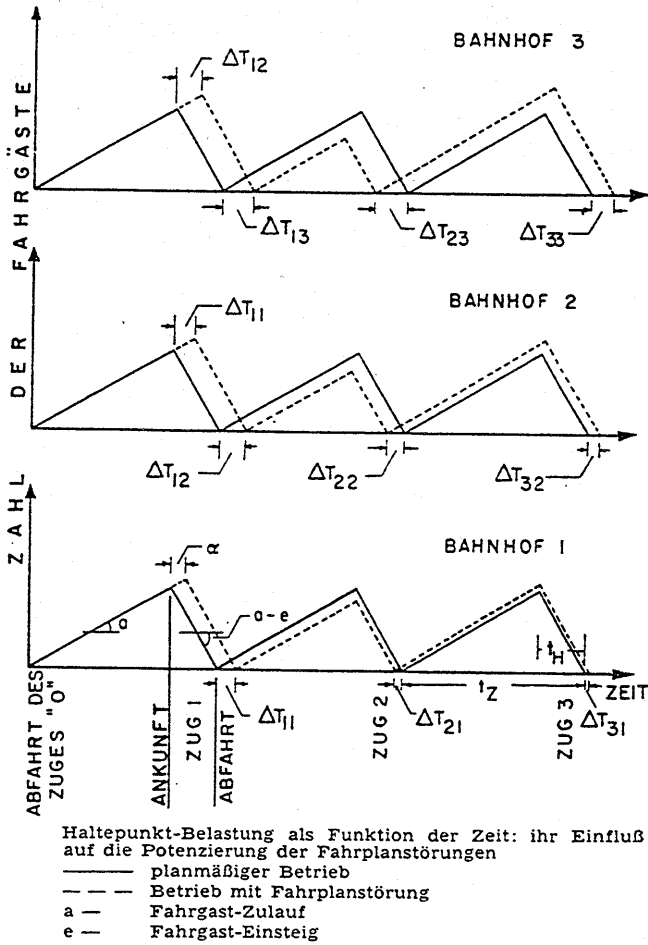


Abb. 3-111: Haltepunktbelastung in Funktion der Zeit und Einfluss auf Störungsaufschaukelung [552].

Die Fahrgastwechselzeit $t_{H,F}$ ist nicht mit der Haltezeit t_H identisch. Der Aufschaukelungsprozess erfasst nur erstere, weshalb im folgenden zwischen der Fahrgastwechselzeit $t_{H,F}$ und der Beförderungszeit ohne Fahrgastwechsel t_{NF} zu unterscheiden ist. Der oben definierte Wert e entspricht der effektiven Türleistungsfähigkeit L' , womit gilt:

$$(3-26) \quad t_{H,F} = \frac{f \cdot t_K}{L'}$$

wobei L' Effektive Leistungsfähigkeit des Türsystems [P/s]

Im Störfall verlängert sich die Zeit, während welcher sich Fahrgäste an der Haltestelle H_1 sammeln, um die Initialstörung $t_{St1/0}$ sowie um den Zuwachs der Fahrgastwechselzeit $\Delta t_{H,F1/1}$:

$$(3-27) \quad F'_{1/1} = f \cdot (t_{NF} + t_{St1/0} + t_{H,F} + \Delta t_{H,F1/1})$$

$$(3-28) \quad E'_{1/1} = L' \cdot (t_{H,F} + \Delta t_{H,F1/1})$$

- wobei
- $F'_{1/1}$ Zahl der zuströmenden Fahrgäste des Kurses 1 an der Haltestelle H1 im Störfall des Kurses K1 [P]
 - $E'_{1/1}$ Zahl der Einsteiger des Kurses K1 an der Haltestelle H1 im Störfall [P]
 - t_{NF} Anteil der Kursfolgezeit ohne Fahrgastwechsel, namentlich Fahrzeit und feste Haltezeitanteile [s]
 - $t_{St1/0}$ Initialstörung des Kurses K1 [s]
 - $\Delta t_{H,F1/1}$ Zuwachs der Fahrgastwechselzeit des Kurses K1 an der Haltestelle H1 durch die Verspätung bei Ankunft an der Haltestelle H1 [s]

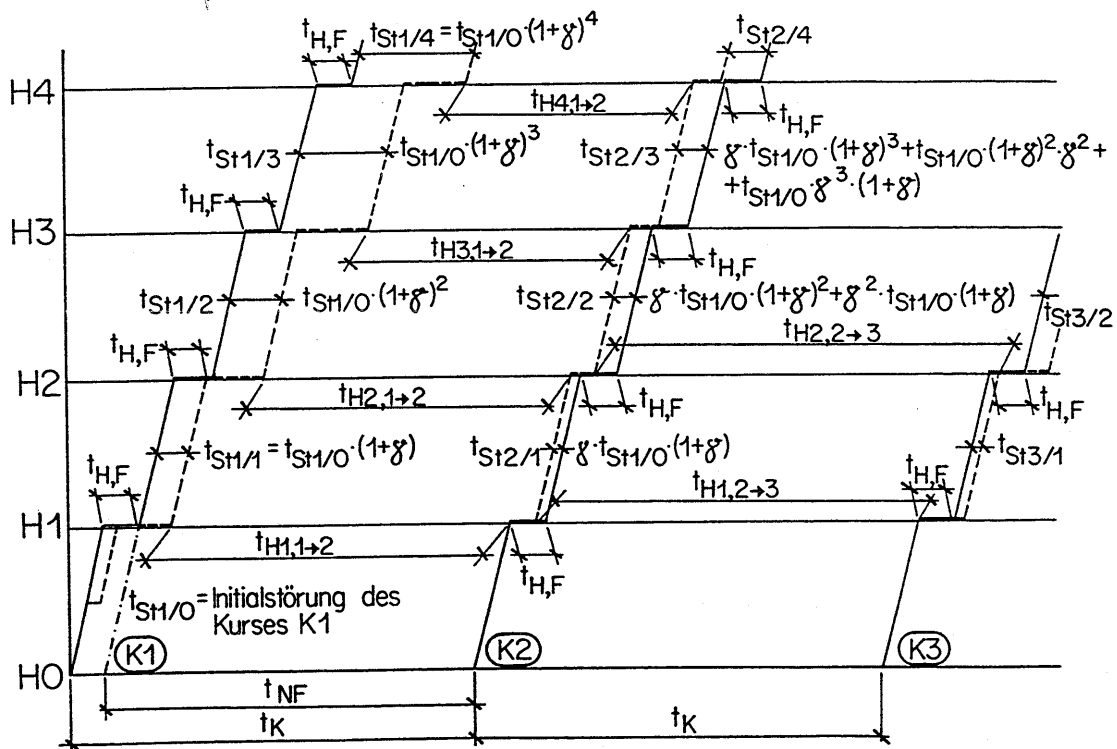


Abb. 3-112: Prinzip der Störungfortpflanzung im Linienbetrieb und massgebende Grössen.

Der fahrplanmässige Haltezeitanteil $t_{H,F}$ und die Zusatzverspätung $\Delta t_{H,F1/1}$ bilden zusammen die Fahrgastwechselzeit im Verspätungsfall $t_{H,F1/1}'$:

$$(3-29) \quad t_{H,F1/1}' = t_{H,F} + \Delta t_{H,F1/1}$$

- wobei $t_{H,F1/1}'$ Fahrgastwechselzeit des Kurses K1 an der Haltestelle H1 im Störfall [s]

Die Verlängerung $\Delta t_{H,F1/1}$ der Fahrgastwechselzeit entspricht dem Verspätungszuwachs nach dem ersten Halt:

$$(3-30) \quad t_{St1/1} = t_{St1/0} + \Delta t_{H,F1/1}$$

wobei $t_{St1/1}$ Verspätung des Kurses K1 bei Verlassen der Haltestelle H1 [s]

Zielgrösse ist somit der Zuwachs der Fahrgastwechselzeit $\Delta t_{H,F1/1}$, der zunächst durch die Grössen f und L' ausgedrückt werden soll. Dazu wird $t_{H,F}$ eliminiert:

$$(3-31) \quad t_{H,F} = \frac{f \cdot t_{NF}}{L' - f}$$

Die Zahl der zuströmenden beziehungsweise einsteigenden Fahrgäste $F'_{1/1}$ und $E'_{1/1}$ wird zu:

$$(3-32) \quad F'_{1/1} = t_{NF} \cdot f + t_{St1/0} \cdot f + \frac{f^2 \cdot t_{NF}}{L' - f} + \Delta t_{H,F1/1} \cdot f$$

$$(3-33) \quad E'_{1/1} = \frac{L' \cdot f \cdot t_{NF}}{L' - f} + \Delta t_{H,F1/1} \cdot L'$$

(3-32) und (3-33) lassen sich gleichsetzen und nach $\Delta t_{H,F1/1}$ auflösen:

$$(3-34) \quad \Delta t_{H,F1/1} = t_{St1/0} \cdot \frac{f}{L' - f}$$

Nun lässt sich mit (3-30) und (3-34) die Störungsgrösse $t_{St1/1}$ ausdrücken:

$$(3-35) \quad t_{St1/1} = t_{St1/0} + t_{St1/0} \cdot \frac{f}{L' - f}$$

Zusammengefasst ergibt dies folgenden Schlussausdruck:

$$(3-36) \quad t_{St1/1} = t_{St1/0} \cdot \left(1 + \frac{f}{L' - f} \right)$$

Unter Nutzung von (3-25) kann (3-36) so umgeformt werden, dass die Störungsvergrößerung mit Hilfe von t_K und $t_{H,F}$ ausgedrückt wird:

$$(3-37) \quad t_{St1/1} = t_{St1/0} \cdot \left(1 + \frac{t_{H,F1/1}}{t_K - t_{H,F1/1}} \right)$$

[291] definiert einen Aufschaukelungsfaktor γ :

$$(3-38) \quad \gamma = \frac{t_{H,F}}{t_K - t_{H,F}} = \frac{f}{L' - f}$$

Damit lassen sich (3-36) und (3-37) vereinfachen zu:

$$(3-39) \quad t_{St1/1} = t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma)$$

An der folgenden Haltestelle H2 trifft der Kurs K1 mit der Verspätung t_{St11} ein, die sich analog zu (3-39) vergrößert:

$$(3-40) \quad t_{St1/2} = t_{St1/1} \cdot (1 + \gamma)$$

wobei $t_{St1/2}$ Verspätung des Kurses K1 nach Verlassen der Haltestelle H2 [s]

Die Verspätung nach der Haltestelle H2 lässt sich mit der Initialverspätung $t_{St1/0}$ beschreiben:

$$(3-41) \quad t_{St1/2} = t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma)^2$$

Bis zur h-ten Haltestelle schliesslich beträgt die Verspätung gegenüber dem Sollfahrplan:

$$(3-42) \quad t_{St1/h} = t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma)^h$$

Kann nicht von identischen fahrplanmässigen Fahrgastwechselzeiten $t_{H,F1/i} = t_{H,F1}$ ausgegangen werden, so muss das Produkt der Aufschaukelungsfaktoren an den einzelnen Haltestellen gebildet werden:

$$(3-43) \quad t_{St1/h} = t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma_1) \cdot (1 + \gamma_2) \cdot \dots \cdot (1 + \gamma_i) \cdot \dots \cdot (1 + \gamma_n)$$

3.43.23 Auswirkungen auf die Folgekurse

Die effektive Zugfolgezeit an der Haltestelle H1 sinkt nach der Initialstörung und vor dem Fahrgastwechsel des ersten Kurses auf $t_K - t_{St1/0}$. Nach dem Fahrgastwechsel des Kurses 1 an der Haltestelle H1, aber vor dem Fahrgastwechsel des Kurses K2 an derselben Haltestelle, beträgt sie noch:

$$(3-44) \quad t_K' = t_K - t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma)$$

wobei t_K' Effektive Kursfolgezeit

Nun trifft der Kurs K2 an der Haltestelle H1 ein. Seit der Wegfahrt des Kurses K1 ist folgender Zeitraum verstrichen:

$$(3-45) \quad t_{H1,1 \rightarrow 2} = t_K - t_{H,F} - t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma)$$

wobei $t_{H1,1 \rightarrow 2}$ Zeit zwischen der Abfahrt des Kurses K1 und der Ankunft des Kurses K2 an der Haltestelle H1 [s]

Die Haltezeit des Kurses K2 beträgt dadurch nicht $t_{H,F}$, sondern $t_{H,F2/1}'$:

$$(3-46) \quad F_{2/1}' = f \cdot (t_K - t_{H,F} - t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma) + t_{H,F2/1}')$$

wobei $F_{2/1}'$ Zahl der Fahrgäste für den Kurs K2 an der Haltestelle H1 im Störfall [P]
 $t_{H,F2/1}'$ Haltezeit des Kurses K2 an der Haltestelle H1 im Störfall [s]

Gleichzeitig gilt auch hier:

$$(3-47) \quad E_{2/1}' = L' \cdot t_{H,F2/1}'$$

Durch Gleichsetzen und Auflösen erhält man für die Fahrgastwechselzeit des Kurses K2:

$$(3-48) \quad t_{H,F2/1}' = \frac{f}{L' - f} \cdot (t_K - t_{H,F} - t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma))$$

Die Verfrühung des Kurses K2 nach der Haltestelle H1 beläuft sich nun auf:

$$(3-49) \quad \Delta t_{H,F2/1} = t_{H,F} - t_{H,F2/1}'$$

wobei $\Delta t_{H,F2/1}$ Haltezeitverkürzung des Kurses K2 an der Haltestelle H1 im Störfall [s]

Daraus und aus (3-38) wird die Verfrühung $t_{St2/1}$ des Kurses K2 nach der Haltestelle H1 zu:

$$(3-50) \quad t_{St2/1} = \gamma \cdot t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma)$$

wobei $t_{St2/1}$ Verfrühung des Kurses K2 nach der Haltestelle H1 [s]

In gleicher Weise lässt sich nunmehr die folgende Haltestelle H2 behandeln:

$$(3-51) \quad F_{2/2}' = f \cdot (t_K - t_{H,F} - t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma)^2 - \gamma \cdot t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma) + t_{H,F2/2}')$$

$$(3-52) \quad t_{St2/2} = \gamma \cdot t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma)^2 + \gamma^2 \cdot t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma)$$

wobei $F_{2/2}'$ Zahl der Fahrgäste für den Kurs K2 an der Haltestelle H2 im Störfall [P]
 $t_{H,F2/2}'$ Haltezeit des Kurses K2 an der Haltestelle H2 im Störfall [s]
 $t_{St2/2}$ Störung des Kurses K2 nach der Haltestelle H2 [s]

Bereits in (3-52) wird erkennbar, dass beim Folgekurs K2 mehrere Störungselemente, nämlich die direkt übertragene Störung des Vorläuferkurses sowie die induzierten Störungen an jeder Haltestelle, hochgeschaukelt werden. Noch besser sichtbar wird dies in (3-53). Diese Formel beschreibt die Verhältnisse nach der dritten Haltestelle (Herleitung analog zu (3-50) und (3-52):

$$(3-53) \quad t_{St2/3} = \gamma \cdot t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma)^3 + \gamma^2 \cdot t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma)^2 + \gamma^3 \cdot t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma)$$

wobei $t_{St2/3}$ Störung des Kurses K2 nach der Haltestelle H3 [s]

Dieser Vorsprung auf den Fahrplan des Kurses K2 an der Haltestelle Hh kann allgemein dargestellt werden:

$$(3-54) \quad t_{St2/h} = t_{St1/0} \cdot \sum_{i=1}^{i=h} \gamma^i \cdot (1 + \gamma)^{h-i+1}$$

wobei $t_{St2/h}$ Vorsprung auf den Fahrplan des Kurses K2 nach Verlassen der Haltestelle Hh [s]

Das Gegenteil widerfährt wiederum dem Folgekurs K3. Er wird durch die vermehrt wartenden Fahrgäste an den Haltestellen verzögert. In dieser Weise überträgt sich ohne Eingriffe die Störung abwechselnd auf sämtliche Folgekurse, welche entweder verfrüht oder verspätet werden. Für den allgemeinen Fall des k-ten Zuges an der h-ten Haltestelle haben [355] eine Beziehung entwickelt, welche von [553] übernommen und vereinfacht wurde:

$$(3-55) \quad t_{Stk/h} = t_{St1/0} \cdot \frac{(k + h - 2)!}{(k - 1)! \cdot (h - 1)!} \cdot (-\gamma)^{k-1} \cdot (1 + \gamma)^h$$

wobei $t_{Stk/h}$ Verspätung oder Vorsprung des k-ten Zuges an der h-ten Haltestelle
 k Nummer des Zuges
 h Nummer der Haltestelle

3.43.24 Auswirkungen auf die Kursfolgezeit

Die effektive Kursfolgezeit zwischen K1 und K2 vermindert sich fortgesetzt an jeder Haltestelle. Mit (3-42) und (3-54) lässt sich die Haltestelle errechnen, an welcher die beiden Kurse aufeinander-

der treffen. Die Summe aus der Verspätung des Kurses K1 und der Verfrühung des Kurses K2 muss identisch sein mit der Kursfolgezeit t_K :

$$(3-56) \quad t_K = t_{St1/0} (1 + \gamma)^h + t_{St1/0} \cdot \sum_{i=1}^{i=h} \gamma^i \cdot (1 + \gamma)^{h-i+1}$$

wobei $t_{H,c}$ Konstante Haltezeitanteile [s], im Mittel etwa 8 s

4 Stand der Erkenntnisse zum Fahrgastwechsel

4.1 Überblick über die Untersuchungen

4.1.1 Einbezogene Literatur und Gliederung des Abschnittes

Die Literaturrecherchen zum Fahrgastwechsel im engeren Sinn erfassten rund 250 Veröffentlichungen, welche sich damit zumindest am Rand auseinandersetzen. Die Arbeiten stammen aus dem deutschen, angelsächsischen und frankophonen Sprachbereich mit Schwerpunkt in der BRD, der ehemaligen DDR und der Schweiz. Die bisherigen Erkenntnisse werden in drei Schritten zusammengefasst:

- Zunächst werden die Einflussfaktoren dargestellt, welche die Fahrgastwechselzeit bestimmen, und zwar getrennt für eine einzelne Türe und für ein ganzes Fahrzeug (Abschnitt 4.2).
- Als zweites wird die Fahrgastwechselzeit an einer einzelnen Türe behandelt und mit deren Eigenschaften sowie den Charakteristiken des jeweiligen Fahrgastwechsellvorgangs in Verbindung gebracht (Abschnitt 4.3).
- Schliesslich wird auf die gesamte Fahrgastwechselzeit eines Kurses an einer bestimmten Haltestelle eingegangen (Abschnitt 4.4).

Um die Lesbarkeit zu erhöhen, werden die detaillierten Angaben und Überlegungen der Autoren nur in Einzelfällen getrennt nach den einzelnen Quellen dargestellt.

4.1.2 Schwerpunkte der bisherigen Arbeiten

Qualitativ erkannt wurde die Bedeutung einer zweckmässigen Gestaltung der Fahrzeuge für günstige Fahrgastwechseleigenschaften bereits im letzten Jahrhundert. Im Jahre 1882 wurden diese Erfahrungen beispielsweise bei der Berliner Stadtbahn mit einer besonders niedrigen Wagenbodenhöhe von nur 770 mm und der Ausgestaltung der Fahrzeuge als Abteilwagen berücksichtigt [101]. In den Zwanzigerjahren wurden Strassenbahnwagen mit abgesenkten, breiten Türen und Mitteleinstieg zur Verkürzung der Haltestellenaufhalte konzipiert. Grundlage dafür bildete weitgehend die praktische Anschauung. Die wohl frühesten quantitativen verkehrs- und betriebsingenieurmässigen Überlegungen zum Nahverkehr stellte Müller 1917 mit seiner Arbeit über die Optimierung der Haltestellenabstände bei Strassenbahnen an, in der er sich Gedanken zu den einzelnen Reisezeitkomponenten machte [342]. Anlass dazu gaben die Sparmassnahmen während des Ersten Weltkrieges, als vielerorts Haltestellen aufgehoben wurden, um Beförderungszeit und Energie zu sparen.

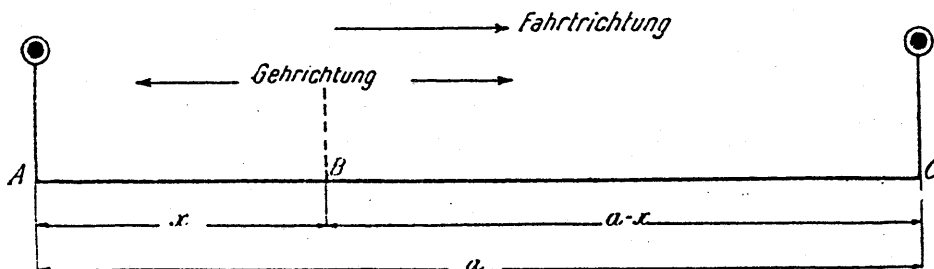


Abb. 4-1: Darstellung zur Ermittlung der optimalen Haltestellenabstände in der Arbeit von Müller 1917 [342].

Erste genauere Untersuchungen zur Berechnung der Haltezeiten wurden nach dem Zweiten Weltkrieg publiziert. Insbesondere hat Reimer in den Jahren 1947 bis 1957 wichtige konzeptionelle Vorstellungen entwickelt, die leider kaum beachtet worden sind und jedenfalls nicht weiterverfolgt wurden. Verstärkt bearbeitet wurde die Frage erst in den Sechzigerjahren mit der vermehrten Anwendung verkehrsingenieurmässiger Denkweisen bei der Betriebsplanung öffentlicher Verkehrsmittel. Nach Beiträgen in den Sechziger- und frühen Siebzigerjahren finden sich aber in den Jahren nach etwa 1975 nur noch spärliche Veröffentlichungen, die die Kenntnisse auf dem Gebiet des Fahrgastwechsels ergänzen. Insgesamt lassen die bisherigen Forschungen folgende Hauptrichtungen erkennen:

1. *Grösse der Fahrgastwechselzeit oder Haltezeit und deren Verteilung:* Fahrgastwechsel- und Haltezeit werden als Zufallsgrössen betrachtet. Weder werden sie mit den verschiedenen Einflussfaktoren in Verbindung gebracht, noch werden die ablaufenden Teilprozesse analysiert. Diese Untersuchungen wurden zur Berechnung von Verkehrsregelungsanlagen des Individualverkehrs, insbesondere von grünen Wellen, durchgeführt, wozu Aussagen über den Erwartungswert und die Streuungsmasse ausreichen. Einen Schwerpunkt dieser Schule bildete die ehemalige DDR in den Siebzigerjahren.
2. *Abhängigkeit der Einsteigezeit von der Art der kommerziellen Abfertigung:* Wird das Billett durch einen Kondukteur an der Fahrzeuggestüre oder durch den Fahrer verkauft, so bestimmt dieser Vorgang oft die Haltezeit. Solange dies üblich war, musste vor allem eine rationelle und betrugssichere Fahrgastabfertigung angestrebt werden. Zu klären war auch, ob der Einmannbetrieb mit seinen längeren Haltezeiten aus der Sicht des Betriebes zu verantworten ist. Besonders intensiv wurde dieser Punkt in Grossbritannien und den USA sowie während der Personalknappheit der Sechzigerjahre in der BRD bearbeitet.
3. *Abhängigkeit der Fahrgastwechselzeit von den Eigenschaften des Türsystems:* Das Interesse für die Abhängigkeiten zwischen der Fahrgastwechselzeit und den Eigenschaften des Türsystems wuchs, als in grösserem Ausmass neue S- und U-Bahnsysteme geplant wurden und als man Strassenbahn und Bus allmählich auf kondukteurlosen Betrieb umstellte. Zudem wurden ab den Siebzigerjahren rechnergesteuerte Betriebsleitsysteme mit Prognosealgorithmen installiert und damit zusammenhängend die Kenntnis der Gesetzmässigkeiten des Linienbetriebes vertieft. Wichtige Beiträge wurden in der BRD während der Sechzigerjahre sowie in der Schweiz während der Siebziger- und frühen Achzigerjahre geleistet.

Für diese Arbeit sind die beiden ersten Hauptrichtungen wenig hilfreich. Sie werden der Vollständigkeit halber gestreift, ohne dass sie Gegenstand weiterer Untersuchungen bilden. Die Grösse der Haltezeit und deren Verteilung wurde bereits in Abschnitt 3 behandelt.

4.2 Einflussgrößen auf die Fahrgastwechselzeit

4.2.1 Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre

4.2.1.1 Übersicht über die Einflüsse

Nur wenige Autoren haben bislang umfassende Überlegungen zu den Faktoren angestellt, welche die Fahrgastwechselzeit an einer Türe bestimmen. Erwähnt werden meist die Zahl der Ein- und Aussteiger, die Einstiegshöhe, die Zahl und Gestaltung der Stufen und die Türbreite ([14], [170], [251], [298], [320], [375], [409], [496], [590]). Kaum beachtet wurde, dass der Besetzungsgrad des Fahrzeuges die Fahrgastwechselzeit nachhaltig erhöhen kann ([165], [170], [298], [590]). Für den Eisenbahnverkehr nennt [14] als wesentliche Einflüsse lediglich die Türbreite, die Stauraumgröße, die Abflussmöglichkeiten und das Verhältnis von Ein- und Aussteigern. Von sekundärer Bedeutung sei gemäss [14] die Perronhöhe. Als zusätzliche Punkte erwähnt [496] am Beispiel von Autobussen die Fahrgastgewohnheiten, die körperlichen Fähigkeiten, die Tagesverkehrszeit und den Abstand des Busses von der Bordsteinkante. Erfolgt die kommerzielle Abfertigung an der Fahrzeugtüre, so bestimmen der Anteil der Barverkäufe und der Informationssuchenden sowie das Abfertungsverfahren die Fahrgastwechselzeit massgeblich ([251], [298], [375], [409], [496], [590]).

Auf die Gestaltung des Fahrzeuges mit den baulichen Eigenschaften der Einstiege, den Wagenabmessungen, der Gliederung des Wageninnern sowie den Abmessungen der Auffangräume legt [251] grossen Wert. Analog weist [409] auf die Bedeutung der Geschwindigkeit hin, mit der sich die Reisenden im Fahrzeug weiterbewegen, was unter anderem mit der Gangbreite und mit den Möglichkeiten zum Unterbringen des Gepäcks zusammenhängt. Verschiedentlich wird die Informationsgüte als zusätzlichen Einflussfaktor auf die Fahrgastwechselzeit angeführt, ohne dass deren genaue Wirkung beschrieben wird (zum Beispiel [375]).

4.2.1.2 Systematik

Jene Autoren, welche die Frage präziser angehen, teilen die Einflüsse in zwei bis fünf Kategorien ein. [251] gliedert in systemspezifische Einflüsse (Gestaltung von Fahrzeug und Perron), betriebsspezifische Einflüsse (Abfertigungssystem, Zugfolgezeiten), verkehrsspezifische Einflüsse (Verkehrsmenge, Verkehrsdichte, örtliche/zeitliche Gegebenheiten) und benützerspezifische Einflüsse (körperlicher Zustand der Reisenden, Einstellung und Reaktionen der Reisenden, psychische Einflussfaktoren). Demgegenüber schlägt [590] die Anzahl Ein- und Aussteiger, die bauliche Gestaltung der Fahrzeuge, die bauliche Gestaltung der Haltestelle, die verkehrlichen Bedingungen und die Gewandtheit der Reisenden vor. Nur Einflüsse des Fahrzeuges und der Reisenden unterscheidet [320] beim Eisenbahnverkehr. [298] nennt für Einzeltüren:

- *Einflussfaktoren verkehrlicher Art*
 - Anzahl Einsteiger
 - Anzahl Aussteiger
 - Verhältnis Einsteiger/Aussteiger
 - Besetzungsgrad im Fahrzeug
 - Zusammensetzung der Fahrgäste (Verkehrszeit, Schüler, Berufstätige, alte Menschen)

- *Einflussfaktoren des Fahrzeuges*
 - Anordnung und Anzahl der Stufen
 - Türbreite
 - Anordnung von Einbauelementen wie Haltegriffe im Türbereich
 - Gestaltung der Fahrzeuginnenräume, speziell der Auffangräume
 - Fahrgastfluss im Fahrzeug
- *Einflussfaktoren der Haltestelle*
 - Bahnsteighöhe im Vergleich zum Fahrzeugboden
 - Bahnsteigbreite
- *Einflussfaktoren betrieblicher Art*
 - Lautsprecherdurchsagen
 - Art des Fahrausweisverkaufes

Während die Fahrgastwechselzahl in dieser Arbeit als bekannt vorausgesetzt und der Einfluss der Art der Abfertigung kurz erwähnt wird, werden die Eigenschaften der Fahrgäste, die Begleitumstände des Fahrgastwechsels sowie die Charakteristiken des Einstiegs schwerpunktmässig betrachtet.

4.21.3 Hinweise auf besondere Einflussgrössen

In einzelnen Arbeiten wird auf verschiedene besondere Faktoren verwiesen. Warten die Reisenden auf der Haltestelle in einer geordneten Kolonne, so verkürzen sich gemäss [409] die Fahrgastwechselzeiten an einer nicht näher definierten Türe von 1.0 s/P bei ungeordnetem Einsteigen auf nur 0.6 s/P. Unterschiede können gemäss [413] die örtlich verschiedene Mentalität und die Gewöhnung an ein bestimmtes Abfertungsverfahren hervorrufen. Auf die psychische Verfassung der Fahrgäste weist auch [251] hin, wobei er das Kriterium nicht präzisiert. Vermutlich handelt es sich namentlich um das Ausmass des Zeitdruckes, unter welchem die Fahrgäste stehen. Nach [170] spielt die Erfahrung der Fahrgäste und ihre Kenntnisse des Verkehrsnetzes eine Rolle. [165] führt bei Luftseilbahnen als Einflussgrösse das Verhalten des Personals ein, da die Fahrgastwechselzeit durch dessen aktives "körperliches und sprachliches Eingreifen" um bis zu 50 % reduziert werden könne. Bei Pneufahrzeugen - namentlich beim Nachläufer von Gelenkbussen - sowie bei Eisenbahnperrons, die in Kurven liegen, müssen die Fahrgäste oftmals grössere Distanzen zwischen der Haltekante und dem untersten Trittbrett überwinden, was den Fahrgastwechsel verzögert [114], [269].

4.22 Einflussgrössen am Türsystem

Üblicherweise besitzt ein Kurs mehrere Türen. Zu den Einflüssen an der Einzeltüre gesellen sich daher weitere Faktoren. [298] verweist auf das Verhältnis zwischen der Zahl der Türen und der Plätze im Fahrzeug hin, also die Beanspruchung des Türsystems beziehungsweise die Fahrgastwechselzahl. Die Bemerkung von [496] bezüglich der Anzahl der Ein- und Aussteiger pro Türe besagt dasselbe, ebenso jene von [170] bezüglich der Türzahl. [251] und [320] erwähnen zusätzlich die Lage der Türen (Mitteleinstiege, Endeinstiege) beziehungsweise die Ungleichförmigkeit des Türsystems, da ein Kurs die Haltestelle erst nach dem Schliessen der letzten Türe verlassen kann und somit die meistbelastete Türe massgebend sei. Ohne ausdrücklich darauf hinzuweisen haben viele Autoren erkannt, dass auch die Fahrgastverteilung auf der Haltestelle die Benutzung der Türen und damit die Fahrgastwechselzeit beeinflusst ([251], [298], [375], [590]).

4.23 Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt

Zu den Einflüssen auf die Summe der Fahrgastwechselzeiten einer ganzen Fahrt fanden sich keine Angaben.

4.3 Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre

4.31 Mittelwerte

4.31.1 Einstiege mit kommerzieller Abfertigung

Die kommerzielle Abfertigung muss sicherstellen, dass jeder Fahrgast spätestens am Ende seiner Fahrt den tarifarischen Fahrpreis entrichtet hat. Ein Abfertungsverfahren hat damit folgenden Anforderungen zu genügen (nach [125]):

- Kein Fahrgast kann das System benützen, ohne den Beförderungstarif zu entrichten -> Kontrolle des Fahrgastes
- Das Inkasso des Fahrpreises erfolgt -> Verkauf, Geldgeschäft
- Der Fahrgast erhält eine Bestätigung für die erworbene Transportleistung -> Ausgabe eines Billettes
- Die missbräuchliche Mehrfachverwendung eines Billettes wird verhindert -> Entwertung

Der Abfertigungsvorgang kann grundsätzlich an einer beliebigen Stelle der Fahrt angeordnet werden. Bei offenen Systemen (Eisenbahn, Stadtbahn, Strassenbahn, Autobus) stehen die Abfertigung beim Einstieg, während der Fahrt oder beim Ausstieg im Vordergrund, während sich in geschlossenen Systemen (U-Bahnen, technisch unkonventionelle Verkehrsmittel) die wenigen und gut kontrollierbaren Zu- und Abgänge anbieten (Bahnsteigsperrn). Als Einzelelemente der Abfertungsverfahren nennt [496]:

- Tarifsysteem
- Ort des Fahrscheinverkaufs
- Zahlungsverkehr (Häufigkeit der Geldrückgabe)
- Fahrausweiskontrolle
- Fahrscheinentwertung
- Entwertertyp und -aufstellungsort

Im Nahverkehr hat sich im Laufe der Jahrzehnte eine Fülle von Abfertigungsarten herausgebildet. Die Unterschiede liegen zum ersten im Grad der Auslagerung der Abfertigungsfunktionen aus dem Fahrzeug und zum zweiten in der Art der Tarifsysteme. Die Abfertigungsart mit Kondukteur, welcher den Fahrgästen im Fahrzeug folgt, entspricht bezüglich Haltezeitberechnung dem Fall ohne Abfertigung im Fahrzeug. Werden die Abfertigungsaufgaben vom Fahrer oder von einem stationären Kondukteur wahrgenommen, so verlangt dies den Fahrgastfluss, welcher erstmals im Jahre 1905 in Montreal beim PAYE-Strassenbahnwagen (Pay-as-you-enter) angewandt wurde. Die Fahrgäste hatten beim Kondukteur auf der hinteren Plattform einzusteigen, der Ausstieg war sowohl hinten als auch vorne möglich. Klarer getrennt wurden die Ströme beim sogenannten Peter-Witt-Wagen mit Doppeleinstieg vorne und Doppelausstieg in der Mitte, wodurch sich eine spürbare Verkürzung der Haltezeit erreichen liess [259].

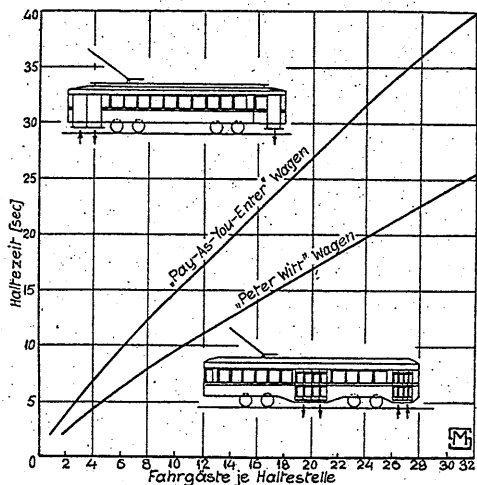


Abb. 4-2: Mittlere Haltezeiten bei PAYE- und Peter-Witt-Wagen in Abhängigkeit von der Fahrgastwechselzahl [259].

Beim Fahrgastfluss sind die Fahrzeurtüren somit nicht freizügig benutzbar. Dieses System bildete die Voraussetzung zur Einführung des Einmannbetriebes in den Zwanzigerjahren. Wird das Geldgeschäft und die Ausgabe der Fahrausweise ausserhalb des Fahrzeuges abgewickelt, so wird dies im folgenden vereinfachend als Vorverkauf bezeichnet, obschon dieser Begriff strenggenommen nur die Abonnemente umfasst. Erfolgt zusätzlich die Entwertung an ortsfeste Automaten, so verbleibt nur noch die Kontrolle im Fahrzeug, was beginnend in den Sechzigerjahren als Sichtwagenbetrieb bezeichnet wurde. Daraus lässt sich folgende Systematik der Abfertigungsarten ableiten:

1. Verkauf der Billette durch Fahrer, Entwertung durch Automaten im Fahrzeug
2. Verkauf und Entwertung des Fahrausweises durch Fahrer im Fahrzeug
 - 2.1 Abfertigung ohne Ausgabe von Billetten
 - 2.2 Billettverkauf und Entwertung durch Fahrer, ohne Rückgeld
 - 2.3 Billettverkauf und Entwertung durch Fahrer, mit Rückgeld
 - 2.4 Verkauf von Billetten mit Umsteigeberechtigung
3. Billetterwerb im Vorverkauf, Entwertung im Fahrzeug durch Fahrer
 - 3.1 Entwertung von Billetten ohne Umsteigeberechtigung
 - 3.2 Entwertung von Billetten mit Umsteigeberechtigung
 - 3.3 Entwertung von Mehrfahrtenkarten
4. Nur Kontrolle der Fahrgäste durch den Fahrer

Oftmals treten im selben Fahrzeug Mischformen auf, beispielsweise wenn Abonnemente im Vorverkauf abgegeben werden, der Einzelbillettverkauf aber durch den Fahrer erfolgt (2 und 4) oder wenn der Fahrer Einzelbillette verkauft und Mehrfahrtenkarten entwertet (2 und 3.3). Der Zeitaufwand für die Abfertigung aller Fahrgäste an einer Haltestelle ist dann abhängig von den Anteilen der Abfertigungsarten. Die Literaturangaben mussten in einigen Fällen aufgrund von Vermutungen einer Kategorie zugeteilt werden. Aus den gut abgestützten Zeitangaben können immerhin etwa folgende Richtwerte gewonnen werden:

•	Einheitstarif, eine Münze, Zahlbüchse	2.9 s/P
•	Einheitstarif, mehrere Münzen, Zahlbüchse	4.0 s/P
•	Verkauf und Entwertung durch Fahrer, Rückgeld	5.9 s/P
•	Verkauf und Entwertung durch Fahrer, Umsteigeberechtigung, Rückgeld	7.6 s/P
•	Vorverkauf von Einzelfahrten, Entwertung durch Automat beim Einstieg	2.6 s/P
•	Vorverkauf von Einzelfahrten, Entwertung durch Fahrer	3.5 s/P
•	Vorverkauf, mit Umsteigeberechtigung, Entwertung durch Fahrer	5.0 s/P

Klar ersichtlich ist der Einfluss der Zahl der Handlungen, welche der Fahrer oder Kondukteur bei der Abfertigung vornehmen muss.

4.31.2 Einstiege ohne kommerzielle Abfertigung

Als Folge der sehr unterschiedlichen Türgestaltung ist die Angabe eines Richtwertes bei Einstiegen ohne kommerzielle Abfertigung nur in Verbindung mit den beiden Haupteinflussgrößen Einstiegsgestaltung - ebener Einstieg oder Treppe - und Türbreite - Zahl der Spuren - sinnvoll. Als eben werden Einstiege mit Niveaudifferenzen von bis zu 0.1 m bezeichnet. Ein-, zwei- und dreispurige Türen sind folgendermassen abgegrenzt:

•	einspurig	lichte Breite bis 1.00 m
•	zweispurig	lichte Breite 1.01 m bis 1.60 m
•	dreispurig	lichte Breite über 1.61 m

Die Grenzwerte entsprechen etwa denjenigen in der Literatur, sind aber bis zu einem gewissen Grad willkürlich. Die Zahl der Spuren beschreibt nämlich, wie sich später zeigt, den Einfluss der Türbreite nur unzulänglich und wird daher lediglich als behelfsmässiges Unterteilungskriterium verwendet. Die auswertbaren Literaturangaben weisen für jede Kategorie eine beträchtliche Bandbreite auf, weshalb die folgenden Mittelwerte nur eine beschränkte Aussagekraft haben:

Tab. 4-1: Durchschnittswerte der Literaturangaben für die mittlere Fahrgastwechselzeit $t_{h, fm}$ und die Türleistungsfähigkeit L von Einstiegen mit und ohne Höhendifferenz.

Zahl der Spuren	Einstiege ohne Höhendifferenz		Einstiege mit Höhendifferenz	
	$t_{h, fm}$	L	$t_{h, fm}$	L
Einspurige Türen	1.2 s/P	0.8 P/s	2.2 s/P	0.5 P/s
Zweispurige Türen	0.9 s/P	1.1 P/s	1.2 s/P	0.8 P/s
Dreispurige Türen	(0.6 s/P)	(1.7 P/s)	(1.0 s/P)	(1.0 P/s)

Die ausgeprägten Streuungen machen deutlich, dass die Einflussfaktoren vielfältiger Natur sind und auch die jeweilige Betriebslage und die Eigenschaften der Fahrgäste berücksichtigt werden müssen.

4.32 Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen

4.32.1 Eigenschaften der Fahrgäste

4.32.11 *Geschlecht*

Die Gesetzmässigkeiten des Fussgängerverkehrs lassen für Männer und Frauen unterschiedliche Fahrgastwechselzeiten erwarten. Untersucht wurde der Punkt aber bisher nicht. Lediglich zur Verteilung der Geschlechter äussern sich [584] und [43]. Im Fernverkehr hat [584] einen Anteil von 56.1 % Männern und 43.9 % Frauen beobachtet. Im Nahverkehr lag der Männeranteil bei den Untersuchungen von [43] in Düsseldorf und Frankfurt mit 59 % beziehungsweise 52 % ebenfalls höher als der Frauenanteil. Trotz grösserem prozentualen Anteil der Frauen an der Gesamtbevölkerung sind diese Befunde plausibel, wenn man die traditionelle Rollenverteilung zwischen Mann und Frau mit stärkerer innerhäuslicher Betätigung der Frau in Betracht zieht. Es ist allerdings davon auszugehen, dass diese bereits eine Generation zurückliegenden Erhebungen durch die Entwicklung der Motorisierung und durch die verstärkte Berufstätigkeit der Frau überholt sind und die Werte zugunsten des Frauenanteils zu korrigieren sind.

4.32.12 *Alter*

Nur drei Untersuchungen streifen die Altersverteilung im öffentlichen Verkehr und deren Einfluss auf die Fahrgastwechselzeit. Leider findet sich mit [42] nur eine einzige Arbeit, welche Aussagen zum Einfluss des Alters auf die Fahrgastwechselzeit macht. Demnach unterscheiden sich die Fahrgastwechselzeiten der Altersgruppen "15 bis 25 Jahre" und "über 55 Jahre" kaum spürbar. Die Interpretation dieses Befundes muss berücksichtigen, dass es sich um Modellversuche ohne Höhendifferenz handelte, woran zudem keine sehr alten Menschen beteiligt waren.

4.32.13 *Grösse*

Zu den Einflüssen der Körpergrösse der Reisenden auf die Fahrgastwechselzeit fanden sich keine Angaben.

4.32.14 *Belastung durch Gepäck*

Eine Angabe über den Einfluss der Gepäckmitnahme auf die Fahrgastwechselzeit findet sich einzig bei [269], der folgende Aussteigezeiten bei Autobussen erhoben hat:

- | | | |
|---|---|---------------|
| • | Sehr wenig Handgepäck und kleine Pakete | 1.5 - 2.5 s/P |
| • | Mittelhoher Gepäckanteil | 2.5 - 4.0 s/P |
| • | Hoher Gepäckanteil | 4.0 - 6.0 s/P |

Der Einfluss der Gepäckmitnahme auf die Fahrgastwechselzeit ist demnach sehr spürbar, indem sich diese bei hohem Gepäckanteil praktisch verdreifacht.

4.32.15 Gewandtheit der Fahrgäste

Grohmann (zitiert in [590]) führt den zusätzlichen Begriff der "Gewandtheit der Fahrgäste" ein, ohne ihn näher zu umschreiben. Er stellt fest, dass sich verkehrsgewandte Fahrgäste um 0.1 bis 0.3 s schneller bewegen als eine gemischte Gruppe und um 0.5 s schneller als gänzlich ungeübte Reisende. Ohne die Basiswerte erhält man jedoch kein Bild von den relativen Unterschieden.

4.32.2 Begleitumstände des Fahrgastwechsels

4.32.21 Verkehrszweck

Untersuchungen zur Abhängigkeit der Fahrgastwechselzeit vom Verkehrszweck existieren nicht. Auf die Tageszeitabhängigkeit der Verkehrszwecke wurde bereits hingewiesen. Wesentlich ist dabei namentlich der Rückgang des Pendlerverkehrsanteils im Laufe des Vormittags, was einer stärkeren Vertretung ungeübter Fahrgäste gegen die Mittagszeit entspricht. Ausgehend vom Verhalten der Fussgänger ist dadurch ein Anstieg der Fahrgastwechselzeit zu erwarten.

4.32.22 Tageszeit

Die aufgrund des Verlaufs der menschlichen Leistungsfähigkeit zu vermutende Abhängigkeit der Fahrgastwechselzeit von der Tageszeit wurde bisher kaum beachtet. Gemäss [269] beziehungsweise [270] hat die Tageszeit keinen Einfluss auf die Fahrgastwechselzeit. Zu anderen Befunden kommen [67] und [103]. [67] weist bei Strassenbahnen ohne kommerzielle Abfertigung für die Nebenverkehrszeiten eine durchschnittlich um 15.4 % längere spezifische Fahrgastwechselzeit aus als für die Spitzenzeiten. Mit einer Verlangsamung des Fahrgastwechsels um 16.5 % kommt [103] auf nahezu dasselbe Ergebnis, wobei sich dieser Wert teilweise auf Einsteigevorgänge mit kommerzieller Abfertigung bezieht.

Auf die Gründe für die Differenz gehen beide Autoren nicht ein. Zu beachten gilt es dabei, dass der Grund für die Tageszeitabhängigkeit nicht nur in der tageszeitlich unterschiedlichen körperlichen Leistungsfähigkeit des Menschen zu suchen ist, sondern auch darin, dass sich die Fahrgastkollektive je nach Tageszeit bezüglich Verkehrszweck, Alter, Gesundheitszustand und Geschlecht unterscheiden. Im Spitzenverkehr sind beispielsweise vorwiegend Pendler unterwegs, welche definitionsgemäss 20 bis 65 Jahre zählen, weitgehend gesund sind und das Verkehrssystem kennen. Diese Faktoren tragen ebenfalls zu einer unterdurchschnittlichen Fahrgastwechselzeit bei.

4.32.23 Witterung/Klima

Zu den Einflüssen der klimatischen Verhältnisse auf die Fahrgastwechselzeit fanden sich keine Angaben.

4.32.24 Besetzungsgrad des Fahrzeuges

Ein hoher Besetzungsgrad des Fahrzeuges führt zur Verlangsamung der Gehgeschwindigkeit der Fahrgäste und zu Rückstauerscheinungen. Die Beschreibung des Phänomens ist allerdings nicht einfach, da die Verlängerung der Fahrgastwechselzeit von folgenden drei Faktoren abhängt:

- Grad der Stehplatzbelegung im Türbereich
- Bauliche Gestaltung des Stauraumes und der Verbindungen zu den übrigen Fahrzeugbereichen
- Anteil des Fahrgastwechsels an der Gesamtzahl der Fahrgäste

[165] beziehungsweise [364] haben dies bei Luftseilbahnkabinen untersucht. Um den optimalen Füllungsgrad für die maximale Streckenkapazität unter Berücksichtigung der vom Füllungsgrad abhängigen Haltezeit zu ermitteln, haben sie ein Füllungsgrad-Haltezeit-Diagramm aufgezeichnet:

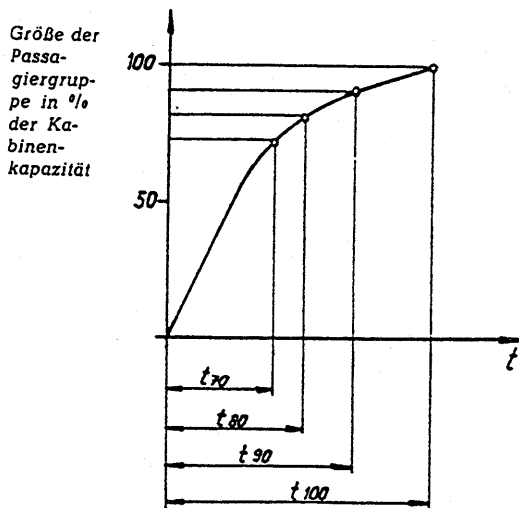


Abb. 4-3: Einsteigeurve einer Seilbahnkabine (rechte Seite des Streckenleistungsdiagramms); die Zeiten t_i gelten für Füllungsgrade von i % [364].

Die Einsteigezeit hängt vom Grad der Kabinenfüllung ab und nimmt pro zusätzlichen Fahrgast progressiv zu. [364] unterscheidet deshalb zwei Phasen des Fahrgastwechsels bei Seilbahnkabinen:

- **Phase 1:** Rasches Einsteigen, da alle Fahrgäste einen Fensterplatz erreichen möchten.
- **Phase 2:** Größere Behinderung oberhalb einer Besetzung von etwa 2/3 der Kabinenkapazität, da die Fahrgäste in der Nähe der Türe bleiben wollen.

Den Verlauf der Einsteigeurve beeinflussen gemäss [364] namentlich die Anordnung der Perons, die Anzahl und Grösse der Kabinentüren, die Zusammensetzung der Fahrgastgruppe (Wanderer, Skifahrer etc.) und das Verhalten des Betriebspersonals. Die maximale Streckenleistungsfähigkeit der Pendelbahn ergibt sich aus der Tangente vom Endpunkt der Fahrzeit (A) an die Füllungskurve. Der Quotient "Personen pro Zeit" entspricht dem Tangens des Winkels der Verbindung zwischen Endpunkt (A) und Füllungskurve und ist offensichtlich am höchsten, wenn die Verbindungsgerade die Füllungskurve nicht schneidet, sondern genau berührt. Es ist daraus erkennbar, dass die Streckenleistungsfähigkeit bei einer Verkürzung der Fahrzeit generell steigt und dass dabei der optimale Füllungsgrad sinkt. Ist die Füllungskurve als mathematische Funktion gegeben, so lässt sich der optimale Punkt auch analytisch berechnen. [165] und [364] geben dafür leider keine Hinweise.

Größe der Passagiergruppe in % der Kabinenkapazität

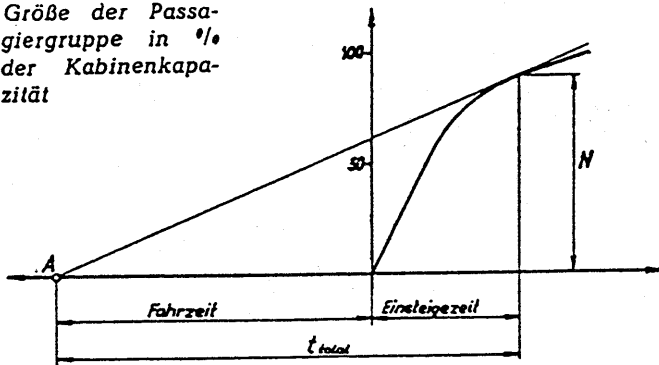


Abb. 4-4: Bestimmung des optimalen Füllungsgrades bei einer Pendelbahn [364].

Kann an einer Seilbahnstation unter bestimmten Umständen das Aussteigen massgebend werden, so muss auch die Aussteige-Kurve eingetragen werden. Die Streckenleistungsfähigkeit ist dann die Tangente an die innere Umhüllende.

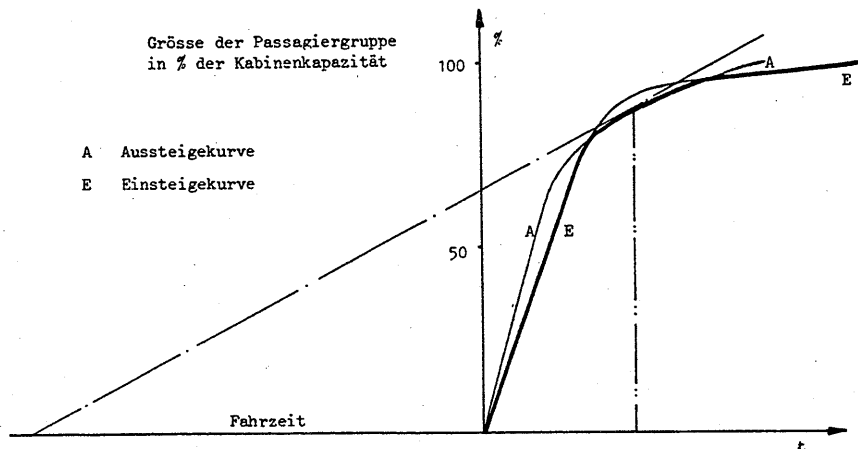


Abb. 4-5: Ermittlung der Streckenleistungsfähigkeit unter Berücksichtigung der Ein- und Aussteigerkurven [165].

Die am Beispiel von Seilbahnkabinen dargestellten Gesetzmässigkeiten gelten grundsätzlich für alle Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs, doch fehlen bisher entsprechende Füllungskurven. Hingegen wurde bereits mehrfach die Verlängerung der Fahrgastwechselzeit bei steigender Stehplatzbelegung untersucht ([33], [34], [124], [134], [251]). [134] hat bei der U-Bahn München Modellversuche durchgeführt, aus welchen ein starker Anstieg der Fahrgastwechselzeit bei Stehplatzbelegungsgraden von über etwa 3 P/m^2 hervorzugehen scheint:

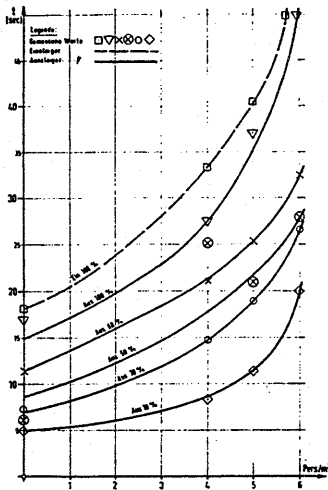


Abb. 4-6: Kurvenschar der Aus- und Einsteigerzeiten bei verschiedenen Besetzungsgraden; bei den Aussteigerzeiten zusätzlich in Abhängigkeit von der Aussteigerquote [134].

In Abbildung 4-6 ist die absolute Zahl der beteiligten Personen bei den einzelnen Kurvenscharen aber nicht identisch, weshalb sich in dieser Darstellungsform die zunehmende Behinderung und der grössere Fahrgastwechsel überlagern. Stellt man den Zeitbedarf pro Person der Anzahl Personen gegenüber und verwendet man die Stehplatzdichte als Parameter, so wird erst der Einfluss der Fahrgastwechselquote erkennbar. Eine massgebliche Verzögerung des Fahrgastwechsels ist mithin nur bei Fahrgastwechselquoten von unter etwa 30 % zu erwarten.

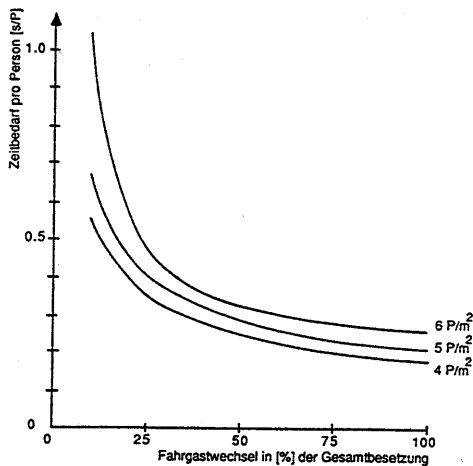


Abb. 4-7: Fahrgastwechselzeit pro Person in Abhängigkeit von der Aussteigerquote und vom Stehplatzbelegungsgrad (Versuche von [134]).

Ähnliche Feststellungen haben [34] und [251] gemacht. [33] hat die Verlängerung der Haltezeit infolge hoher Stehplatzbelegung untersucht. Bemerkenswert an Abbildung 4-8 ist der Unterschied zwischen der Kurve 5 und den übrigen Kurven. Erstere wurde als einzige an einer Endstation mit ausschliesslich aussteigenden Fahrgästen erhoben (Fahrgastwechselquote 100 %). Die Haltezeitverlängerung bleibt weit unter den Werten der übrigen Haltestellen und bestätigt damit [134]:

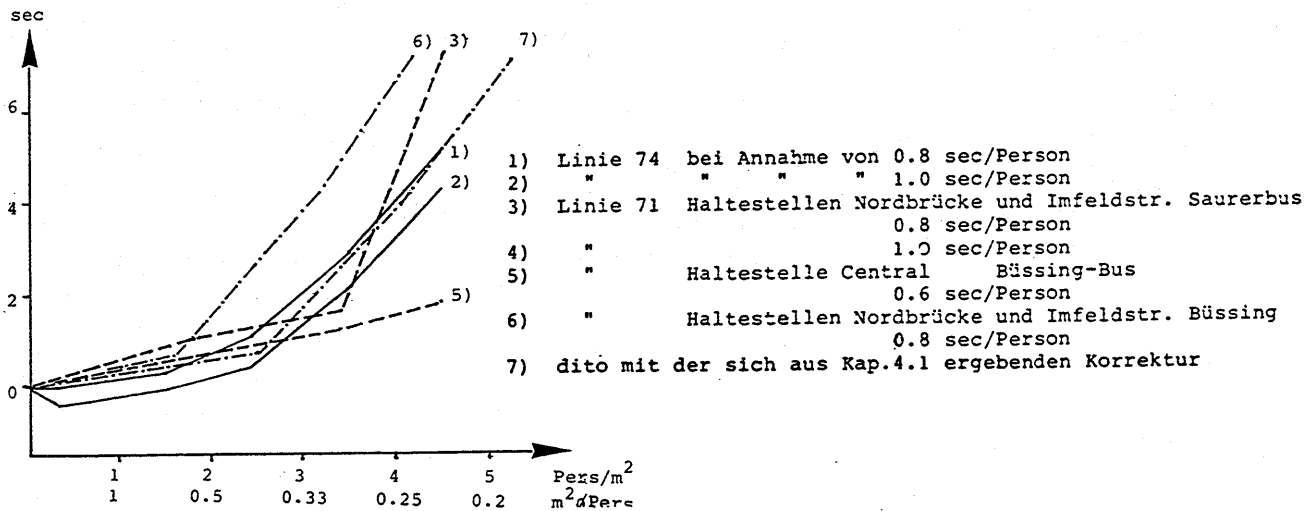


Abb. 4-8: Zusätzliche Haltezeiten infolge steigender Kursauslastung [33].

Die Modellversuche von [124] bekräftigen die bisher gemachten Angaben, wobei sich bei ihm überschlägig folgende Verlängerung der Fahrgastwechselzeit ableiten lässt:

- 1 P/m² + 8 %
- 2 P/m² + 31 %
- 3 P/m² + 80 %
- 4 P/m² + 253 %

Bei den Laborversuchen von Seitz zeigte sich hingegen bei "extremer Besetzung" (keine Nennung des Stehplatzbelegungsgrades) nur eine Verdoppelung der Fahrgastwechselzeit gegenüber einer "schwachen Besetzung". Es ist insgesamt mit einem mässigen bis starken Anstieg der Fahrgastwechselzeit oberhalb einer Stehplatzbelegung von etwa 2 bis 3 P/m² zu rechnen. Die Angaben sind allerdings uneinheitlich. Insbesondere ist dieser Anstieg im Falle eines sich vollständig füllenden oder entleerenden Fahrzeuges wesentlich moderater.

4.32.25 Bewegungsrichtung

Dass die Bewegungsrichtung bei Treppeneinstiegen einen Einfluss auf die Fahrgastwechselzeit hat, ist aufgrund von Abschnitt 3.13.24 zu erwarten. Bei den verwendbaren Quellen zum Fahrgastwechsel ([33], [34], [113], [281], [320], [433], [434], [449], [584], [599]) zeigte sich aber zweierlei:

1. Auch Fahrzeuge mit horizontalen Einstiegen zeigen Geschwindigkeitsunterschiede, wobei das Einsteigen langsamer als das Aussteigen verläuft. Neben der physischen Anstrengung des Treppensteigens müssen auch Rückstauerscheinungen zu einer Verzögerung führen. [32] stellt die Hypothese auf, dass der Unterschied zwischen den Ein- und den Aussteigern mit wachsendem Besetzungsgrad zunimmt.
2. Im Fernverkehr tritt die Erscheinung auf, dass Aussteiger von wartenden Fahrgästen auf dem Perron behindert werden, während das Einsteigen zügig vor sich gehen kann und deshalb schneller ist als das Aussteigen.

Im Durchschnitt aller Beobachtungen und ohne Behinderung auf dem Perron beträgt die Abweichung vom Mittel $\pm 8.7\%$. Werden nur die Einstiege ohne Höhendifferenz betrachtet, so sind es 10.5% , bei den Treppeneinstiegen allein 8.4% . Der Geschwindigkeitsunterschied liegt bei ebenen Einstiegen somit etwas höher als bei Treppen. [433] hat bei ebenerdigem Einstieg sogar eine Differenz von bis zu 21% gefunden. Im Fall der Behinderung der Aussteiger hat [584] bei einer Perronhöhe von 760 mm festgestellt, dass das Aussteigen an Fernverkehrswagen wegen Rückstaus um 15.8% langsamer, das Einsteigen dagegen um denselben Prozentsatz schneller verlief als im Mittel. Ähnliche Angaben für den Fernverkehr macht [320]. Bemerkenswert an den Hinweisen von [320] ist, dass das Aussteigen bei einer Perronhöhe von 760 mm verzögert wird, während beim gleichen Fahrzeug, aber einer Perronhöhe von 380 mm ähnliche Verhältnisse herrschen wie im Nahverkehr. Vermutlich ist bei niedrigen Perrons der Aussteigevorgang durch die Türe zeitkritisch, während bei Hochperrons das Durchqueren der wartenden Einsteiger auf dem Perron den Zeitbedarf bestimmt.

4.32.26 Gegenseitige Behinderung

Treten an einer Türe entgegengesetzte Fahrgastströme auf, so behindern sie sich. Zu den Verhältnissen bei Fahrzeugeinstiegen fanden sich nur drei Angaben. [170] nennt eine mittlere Verlängerung der Fahrgastwechselzeit bei Gegenverkehr um 7% . Bei der BR 470 wurden bis über 14% beobachtet. Beide Werte bewegen sich im Rahmen jener der Fussgängeranlagen ($4\text{ bis }15\%$).

4.32.27 Zahl der beteiligten Fahrgäste

Eine Reihe von Autoren hat eine Abnahme der mittleren Fahrgastwechselzeit pro Person bei hohen Fahrgastwechselzahlen festgestellt. Leider fehlen dafür Erklärungsversuche. Aufgrund eigener Beobachtungen ist davon auszugehen, dass diese rechnerische Beschleunigung vorwiegend durch die bessere Ausnutzung der Türkapazität und weniger durch die Beschleunigung des Gehvorganges selbst zustandekommt. Insbesondere ist der Fahrgaststrom bei höheren Fahrgastwechselzahlen dichter, sodass gemäss dem Fundamentaldiagramm des Fussgängerverkehrs eine grössere Leistungsfähigkeit erzielt wird.

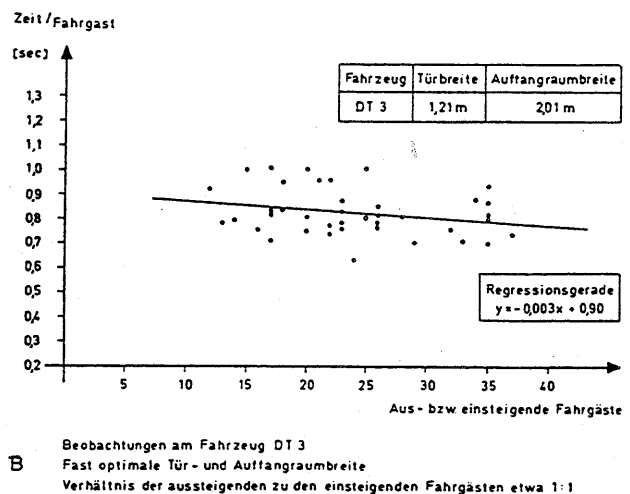
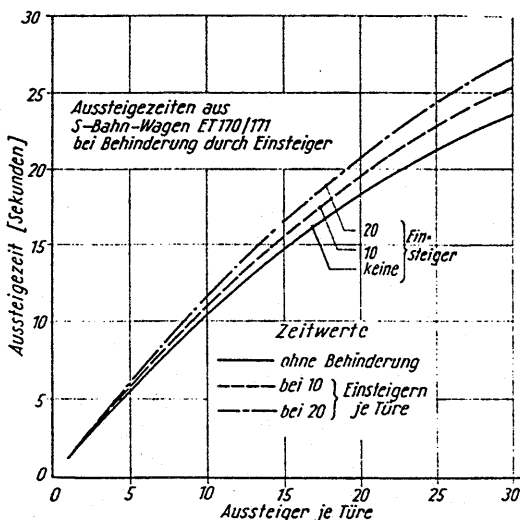


Abb. 4-9: Beschleunigung des Fahrgastwechsels bei grosser Fahrgastwechselzahl. Links: Aussteigezeiten bei der BR 470 DB der Hamburger S-Bahn [26]. Rechts: Triebwagen DT3 der Hamburger U-Bahn mit gemischtem Fahrgastwechsel [433].

Gemäss den 13 Angaben von [26], [433] und [434] sinkt die spezifische Fahrgastwechselzeit bei 20 Personen auf etwa 88 % und bei 40 Personen auf 74 % des Wertes bei zwei Personen. Die vorliegenden Angaben weichen indessen stark voneinander ab. Als Ursache dafür kommen zunächst unterschiedlich ausgeprägte Rückstauerscheinungen in Frage. Zum zweiten ist unklar, ob nicht einzelne Messungen das ganze Fahrzeug umfassten und die gesamte Fahrgastwechselzeit auf die Türen umgerechnet wurde, womit die scheinbare Verkürzung der spezifischen Fahrgastwechselzeit lediglich eine rechnerische Konsequenz aus der besseren Türausnützung darstellen würde. [26] hat bei seinen Messungen an der BR 470 der DB (S-Bahn Hamburg) keine Beschleunigung, sondern eine Verzögerung bei grossen Einsteigermengen beobachtet. Diese Verzögerung führt [26] auf Rückstauerscheinungen im Fahrzeug zurück, die in den anderen Fällen offenbar nicht gegeben waren.

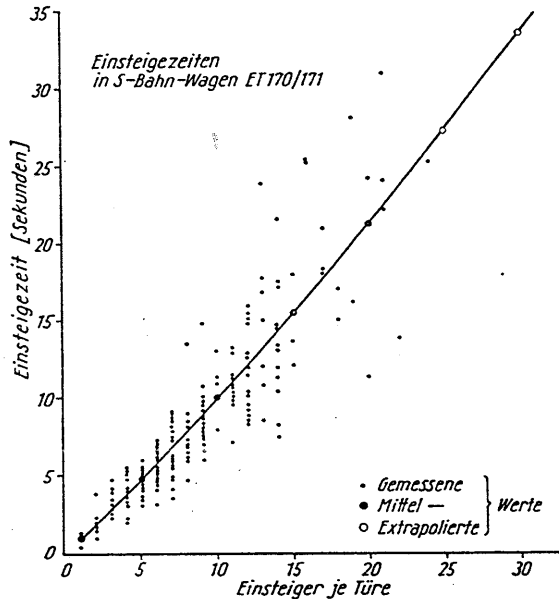


Abb. 4-10: Anstieg der Einsteigerzeiten in Funktion der Fahrgastwechselzahl infolge von Rückstauerscheinungen im Fahrzeug [26].

4.32.3 Charakteristiken des Einstieges

4.32.31 Einstiegsbreite

Die Abschätzung des Einflusses der Türbreite ist traditionell geprägt von der Denkweise in Türspuren. Dies rührt vermutlich daher, dass Treppeneinstiege durch Haltestangen in Spuren von etwa 0.7 m Breite aufgeteilt werden. Ein Teil der Autoren geht implizit davon aus, dass die Leistungsfähigkeit dieser Einstiege in Sprüngen entsprechend der Spurenzahl ansteigt und dass demnach eine Türe mit einer Breite von einem Meter nur die Leistungsfähigkeit einer einspurigen Türe aufweist. Dem widerspricht [26] ausdrücklich. Er weist darauf hin, dass die Fahrgäste bei ein- einhalbspurigen Türen versetzt und mit kleinerer Distanz zueinander einsteigen. Ebenfalls eine direkte Abhängigkeit der Fahrgastwechselzeit von der Türbreite hat [251] festgestellt, indem er bei einer Breitenvariation der Türen zwischen 650 und 680 mm einen Unterschied in der Fahrgastwechselzeit von $\pm 7\%$ beobachtet hat. Dieser Einfluss erscheint bei einer Breitenvariation von nur $\pm 2.3\%$ allerdings als zu hoch.

Die Erkenntnisse von [26] und [251] sprechen indessen gesamthaft dafür, dass die Leistungsfähigkeit der Fahrzeugeinstiege analog zu den Fussgängeranlagen linear von der lichten Breite abhängt. Mit seinen Versuchen am DT3 der Hamburger U-Bahn mit einer Türbreite von 1210 mm hat

[405] sogar gezeigt, dass selbst der Einbau von Spurteilern und damit die Schaffung eindeutiger Fahrgastspuren ohne Einfluss auf die Fahrgastwechselzeit bleibt. Den Beweis für die stufenweise Abhängigkeit der Türleistungsfähigkeit von der Spurenzahl erbringt dagegen kein Autor. Die im Anhang aufgeführten Werte für die Fahrgastwechselzeiten werden deshalb auf die lichte Türbreite bezogen und daraus die spezifische Türleistungsfähigkeit errechnet:

•	einspurig, ebener Einstieg	1.01 P/sm	9 Angaben
•	zweispurig, ebener Einstieg	0.92 P/sm	6 Angaben
•	dreispurig, ebener Einstieg	0.84 P/sm	1 Angabe
•	einspurig, Treppeneinstieg	0.66 P/sm	28 Angaben
•	zweispurig, Treppeneinstieg	0.67 P/sm	34 Angaben
•	dreispurig, Treppeneinstieg	0.75 P/sm	2 Angaben

Berücksichtigt man die heterogene Datenbasis, so liegen die ermittelten spezifischen Leistungsfähigkeiten der beiden Einstiegsarten erstaunlich nahe beieinander. Damit lässt sich als gewichtetes Mittel für ebene Einstiege eine spezifische Türleistungsfähigkeit von 0.97 P/sm und für Treppeneinstiege eine solche von 0.66 P/sm angeben. Die spezifische Leistungsfähigkeit eines Treppeneinstieges ist somit um 32 % tiefer als jene eines ebenen Einstieges beziehungsweise dauert der Fahrgastwechsel bei einer Türe mit Treppe um rund die Hälfte länger.

Die Literaturangaben liefern keine Mittelwerte im strengen Sinn, da sie nicht auf repräsentativen Stichproben beruhen. Systematische Verzerrungen kommen insbesondere daher, dass die Messungen häufig in der Spitzenverkehrszeit bei hohem Verkehrsaufkommen durchgeführt wurden. Wie später zu zeigen ist, werden damit die Türleistungsfähigkeiten nach oben verfälscht. Unberührt von dieser Einschränkung bleibt dagegen das Verhältnis zwischen den Werten für ebene Einstiege und Treppeneinstiege. Es lässt sich zudem mit der Relation zwischen ebenen Fusswegen und Treppen vergleichen. In einem vorangehenden Abschnitt wurde eine maximale spezifische Leistungsfähigkeit von 1.23 P/sm bei ebenen Fussgängeranlagen und von 0.91 P/sm bei Treppen ermittelt, womit letztere um 26 % weniger leistungsfähig ist als ebene Fusswege. Der Leistungsverlust ist etwas weniger ausgeprägt als jener von Fahrzeugeinstiegen, was sich beispielsweise durch die ergonomisch meist ungünstige Treppenkonstruktion bei Fahrzeugen erklären lässt. Weder bei ebenen Einstiegen noch bei Treppeneinstiegen wird die maximale Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen erreicht. Das Verhältnis der beiden Werte beträgt:

•	ebene Einstiege	0.97 P/sm statt 1.23 P/sm oder 78.9 % des Maximalwertes
•	Treppeneinstiege	0.66 P/sm statt 0.91 P/sm oder 72.5 % des Maximalwertes

Gelegentlich wird festgestellt, dass Doppeltüren nicht die doppelte Leistungsfähigkeit von Einfachtüren erreichen [34], [238], [590]. Daraus wird der Schluss gezogen, dass die Türleistungsfähigkeit nicht linear von der Breite abhängt. Der Widerspruch erklärt sich je nach Fall:

- In der Regel ist eine Doppeltüre nicht doppelt so breit wie eine Einfachtüre. Bei Einfachtüren sind Masse von etwa 750 bis 800 mm gebräuchlich, während Doppeltüren etwa 1250 mm oder nur die Hälfte mehr messen. Es ist daher nicht zu erwarten, dass sich deren Leistungsfähigkeit verdoppelt (gilt zum Beispiel für [34]).
- Bei Doppeltüren, welche von zwei unabhängigen Türmechanismen bedient werden, benützen oft alle Fahrgäste die bereits geöffnete Türhälfte, womit nicht die Leistungsfähigkeit des gesamten Türquerschnittes ausgeschöpft wird.

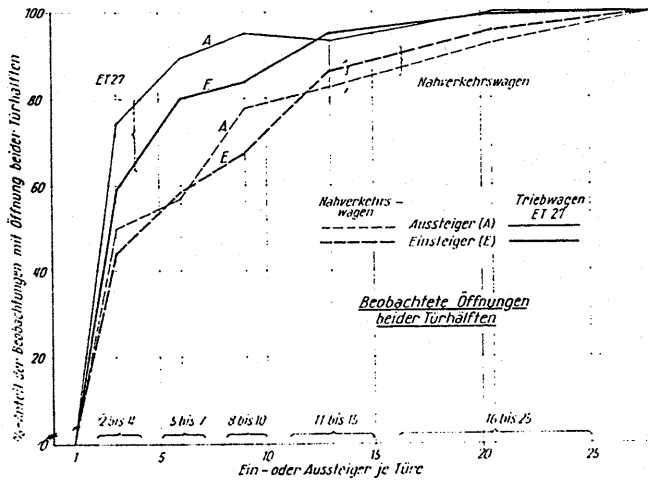


Abb. 4-11: Bereitschaft der Reisenden zum Öffnen beider Türhälften bei Nahverkehrswagen und Triebwagen BR 427 der DB [26].

4.32.32 Einstiegshöhe

Um den Einfluss der Einstiegshöhe auf die Fahrgastwechselzeit direkt beobachten zu können, müsste dasselbe Fahrzeug bei verschiedenen Perronhöhen ausgemessen werden oder es müssten bei verschiedenen Fahrzeugen, welche an unterschiedlich hohen Perrons halten, identische Einstiege gegeben sein. Beides trifft in der Regel nicht zu. Direkt verwertbare Angaben liegen deshalb nur von 12 Autoren vor ([26], [48], [67], [130], [238], [251], [320], [328], [375], [409], [425], [587]). Lediglich vier Autoren versuchen, die Zusammenhänge allgemein zu formulieren, wobei [48], [251] und [587] einen linearen Zusammenhang zwischen Einstiegshöhe und Fahrgastwechselzeit ansetzen. Gemäss [251] gilt beispielsweise bei Strassenbahnen mit Doppeltüren:

$$(4-1) \quad t_{hf,pi} = 1.06s + 1.21 \cdot d_{hi}$$

wobei $t_{hf,pi}$ Mittlere Fahrgastwechselzeit pro Person an einer Türe bei einer Höhendifferenz von d_{hi} [s/P]
 d_{hi} Höhendifferenz i zwischen Perron und Wagenboden [m]

Allgemein formuliert lautet diese Beziehung:

$$(4-2) \quad t_{hf,pi} = t_{hf,ph} + f_h \cdot d_{hi}$$

wobei $t_{hf,ph}$ Mittlere Fahrgastwechselzeit pro Person an einer Türe bei horizontalem Einstieg [s/P]
 f_h Höhenverlustfaktor [s/Pm]

In dieser auf [251] basierenden Formulierung ist f_h unabhängig von $t_{hf,ph}$, sodass für unterschiedlich breite Türen fälschlicherweise die gleiche Änderung der Fahrgastwechselzeit errechnet würde. Der Mangel lässt sich beheben, indem man den Zuschlag f_h auf die Fahrgastwechselzeit bei ebenem Einstieg $t_{hf,ph}$ bezieht und man einen dimensionslosen relativen Höhenverlustzuschlag f_h' einführt:

$$(4-3) \quad f_h' = \frac{f_h}{t_{hf,ph}}$$

wobei f_h' Relativer Höhenverlustzuschlag [-]

Damit wird (4-2) zu:

$$(4-4) \quad t_{hf,pi} = t_{hf,ph} \cdot (1 + f_h' \cdot d_{hi})$$

Lag bei den Literaturangaben ein Wert für die Fahrgastwechselzeit bei horizontalem Einstieg vor, so war $t_{hf,ph}$ bestimmt. Fehlte diese Angabe, so musste eine fiktive Fahrgastwechselzeit bei horizontalem Einstieg aufgrund der Hypothese eines linearen Zusammenhanges zwischen Höhendifferenz und Fahrgastwechselzeit errechnet werden:

$$(4-5) \quad t_{hf,ph} = \frac{t_{hf,p1} - d_{h1} \cdot (t_{hf,p1} - t_{hf,p2})}{d_{h1} - d_{h2}}$$

wobei d_{h1}, d_{h2} Zwei verschiedene Einstiegshöhen >0 [m]
 $t_{hf,p1}$ Fahrgastwechselzeit bei d_{h1} [s/P]
 $t_{hf,p2}$ Fahrgastwechselzeit bei d_{h2} [s/P]

Der lineare Ansatz konnte nun auf alle Literaturangaben angewandt und der Faktor f_h' berechnet werden:

$$(4-6) \quad f_h' [-] = \frac{t_{hf,pi} - t_{hf,ph}}{t_{hf,ph} \cdot d_{hi}}$$

Für die zwölf Quellenangaben ergab sich:

Tab. 4-2: Relativer Höhenverlustzuschlag f_h' verschiedener Fahrzeuge; prozentuale Verlängerung der Fahrgastwechselzeit für einen Meter Höhendifferenz.

Quelle	Fahrzeugspezifikation	f_h'
[26]	Nahverkehrswagen, BR 427, BR 470 der DB	26.8 %/m
[48]	Strassen- und Stadtbahnwagen der BOGESTRA	112.5 %/m
[67]	Strassenbahnfahrzeuge der VBZ Zürich	159.2 %/m
[130]	Fernverkehrswagen der DR	154.9 %/m
[238]	Autobusse Skandinavien	95.8 %/m
[251]	Strassenbahnen, acht Städte BRD sowie Wien	114.2 %/m
[320]	Fernverkehrswagen, Doppelstockwagen der DR	110.3 %/m
[328]	Stadtbahnwagen der Köln-Bonner-Eisenbahn	62.8 %/m
[375]	Strassen- und Stadtbahnwagen der BOGESTRA	76.2 %/m
[409]	Nahverkehr allgemein	33.3 %/m
[425]	Nicht genauer spezifizierte Richtwerte	91.3 %/m
[587]	Ältere elektrische Triebwagen der DB	100.9 %/m

Der Mittelwert der Verlängerung der Fahrgastwechselzeit beträgt rund 95 %/m und die Fahrgastwechselzeit verdoppelt sich entsprechend bei einer Höhendifferenz von 1 m. Für die häufige Höhendifferenz von etwa 0.7 m ergibt sich eine Verlängerung von 67 % oder ein Leistungsverlust von 40 %. Dies ist etwas mehr als in Abschnitt 4.32.31 als Unterschied zwischen ebenen Einstiegen und Treppen genannt. Der einfache lineare Ansatz beschreibt mutmasslich nur einen Teilbereich der Höhendifferenzen und vermag daher nicht zu befriedigen:

- Die aus der Literatur abgeleiteten Werte für f_h' streuen stark. Namentlich scheinen sie eine Funktion des Bereiches zu sein, in welchem sie ermittelt wurden.
- Wird die Fahrgastwechselzeit für grosse Höhendifferenzen extrapoliert, so ergeben sich unrealistische Werte.
- Verschiedene Untersuchungen widersprechen ausdrücklich der Hypothese eines linearen Verlaufes. [238], [298] und [315] stellen praktisch keinen Unterschied fest, ob horizontal eingestiegen werden kann oder ob eine Höhendifferenz von etwa 10 bis 15 cm zu überwinden ist. In der Untersuchung von [34] wird ausgeführt, dass zwischen zwei Strassenbahnfahrzeugen mit drei Trittstufen und Wagenbodenhöhen von 0.83 beziehungsweise 0.91 m kaum ein Unterschied festzustellen ist.

Dies lässt einen unteren und oberen Grenzwert der spezifischen Fahrgastwechselzeit vermuten. Der untere Grenzwert bildet das "horizontale Einsteigen" und entspricht den Verhältnissen beim Engpass einer Fussgängeranlage. Den oberen Grenzwert stellt die "unendliche Treppe" mit der Leistungsfähigkeit einer Fussgängertreppe dar. Dazwischen ist ein S-förmiger Verlauf anzunehmen. Für diese Hypothese spricht indirekt die Untersuchung von [238], welche als einzige keine lineare, sondern eine exponentielle Zunahme der Fahrgastwechselzeit mit wachsender Höhendifferenz postuliert. Der Kurvenverlauf ist allerdings im Bereich der grossen Höhenunterschiede nicht plausibel.

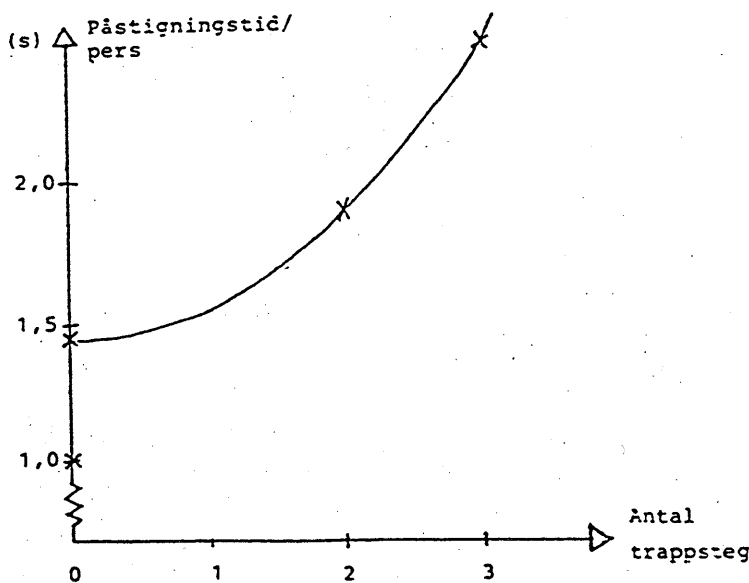


Abb. 4-12: Fahrgastwechselzeit pro Person in Funktion der Stufenzahl [238].

Zur Prüfung der Hypothese wird der Absolutwert des Leistungsverlustes auf die Normbreite von 1m bezogen und mit dem betreffenden Höhenbereich korreliert:

Tab. 4-3: Relativer Leistungsverlust bei wachsender Höhendifferenz.

Quelle	d_{h0} [m] [m]	d_{h1} [m] [m]	d_{dh} [m] [m]	ΔL_s [P/sm ²]	Bemerkungen
[238]	0.00	0.27	0.27	0.26	Autobusse Skandinavien
[375]	0.10	0.46	0.36	0.31	Stadtbahnwagen BRD
[425]	(0.10)	(0.75)	(0.65)	0.78	Allgemeine Angabe, Einfachtür
[425]	(0.10)	(0.75)	(0.65)	0.60	Allgemeine Angabe, 1 1/2-Tür
[238]	0.27	0.54	0.27	0.59	Autobusse Skandinavien
[320]	0.30	0.68	0.38	0.47	Reisezugwagen Bghw der DR
[26]	0.34	0.72	0.38	0.16	Nahverkehrswagen der DB
[26]	0.34	0.72	0.38	0.34	Triebwagen BR 427 der DB
[320]	0.39	0.77	0.38	0.34	Doppelstockwagen DB der DR
[320]	0.39	0.77	0.38	0.13	Doppelstockwagen DGB der DR
[375]	0.46	0.58	0.12	0.42	Stadtbahnwagen BRD
[48]	0.46	0.86	0.40	0.35	Stadtbahnwagen BRD
[320]	0.49	0.87	0.38	0.42	Reisezugwagen Bm der DR
[238]	0.54	0.80	0.26	0.58	Autobusse Skandinavien
[251]	0.55	1.00	0.45	0.47	Strassenbahnen BRD und Wien
[375]	0.58	0.86	0.28	0.25	Stadtbahnwagen BRD
[26]	0.72	0.85	0.13	0.15	Nahverkehrswagen der DB

d_{h0} Kleinere Vergleichshöhendifferenz [m]

d_{h1} Grössere Vergleichshöhendifferenz [m]

d_{dh} Differenz zwischen d_{h0} und d_{h1} [m]

ΔL_s Relativer Verlust an spezifischer Leistungsfähigkeit in Funktion der zu überwindenden Höhendifferenz [P/s·m·m]

Das Mittel der spezifischen Leistungsabnahme ohne den mutmasslich mit Sondereinflüssen zusammenhängenden, ungewöhnlich hohen Wert von [67] beläuft sich auf 0.38 P/s·m·m. Aus der Tabelle lässt sich keine klare Tendenz ablesen. Weder lässt sich die aufgestellte Hypothese bestätigen, noch verwerfen.

4.32.33 Einstiegswinkel und ergonomische Gestaltung

Bereits früher wurde auf die Bedeutung günstiger Stufenverhältnisse bei Treppen hingewiesen. Auch in den Fahrgastwechseluntersuchungen wird dies wiederholt erwähnt, Angaben existieren dazu aber nicht. Die Feststellungen der betreffenden Autoren scheinen mehr auf persönlicher Anschauung denn auf konkreten Versuchen zu beruhen. [251] berichtet, dass eine ungünstige Einstiegsgestaltung den Zeitbedarf um rund 10 % erhöhe, während man bei einer günstigen Gestaltung mit einer Reduktion um denselben Betrag rechnen könne. Leider wird nicht ausgeführt, was unter günstig und ungünstig zu verstehen ist. Die Aussteigezeiten für verschiedene Triebwagentypen der Deutschen Bundesbahn hat [587] untersucht und die grössenmässigen Unterschiede ähnlich beurteilt.

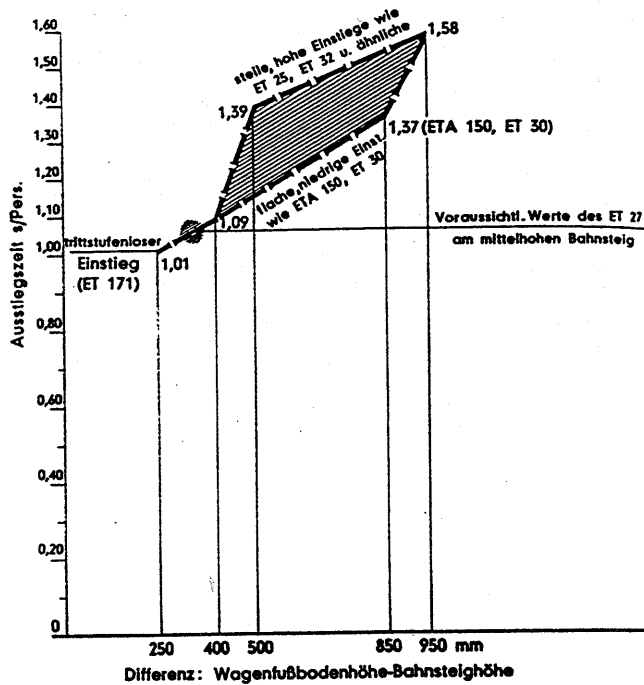


Abb. 4-13: Aussteigezeiten für verschiedene Triebwagentypen der Deutschen Bundesbahn mit verschiedenen Höhendifferenzen und Treppengestaltungen [587].

4.32.34 Spaltbreite zwischen Perron und Fahrzeug

Die an Haltekanten von Autobushaltestellen zu erwartende Spaltbreite hat [114] statistisch aufgearbeitet, ohne allerdings einen Hinweis auf die damit zusammenhängende Änderung der Fahrgastwechselzeit zu machen. Die von ihm genannte mittlere Spaltbreite von 28,3 cm stimmt recht gut mit den 20,1 cm der Vordertür beziehungsweise 23,0 cm der Hintertüre nach [106] überein. Allerdings wird die Spaltbreite an Autobushaltestellen sehr stark von der Haltestellen- beziehungsweise Fahrgeometrie beeinflusst.

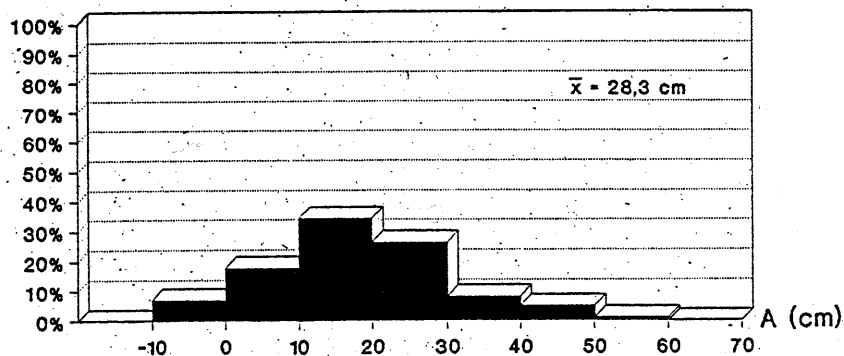


Abb. 4-14: Verteilung der Abstände zwischen Bordstein und hinterer Tür von Autobussen [114].

[405] hat am Beispiel der BR 420 der DB beobachtet, dass sich die Fahrgastwechselzeiten bei grossen Fahrgastwechselzahlen für Spaltbreiten von 110 mm und 175 mm nicht voneinander unterscheiden. Hingegen hat er bei kleinen Fahrgastwechselzahlen eine Verlängerung der Fahrgastwechselzeit infolge grösseren Spaltes um rund 18 % festgestellt. Vorwiegend qualitative

Hinweise liefern die Untersuchungen der SBB mit Spaltbreiten von 65 bis 215 mm [469], [471]. Dabei wurde die Einstiegshöhe und die Spaltbreite gleichzeitig verändert, weshalb ein direkter Zusammenhang nicht herstellbar ist. Zu erkennen ist immerhin, dass eine grosse Spaltbreite von über etwa 200 mm vorwiegend das Aussteigen ungünstig beeinflusst, da die Fahrgäste bei der Benützung der Türe Angstgefühle entwickeln. Das Einsteigen zeigt sich zwar wenig beeinträchtigt. Die Fahrgäste tasten sich aber mit einem Zwischenschritt an den grossen Spalt heran, wodurch der natürliche Bewegungsablauf gestört wird. Generell sehr ungünstige Zeitwerte finden sich bei einer Einstiegshöhe von 190 mm und einer Spaltbreite von 150 mm. Der Einfluss der Spaltbreite muss somit zusammen mit der jeweiligen Einstiegshöhe betrachtet werden. Gemäss [47] schliesslich soll die Spaltbreite unter 50 mm, ausnahmsweise 100 mm, liegen, um Gehbehinderten die Benützung zu erleichtern. Eine Aussage zum Einfluss auf die Fahrgastwechselzeit macht er nicht.

4.32.35 Zustand der Oberfläche

Zum Einfluss des Zustandes der Oberfläche auf die Fahrgastwechselzeit fanden sich keine Angaben.

4.33 Streuung der Fahrgastwechselzeiten

Aufgrund der nach Alter, Gewandtheit, psychischer und physischer Verfassung etc. sehr unterschiedlich zusammengesetzten Fahrgastgruppen sowie der meist ungeordneten Situation in den Fahrzeugen und auf dem Perron sind beträchtliche Schwankungen der Fahrgastwechselzeit zu erwarten. Rein qualitativ weist [298] darauf hin, dass diese Streuung bei S-Bahnen kleiner ist als bei Strassenbahnen und bei diesen wiederum kleiner als bei Autobussen. Dies bestätigt [238], welcher angibt, dass bessere Einstiegsverhältnisse die Streuungen verkleinern, ohne allerdings einen zahlenmässigen Nachweis zu liefern.

Quantitative Angaben zur Streuung sind in der Literatur selten. Für Fahrgastwechselzeiten mit Billettverkauf hat [236] eine Standardabweichung von 44 % des Mittelwertes beobachtet. Sogar 75 % Standardabweichung fand [91] bei den Aussteigezeiten von Autobussen. Wesentlich kleiner dagegen sind mit 18 % die Angaben von Grohmann (zitiert in [590]) für Strassenbahnen und Busse mit Treppeneinstiegen. Ähnlich tief liegen die Streuungen für Einsteiger gemäss [186] mit 26 %, während er bei Aussteigern eine Standardabweichung von 69 % beobachtet hat. Eine einheitliche Tendenz lässt sich aus diesen Angaben nicht erkennen.

4.4 Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse

4.41 Relative Türbelastung

Die relative Türbelastung beziehungsweise die Zahl der Fahrgäste bezogen auf die Türleistungsfähigkeit ist ein direktes Mass für den Vergleich der Fahrgastwechselzeit zweier verschiedener Fahrzeuge. Dennoch werden praktisch keine Angaben dazu gemacht, was vermuten lässt, dass

der Wert dieser Kennzahl noch nicht überall erfasst wurde. Grobe Richtwerte nennt [554] als [Plätze/Türspur]:

- Dreitüriger Bus, Europa 12 : 1
- Doppeltüriger Bus, Europa 20 : 1
- Doppeltüriger Bus, USA 35 : 1 bis 40 : 1
(nur Sitzplätze 25 : 1)

Für die BR 427 der DB hat [587] errechnet, dass 30 bis 40 Fahrgäste beziehungsweise 25 Sitzplätze auf eine Türe entfallen. Da die Türen dieses Fahrzeuges zwei Spuren aufweisen, entspricht dies 15 bis 20 Fahrgästen pro Türspur oder etwa gleich vielen wie bei den von [554] erwähnten europäischen Bussen. Es sind demnach ähnliche Fahrgastwechselzeiten zu erwarten.

4.42 Einfluss der Türzahl

Beobachtungen von [32] für verschiedene Fahrzeugtypen weisen darauf hin, dass die effektiv nutzbare Türleistungsfähigkeit mit steigender Zahl der Türen, aber auch mit zunehmend unregelmässiger verteilten Türleistungsfähigkeiten abnimmt. Die Abhängigkeit von der Zahl der Türen stellt [32] näherungsweise mit folgender Beziehung dar:

$$(4-7) \quad k = \frac{1.7 \Phi}{n}$$

wobei

k	Abminderungsfaktor für die effektive Türleistungsfähigkeit [-]
Φ	$\ln(n) / \ln(2)$
n	Anzahl der Türen mit $n > 1$

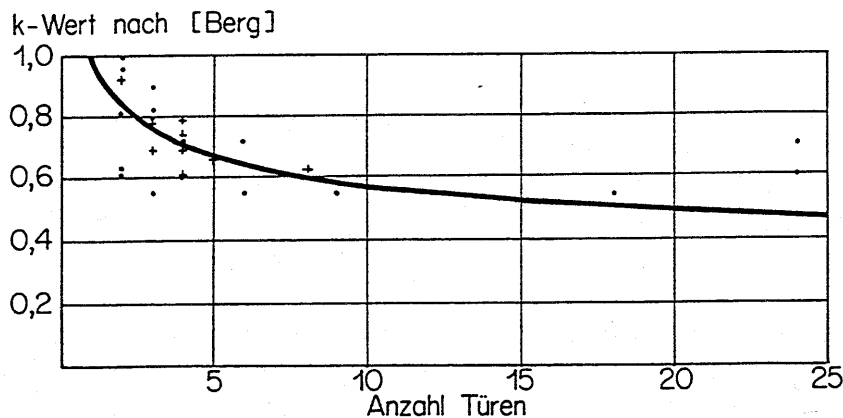


Abb. 4-15: k-Wert der effektiven Türleistungsfähigkeit in Funktion der Zahl der Türen n (nach [32]).

Demnach führt eine Erhöhung der Zahl der Türen bei kleiner Absolutzahl der Türen zum Absinken des Ausnützungsgrades der Türleistungsfähigkeit, wobei die Abminderung nicht den gesamten Leistungsgewinn kompensiert. Bei grossen n wird der zusätzliche Verlust durch weitere Türen vernachlässigbar. Indirekte Anhaltspunkte lassen sich bei [590] gewinnen. Er berücksichtigt die unvollständige Ausnützung der Leistungsfähigkeit bereits bei der Fahrgastwechselzeit pro Person und Türspur, sodass sich die Fahrgastwechselzeit eines Kurses folgendermassen berechnet:

$$(4-8) \quad t_{h,f} = F \cdot \frac{t_s}{S}$$

wobei	$t_{h,f}$	Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses [s]
	F	Fahrgastwechselzahl [P]
	t_s	Mittlere Fahrgastwechselzeit pro Personen und Türspur [s/P]
	S	Anzahl Türspuren, Doppeltüren werden als zwei Türen, anderthalbfache als eine Türe gerechnet

Für verschiedene Fahrzeugtypen der ehemaligen DDR macht [590] folgende Angaben:

- Strassenbahn, Umbaufahrzeug, zweiachsig $t_s = 3.5 \text{ s/P}$
- Strassenbahn, Neubaufahrzeuge, vierachsig $t_s = 4.5 \text{ s/P}$
- Autobus und Trolleybus $t_s = 2.8 \text{ s/P}$
- Schnellbahn, hoher Perron $t_s = 1.7 \text{ s/P}$

Unter der Annahme einer Leistungsfähigkeit von 0.66 P/sm bei Strassenbahn und Bus sowie von 0.97 P/sm bei der Schnellbahn lässt sich eine theoretische Leistungsfähigkeit und daraus die realisierte Leistungsfähigkeit ermitteln. Es ergeben sich Abminderungen auf etwa 71 % bei bis zu vier Türen, 56 % bei 5 bis 8 Türen und von 51 % bei 9 und mehr Türen. Gesamthaft bestätigen sich die Angaben von [32] weitgehend, wonach die Ausnützung der Türleistungsfähigkeit mit steigender Türzahl absinkt.

4.43 Fahrgastverteilung und Ungleichförmigkeit

4.43.1 Verteilung der Fahrgäste auf der Haltestelle

Die Verteilung der Fahrgäste auf der Haltestelle bestimmt massgeblich die Benützung der Türen eines Kurses, da in erster Näherung davon auszugehen ist, dass die Einsteiger die ihnen am nächsten liegende Türe benützen. Die quantitativen Kenntnisse über das Fahrgastverhalten auf Haltestellenperrons sind indessen bescheiden. Qualitative Hinweise liefert [298]. Demnach konzentrieren sich die Fahrgäste bei Einfachhaltestellen auch bei guter Witterung bei den Wartehallen. Bei Doppelhaltestellen ist eine Massierung in der Mitte des Perrons festzustellen, da den Fahrgästen nicht im Voraus angekündigt wird, wo der Kurs ihrer Linie halten wird. Bei einer mittleren Kurslänge von 40 m eines Doppelgelenkzuges und einer Fussgängergeschwindigkeit von 1.5 m/s würde der Weg von der Mitte des einen bis zur nächstliegenden Türe des anderen Kurses immerhin etwa 15 s dauern. Diese Zeitspanne kann bereits dazu führen, dass ein Fahrgast bei seinem Kurs eine geschlossene Türe vorfindet. Als Kriterien für die Wahl des Warteplatzes auf der Haltestelle nennen [298] und [599]:

- Haltestellenzugänge
- Leiteinrichtungen und Markierungen
- Wetterschutzeinrichtungen
- Sitzplatzangebot auf dem Perron
- Ort von Informationseinrichtungen und Billetverkaufsstellen
- erwartetes Sitzplatzangebot beziehungsweise Füllungsgrad des Kurses bei grosser Auslastung
- kurze Wege zu den Abgängen am Aussteigebahnhof bei kleiner Auslastung

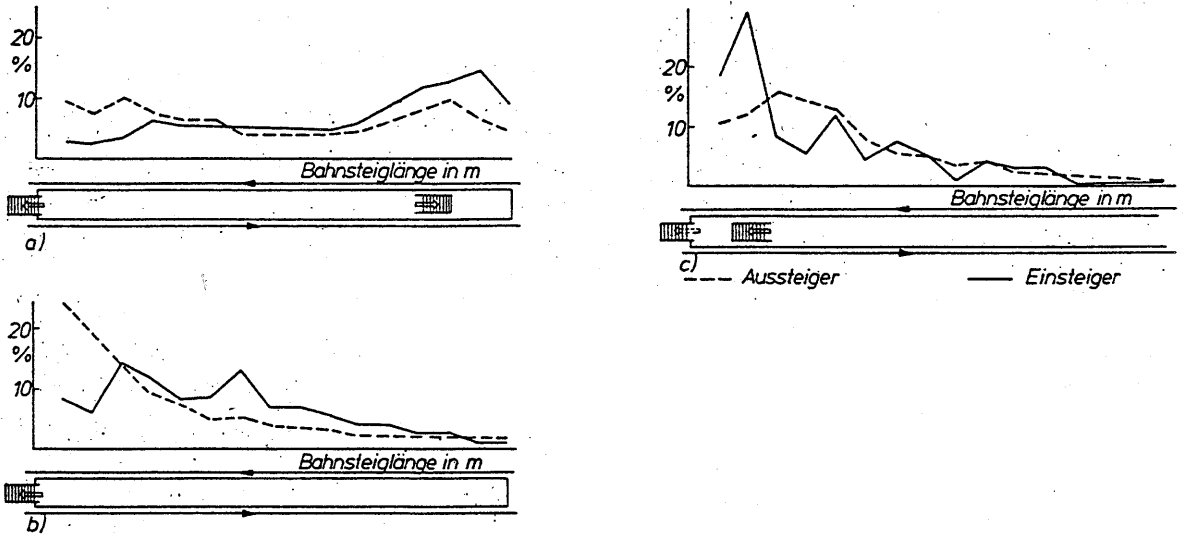


Abb. 4-16: Verteilung der Aus- und Einsteiger auf Perrons der Berliner S-Bahn; a) = Schöneweide Bahnsteig B; b) = Warschauer Strasse Bahnsteig B; c) Jannowitzbrücke Richtung Friedrichstrasse [599].

Einige weitere Fälle hat [251] dargestellt und aus der Verteilung sogenannte Ungleichförmigkeitsgrade Ψ errechnet. Seine Beobachtungen stimmen gut mit den Angaben von [599] überein:

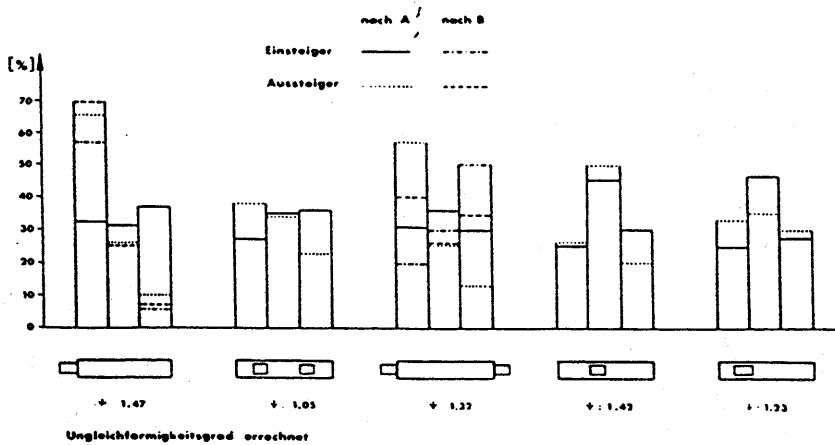


Abb. 4-17: Verteilung der Aus- und Einsteiger auf dem Bahnsteig in Abhängigkeit der Lage der Zu- und Abgänge [251].

Gemäss [599] richten sich 63 % der zusteigenden Fahrgäste bereits bei der Abgangsstation nach der Lage des Ausganges an der Zielhaltestelle. Diese Aussage gilt allerdings nur für geschlossene Schnellbahnsysteme, deren Haltestellen wenige klar definierte Ein- und Ausgänge aufweisen und rechnet zudem damit, dass die Fahrgäste ihre Zielhaltestelle so gut kennen, dass sie den optimalen Aufenthaltsort im Fahrzeug abschätzen können. Die Darstellungen werden gestützt durch [48], wonach die Lage der Zu- und Abgänge für die Verteilung der Fahrgäste die wichtigste Rolle spielt. [481] gibt daher die Empfehlung ab, möglichst keine Zugänge an den Perronenden anzuordnen, um eine gleichmässige Verteilung der Fahrgäste zu erreichen. Bei Systemen, deren Haltestellen den Zugang an jeder Stelle gestatten, ist eine weniger ausgeprägte Gesetzmässigkeit zu erwarten. Untersuchungen zu diesem Punkt liessen sich aber nicht finden.

4.43.2 Verteilung der Einsteiger auf die Türen

Globale Angaben zur Verteilung der Einsteiger auf die Türen macht [425], welcher ein Ungleichförmigkeitsmass von 1.2 für Züge bis 20 m Länge und von 1.7 für Züge über 20 m Länge nennt. [251] definiert das ebenfalls bereits erwähnte Ungleichförmigkeitsmass Ψ für die Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron. Die Fahrgastwechselzeit, welche sich aus der Gleichverteilung der Fahrgäste ergeben würde, wird nun mit diesem Ungleichförmigkeitsmass multipliziert. [251] geht somit davon aus, dass jeder Fahrgast auf dem Perron grundsätzlich die ihm am nächsten liegende Türe benützt, was von [466] bestätigt wird, der entsprechende Beobachtungen im Vorortsbetrieb von Zürich gemacht hat. Nach seiner Angabe ist das Ausweichen auf weniger belastete Türen selten, weil die Fahrgäste das Verpassen des Zuges befürchten. Dieses Verhalten trifft zwar häufig, aber nicht immer zu. [40] beispielsweise erwähnt, dass in Schwachlastzeiten die Fahrgäste sich bereits vor dem Einsteigen durch einen Blick ins Wageninnere den besten Platz aussuchen. Dadurch wird die Haltezeit verlängert. Konkrete Aussagen zu den Gründen für die Wahl der Einstiegstüre bei S-Bahn-Systemen mit definierten Zu- und Abgängen finden sich bei [170]:

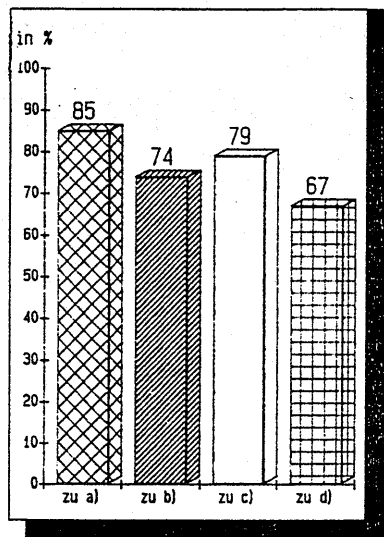
Tab. 4-4: Fahrgastverteilung in S-Bahn-Zügen und Gründe für die Wahl des Einstiegspunktes [170].

Zeile	Verknüpfungspunkt	Lage und Anzahl der Treppen für die Umsteiger am Verknüpfungspunkt 1)	Umsteigebeziehung	Einstieg bzw. Ausstieg am Verknüpfungspunkt (% der Umsteiger)			Gründe für die Wahl des Einstiegspunktes in den Zug (% der Umsteiger)		
				Zugspitze	Zugmitte	Zugende	Ausstieg an der Treppe der Zielhaltestelle	Einstieg an der Treppe der Starthaltestelle	Sonstiges 2)
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Hamburg Wandsbek Markt (Bild III/6)	1 Treppe Bahnsteigende	Bus/U-Bahn	32	31	37		3)	3)
2			U-Bahn/Bus	67	24	9	3)	3)	3)
3	Hamburg Billstedt (Bild III/7)	2 Treppen ca. Drittelpunkte	Bus/U-Bahn	26	33	38	70	10	15
4			U-Bahn/Bus	37	36	24	75	10	9
5	Hamburg Bergedorf (Bild III/15)	2 Treppen ca. Mitte	Bus/S-Bahn	23	40	37	56	11	33
6			S-Bahn/Bus	23	56	16	64	9	21
7	Hamburg Barmbek (Bild III/14)	1 Treppe ca. Mitte	Bus/Schnellbahn	22	50	26	82	4	10
8			Schnellbahn/Bus	35	40	18	75	5	10
9	Frankfurt Nordweststadt-Zentrum (Bild III/13)	1 Treppe ca. Mitte	Bus/U-Bahn	32	43	25	54	30	16
10			U-Bahn/Bus	20	54	26	56	19	23
11	Frankfurt Hauptwache (Bild III/20)	2 Treppen Bahnsteigenden	Bus + Strab/U-Bahn	30	33	34	41	13	40
12			U-Bahn/Bus + Strab	52	33	15	60	10	25
13	Berlin Ruhleben (Bild III/3)	2 Treppen ca. Drittelpunkt	Bus/U-Bahn	26	47	27	61	12	25
14		2 Treppen ca. Drittelpunkt	U-Bahn/Bus	38	45	16	61	18	19
15	Berlin Mückelnbrücke (Bild III/19)	2 Treppen ca. Drittelpunkte	Hochbahn/U-Bahn	30	39	26	65	12	25
16			U-Bahn/Hochbahn	42	31	25	61	2	35
17	Berlin Alt-Mariendorf (Bild III/4)	2 Treppen Bstg.-ende und Drittelpunkt	Bus/U-Bahn	32	39	27	56	20	23
18			U-Bahn/Bus	63	25	12	71	11	16
19	Rotterdam Maashaven (Bild III/2)	2 Treppen Mitte und Drittelpunkt	Strab/Metro	21	30	37	58	12	14
20			Metro/Strab	35	35	19	60	12	7
21	Rotterdam Zuidplein (Bild III/10)	2 Treppen ca. Drittelpunkte	Bus/Metro	31	34	38	55	23	10
22		1 Treppe ca. Drittelpunkt	Metro/Bus	28	26	42	65	19	6

Anmerkungen:

- 1) siehe auch entsprechende Bilder in Teil III
- 2) Sonstiges = Annehmlichkeitsgesichtspunkte, z. B. in erster Linie „Zug leer“, in Sonderfällen „1. Klasse“, „Raucher – Nichtraucher“
- 3) Die Frage nach dem Grund für den Einstiegsort wurde in Wandsbek Markt nicht gestellt.

Demnach richten sich rund 62 % der Fahrgäste eines S-Bahn-Systems nach der Lage des Abganges an der Zielhaltestelle, während nur für 13 % die Lage des Zuganges an der Einsteigehaltestelle massgebend ist. Diese Angabe stimmt mit [599] praktisch überein. Nur etwa 10 bis 20 % bevorzugen im Berufsverkehr bewusst die weniger benutzten Wagen. [170] zieht daraus den Schluss, dass das Bestreben der Fahrgäste nach einer Minimierung der Wege sehr gross ist. Besonders ausgewählt werden nur Spezialwagen wie Erste-Klasse-Wagen oder Raucherwagen. Die sehr bewusste Wahl der Einstiegstüre zeigt sich in den ausgeprägten Gewohnheiten der regelmässigen Fahrgäste des Berufs- und Schülerverkehrs, welche zu 85 % immer denselben Zug und zu 74 % denselben Wagen benützen [252].



Reisende auf der Schiene
im Nah- und Regionalverkehr
nutzen:

- a) den selben Zug
- b) den selben Wagen
- c) den selben Sitzplatz
- d) den selben Stehplatz

Abb. 4-18: Zugbezogene Nutzergewohnheiten im Regionalverkehr, Berufspendler und Schüler [252].

Den genannten Beobachtungen an langen Kurseinheiten widerspricht [124] aufgrund von Modellversuchen an kleinen Fahrzeugen mit geringen Distanzen zwischen den Türen. Gemäss seinen Angaben weichen die Fahrgäste stark besetzten Fahrzeugbereichen bewusst aus und suchen sich weniger besetzte Abteile. Für Strassenbahnfahrzeuge machen [34] und [515] Angaben zur Verteilung der Ein- und Aussteiger auf die Türen. [34] hat drei Zürcher Strassenbahntypen an einer bestimmten Haltestelle untersucht, weshalb lokale Einflüsse das Ergebnis beeinflussten. Dagegen hat [515] die Einsteiger bei Mitfahrt im Fahrzeug an den vier Türen des Genfer Niederflurtrams gezählt.

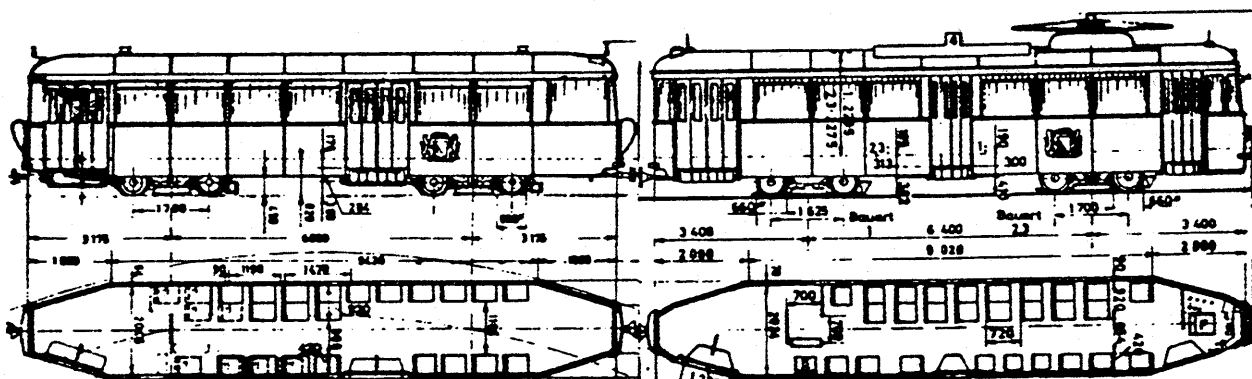


Abb. 4-19: Strassenbahnzug Typ Be 4/4+B4, Baujahr 1941, der VBZ Zürich (Abbildung: VBZ).

und 4 mit 31 % und 28 %, während die beiden inneren Türen 2 und 3 nur 23 % beziehungsweise 18 % des Einsteigerstromes zu bewältigen hatten. Erkennbar ist daraus der Einfluss des grösseren Einzugsgebietes der beiden äusseren Türen [515]. Das einzeln verkehrende Gelenktram war allerdings kürzer als die üblicherweise eingesetzten Standardzüge Be 4/4+B4, worauf die Fahrgäste nicht vorbereitet waren.

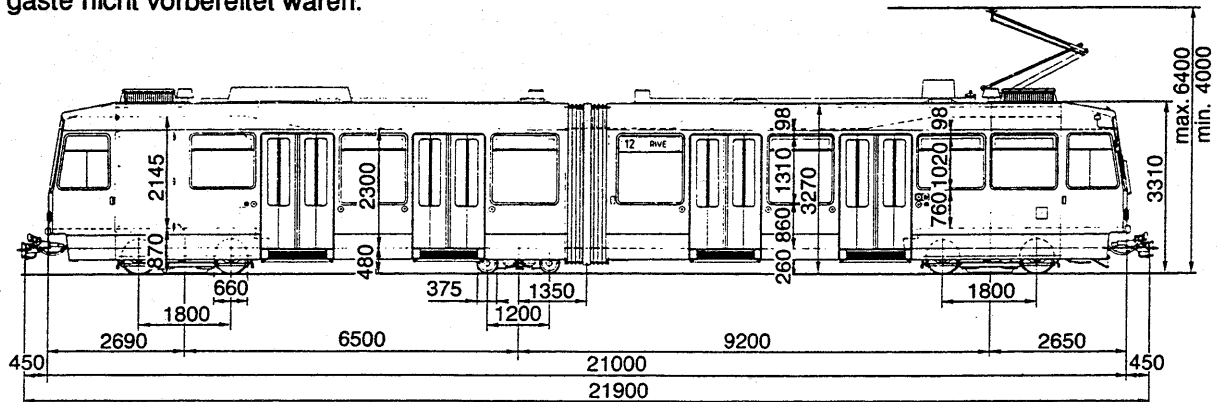


Abb. 4-22: Niederflur-Strassenbahnwagen Be 4/6 der Genfer Verkehrsbetriebe (Abbildung: ACMV).

Definiert man einen Ungleichförmigkeitsgrad als Quotient zwischen maximaler und mittlerer Türbenützung (alle Türen), so ergeben sich die folgenden Werte:

- | | | |
|---|----------------------|-------|
| • | Be 4/4 VBZ, 1941 | 145 % |
| • | Be 4/4 VBZ, 1959 | 135 % |
| • | Be 4/6 VBZ, Wagen I | 144 % |
| • | Be 4/6 VBZ, Wagen II | 140 % |
| • | Be 4/6 TPG, 1984 | 124 % |

Dabei kommt bei den Fahrzeugen der VBZ zusätzlich der Einfluss des Benützungsverbotes der Türe 1 zum Ausdruck, insbesondere beim Vergleich mit der später dargestellten Ungleichförmigkeit der Türbenützung durch die aussteigenden Fahrgäste. An zweitürigen Bussen hat [298] festgestellt, dass ohne Billettverkauf im Fahrzeug die zweite Türe in 90 % der Fälle für die Fahrgastwechselzeit massgebend ist. Als Gründe für die Wahl einer bestimmten Türe führt er an:

- Schutz vor Witterung
- Sitzplatzangebot am Perron
- Information und Billettverkauf am Perron
- Erwartetes Sitzplatzangebot beziehungsweise Füllungsgrad
- kurze Wege zu den Abgängen am Aussteigebahnhof

Eine Fahrgastbeobachtung bei Gelenktrolleybussen in Luzern/Schweiz hat zusätzlich gezeigt, dass ältere Fahrgäste gerne die zweite Türe im Vorderwagen benützen, während jüngere Fahrgäste den Nachläufer bevorzugen. Insgesamt und mit der Einschränkung durch die genannten Einflüsse ist festzuhalten, dass Einsteiger überwiegend die ihnen am nächsten liegende Türe benützen. Bei Systemen mit langen Einheiten (S-Bahnen, U-Bahnen) kommt eine Ungleichförmigkeit dadurch zustande, dass für die Fahrgäste bei der Wahl ihres Warteortes die Lage des Ausganges an der Zielhaltestelle eine überragende Bedeutung hat. Bei Systemen mit kleineren Kurseinheiten wird die nächstgelegene Einstiegstüre aufgrund der zufälligen Warteposition auf dem Perron gewählt, korrigiert allenfalls durch den Besetzungsgrad des Fahrzeuges.

4.43.3 Verteilung der Fahrgäste im Fahrzeug

Obschon die Gesetzmässigkeiten, nach denen sich die Fahrgäste in einem Fahrzeug verteilen, für die Abschätzung der effektiv erreichbaren Kapazität und die Überfüllung der Einstiegsräume von grosser Bedeutung wären, wurden sie bisher kaum untersucht. Von [408] liegen Angaben über die Stehplatzbelegungsgrade in S-Bahn-Fahrzeugen vor. Er weist darauf hin, dass sich die Fahrgäste im Fahrzeug nicht homogen verteilen und sich auf die gut erschlossenen Einstiegsbereiche konzentrieren. Es wird leider nicht klar, ob es sich bei seinen Angaben um Beobachtungen oder um Hypothesen handelt.

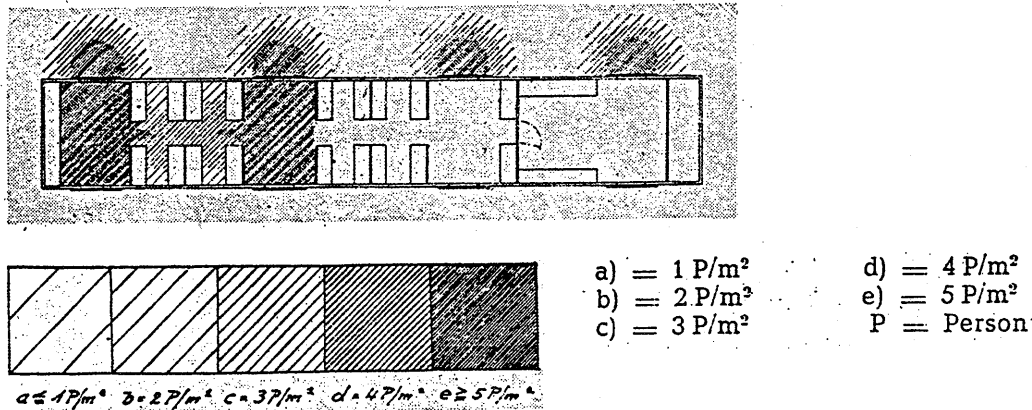


Abb. 4-23: Darstellung der bei stärkstem Andrang in einem S-Bahnwagen auftretenden Personendichte und zugehörige Skala [408].

[26] nennt eine maximal erreichbare Stehplatzbelegung von 6.6 P/m². Für verschiedene globale Stehplatzbelegungsgrade der Fahrzeuge gibt er zudem die Aufenthaltsorte der Fahrgäste an:

- *Global 2 P/m²*: Stehplatzfahrgäste befinden sich praktisch ausschliesslich in den Türauffangräumen, während die Gänge unbenutzt bleiben.
- *Global 4 P/m²*: In den Türauffangräumen herrscht bereits ein Gedränge, während die Gänge erst locker besetzt sind.
- *Global 6 P/m²*: Überall herrscht ein Gedränge; teilweise wird sogar der Raum zwischen den Sitzen als Stehplatzfläche verwendet.
- *Global 6.6 P/m²*: Alle Flächen des Fahrzeuges inklusive die Abteile sind voll belegt.

Diese Angaben beziehen sich auf die Hamburger S-Bahn und stimmen gut mit [408] überein, welcher darauf hinweist, dass die Fahrgäste vor allem bei hohem Kurzstreckenanteil mit Vorliebe im Türbereich stehenbleiben. In [519] wird schliesslich der Anteil der sitzenden Fahrgäste in Abhängigkeit von der Fahrdauer bei der Hamburger S-Bahn dargestellt. Selbst bei einer Fahrdauer von 10 Minuten ziehen demnach 7 % der Fahrgäste einen Stehplatz dem Sitzplatz vor. Zwischen den verschiedenen Verkehrszwecken hat [519] keine Unterschiede festgestellt.

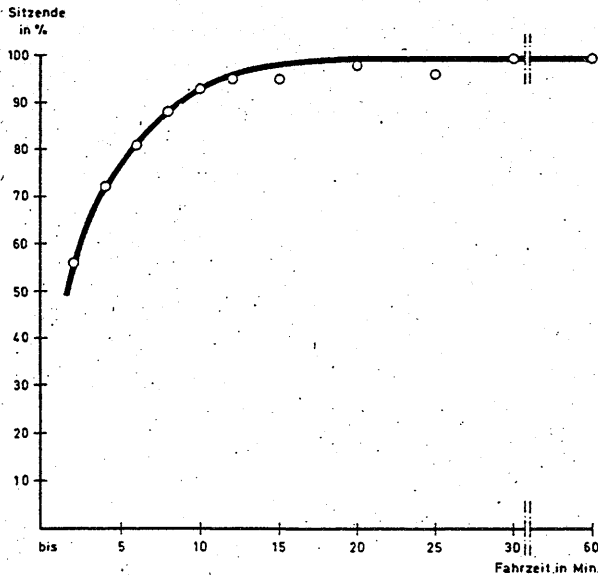


Abb. 4-24: Prozentanteil der sitzenden Fahrgäste in Abhängigkeit von der Fahrtdauer im Hamburger Schnellbahnverkehr [519].

Leider fehlen in der Literatur Aussagen über die Bewegungen der Fahrgäste in den Fahrzeugen. Von Interesse wäre namentlich eine Information darüber, in welchem Ausmass sich die Fahrgäste nach dem Einsteigen von ihrer Einstiegstüre in das Einzugsgebiet einer anderen Türe begeben, um beispielsweise einer grossen Fahrzeugbesetzung auszuweichen.

4.43.4 Verteilung der Aussteiger auf die Türen

Allgemein erwähnt [411], dass viele Fahrgäste beim Aussteigen jene Türe wählen, welche dem Ausgang des Zielbahnhofes am nächsten liegt. Diese Beobachtung stimmt mit den bereits genannten Aussagen überein. Für die früher erwähnten Fahrzeuge hat [34] auch die Aussteigerverteilung erfasst:

Tab. 4-6: Verteilung der Aussteiger auf die Türen bei Zürcher Strassenbahnzügen [34].

Fahrzeugtyp	Türe 1	Türe 2	Türe 3	Türe 4	Türe 5	Türe 6
Be 4/4 1941	20 %	23 %	15 %	26 %	16 %	
Be 4/4 1959	15 %	21 %	21 %	15 %	19 %	9 %
Be 4/6, Wagen I	23 %	28 %	28 %	21 %		
Be 4/6, Wagen II	25 %	26 %	26 %	23 %		

Die Beobachtungen von [515] zeigen beim Genfer Niederflurtram eine ähnliche, wenn auch etwas kleinere Überlastung der äusseren Türen wie bei den Einsteigern. Die Türen 1 und 4 bleiben mit 27 beziehungsweise 26 % überbelastet, während die Türen 2 und 3 mit 25 beziehungsweise 22 % leicht unterbeansprucht sind. Die Verteilung der Aussteiger auf die Türen ist gleichmässiger als jene der Einsteiger gemäss Tabelle 4-5 und entspricht viel eher als jene dem Verhältnis zwischen den Türeinzugsgebieten. Es darf daraus auf eine gewisse Verteilung der Fahrgäste im Fahrzeug geschlossen werden. Als Ungleichförmigkeitsgrade ergeben sich:

•	Be 4/4 VBZ, 1941	130 %
•	Be 4/4 VBZ, 1959	124 %
•	Be 4/6 VBZ, Wagen I	112 %
•	Be 4/6 VBZ, Wagen II	104 %
•	Be 4/6 TPG, 1984	108 %

Für Autobusse liegt die Angabe von [238] vor, wonach sich die Aussteiger eines dreitürigen Busses, bei welchem das Aussteigen nur durch die Türen 2 und 3 gestattet ist, zu 65 % auf die mittlere und zu 35 % auf die hintere Türe konzentrieren, was eine Ungleichförmigkeit von 130 % ergibt.

4.44 Einfluss der Türauslastung

[385] weist am Beispiel der Hamburger S-Bahn und [134] im Zusammenhang mit seinen Versuchen bei der Münchner U-Bahn auf den Zusammenhang zwischen der Fahrgastwechselzahl und der Auslastung der Türleistungsfähigkeit hin, ohne ihn indessen genauer zu behandeln. [26] führt einen Zuschlag zur theoretisch aufgrund der Summe der Türleistungsfähigkeiten errechneten Fahrgastwechselzeit ein und macht ihn von der Fahrgastwechselquote (bezogen auf das Fassungsvermögen) und damit von der Türauslastung abhängig:

•	Fahrgastwechselquote 10 %	Zuschlag 100 %
•	Fahrgastwechselquote 60 %	Zuschlag 50 %
•	Fahrgastwechselquote 100 %	Zuschlag 20 %

[388] erwähnt, dass die spezifische Fahrgastwechselzeit eines ganzen Zuges bei grossen Fahrgastwechselzahlen absinkt. Grund dafür sei die bei grossem Fahrgastwechsel gleichmässigerer Ausnützung der Türkapazität.

4.45 Erfahrungswerte und überschlägige Berechnung

4.45.1 Erfahrungswerte für die gesamte Fahrgastwechselzeit

Erfahrungswerte für die gesamte Fahrgastwechselzeit liegen kaum vor und ergeben auch keinen grossen Sinn. Für Strassenbahnen und Busse werden etwa 10 s [505] beziehungsweise 12 s [543] genannt. [71] hat allerdings in Würzburg (mit Billetverkauf) bis zu 24 s beobachtet. Für die S-Bahn Hamburg erwähnt [385] bei einem Fahrgastwechsel von 120 Personen eine Fahrgastwechselzeit von 20 s, bei 960 Fahrgästen eine solche von 60 s und bei 1200 Personen 95 s.

4.45.2 Zuschlagfaktoren zur theoretischen Fahrgastwechselzeit

Die Verluste infolge der ungleichmässigen Türauslastung können mittels Zuschlägen zur theoretischen Fahrgastwechselzeit berücksichtigt werden. [298] weist darauf hin, dass mit steigender Türzahl der Einfluss der Haltestellengestaltung und ihrer Zugänge zunimmt und die Belastung der Türen eher unausgeglichener wird. Konkrete Abminderungen schlägt [425] vor, indem er die theoretischen Türleistungsfähigkeiten bei kurzen Einheiten auf 83 % und bei langen Einheiten auf 59 % reduziert. Da [425] bereits eine Einheit von über 20 m als lange Einheit betrachtet, trifft letztere Zahl eher für Strassenbahn- als für S-Bahn-Züge zu. Mit einer Abminderung um 50 % kommt [133] auf vergleichbare Zahlen. [113] nennt Zuschläge zur Fahrgastwechselzeit von durchschnittlich 70 % und maximal 100 % und [426] zwischen 20 und 70 %. Die Ansätze für den Fernverkehr liegen wesentlich tiefer. [130] empfiehlt global 20 %, während [320] die Höhe des Zuschlages von den Umständen abhängig macht:

- | | | |
|---|--|------|
| • | ausgeglichene Benützung (Pendlerverkehr) | 5 % |
| • | Bezirks- und Fernverkehr | 10 % |
| • | Fernverkehr, starke Besetzung | 15 % |
| • | Wochenendspitzen, Urlaubsverkehr | 20 % |

Für den Vorortsverkehr empfiehlt [466] einen Zuschlag von 10 % bei kleinem Fahrgastwechsel und von 15 % bei sehr grossen Fahrgastwechselzahlen von je etwa 25 Einsteigern und 25 Aussteigern pro Türe. Der grosse Unterschied zu den übrigen Autoren lassen diese Werte als eher optimistisch erscheinen. Den Einfluss der Fahrgastwechselquote hat [134] in seinen Modellversuchen bei der Münchner U-Bahn nachgewiesen. Der Abbildung 4-7 in Abschnitt 4.32.24 ist zu entnehmen, dass die Zuschläge bei tiefen Fahrgastwechselzahlen eher noch ausgeprägter sind als bei [26].

4.45.3 Spezifische Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses

Die spezifische Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses erhält man mittels Division der Fahrgastwechselzeit an der am längsten geöffneten Türe durch die gesamte Fahrgastwechselzahl.

Tab. 4-7: Erfahrungswerte der spezifischen Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse, geordnet nach der Anzahl Türen. Definition der Anzahl der Türspuren gemäss Abschnitt 3.32.2.

Quelle	Anzahl Türen	Fahrgastwechselzeit	Leistungsfähigkeit	Bezeichnung des Kurses, weitere Spezifikationen
[548]	2	0.820 s/P	1.220 P/s	Autobus DDR, K180.22/K280
[590]	2	0.887 s/P	1.127 P/s	Autobus DDR, Do 54/56
[33]	3	0.590 s/P	1.695 P/s	Autobus Büssing, VBZ
[34]	3	0.630 s/P	1.587 P/s	Autobus Büssing, VBZ
[548]	3	0.872 s/P	1.147 P/s	Autobus DDR, K262
[590]	3	0.786 s/P	1.272 P/s	Autobus DDR, J66-S
[590]	3	0.661 s/P	1.513 P/s	Gelenktrolleybus LOWA
[590]	3	0.653 s/P	1.531 P/s	Gelenktrolleybus 9Tr
[33]	4	0.430 s/P	2.326 P/s	Gelenkbus Saurer, VBZ
[33]	4	0.390 s/P	2.564 P/s	Gelenktrolleybus FBW, VBZ
[34]	4	0.440 s/P	2.273 P/s	Gelenkbus Saurer
[34]	4	0.390 s/P	2.564 P/s	Gelenktrolleybus FBW, VBZ
[548]	4	0.539 s/P	1.855 P/s	Autobus DDR, K180.12
[590]	4	0.865 s/P	1.156 P/s	Tram DDR, T2+B2
[590]	4	0.586 s/P	1.706 P/s	Autobus DDR, K180
[590]	5	0.512 s/P	1.953 P/s	Tram DDR, T2+B4
[34]	5	0.330 s/P	3.030 P/s	Tram VBZ, Be 4/4 + B4
[590]	6	0.576 s/P	1.736 P/s	Tram DDR, T2+2 B2
[590]	6	0.407 s/P	2.457 P/s	Tram DDR, T4+B4
[34]	8	0.200 s/P	5.000 P/s	Tram VBZ, Serie 1601 ff.
[34]	8	0.200 s/P	5.000 P/s	Tram VBZ, Serie 2001 ff.
[590]	24	0.071 s/P	14.085 P/s	U-Bahn
[590]	32	0.079 s/P	12.658 P/s	S-Bahn
[385]	36	0.170 s/P	5.882 P/s	S-Bahn Hamburg, FGW 120 P
[385]	36	0.063 s/P	15.873 P/s	S-Bahn Hamburg, FGW 960 P
[385]	36	0.079 s/P	12.658 P/s	S-Bahn Hamburg, FGW 1200 P

Als Richtwerte lassen sich aus Tabelle 4-7 ableiten:

- 2 Türen mittlere Fahrgastwechselzeit 0.85 s/P Leistungsfähigkeit 1.18 P/s
- 3 Türen 0.70 s/P 1.43 P/s
- 4 Türen 0.55 s/P 1.82 P/s

Die übrigen Werte sind nicht gut abgesichert. Erkennbar ist aber, dass die praktisch erreichte Türleistungsfähigkeit unterproportional zur theoretischen Türleistungsfähigkeit ansteigt. Damit wird die Aussage in Abschnitt 4.42 bestätigt.

4.45.4 Streuung der Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse

Die Streuung der Fahrgastwechselzeiten wurde bisher kaum untersucht. [540] hat die Standardabweichung der Fahrgastwechselzeit s_{FW} [s] an bestimmten Haltestellen gemessen und mittels Regression auf die mittlere Fahrgastwechselzeit $t_{FW,m}$ [s] bezogen:

- Tatra-Züge, Dresden $s_{FW} = 0.27 + 0.379 \cdot t_{FW,m}$
- Tatra-Züge, Halle $s_{FW} = -0.24 + 0.405 \cdot t_{FW,m}$
- Reko-Züge, Leipzig $s_{FW} = 0.42 \cdot t_{FW,m}$

Gerundet beträgt die Standardabweichung der Fahrgastwechselzeit an einer Haltestelle somit rund 40 % der mittleren Fahrgastwechselzeit der betreffenden Haltestelle. Bestätigt wird dieser Wert durch weitere Messungen in Halle [543]. Die Verteilung folgt einer unterzufälligen Erlang-k-Verteilung. Allerdings handelt es sich dabei nicht genau um die hier interessierende Streuung der Fahrgastwechselzeit für eine bestimmte Fahrgastwechselzahl, weshalb die folgende Abbildung lediglich einen Hinweis liefert:

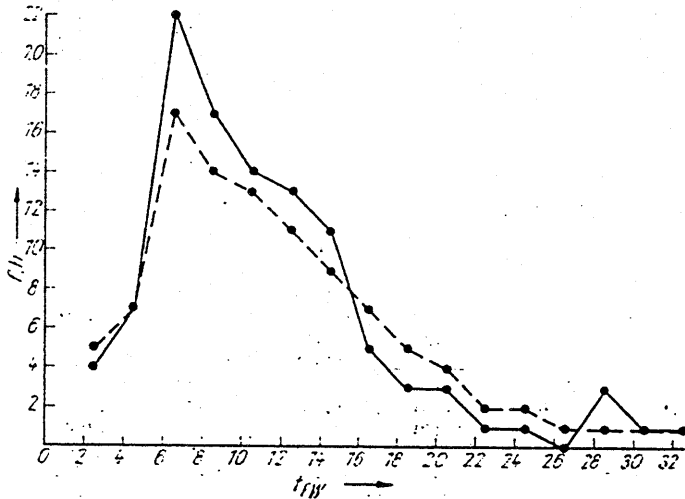


Abb. 4-25: Vergleich der beobachteten (f) mit den nach der Erlang-k-Funktion berechneten (h) Fahrgastwechselzeiten an der Haltestelle Huygenstrasse in Leipzig [540].

Eine Beziehung zwischen der Fahrgastwechselzahl, der Fahrgastwechselzeit und der Streuung der Fahrgastwechselzeit stellt [91] für eintürige Busse mit kleinen Fahrgastwechseln auf. Hierbei handelt es sich um die Streuung an einer einzelnen Türe und nicht um den Streuungswert ganzer Kurse. Immerhin lässt sich ablesen, dass die Streuung einem Grenzwert von etwa 50 bis 60 % der mittleren Fahrgastwechselzeit zustrebt. Nur graphisch dargestellt und nicht statistisch ausgewertet hat schliesslich [34] seine Beobachtungen an Zürcher Strassenbahnzügen. Die Messwerte in Abbildung 4-26 scheinen eher eine etwas kleinere Streuung als bei [91] aufzuweisen:

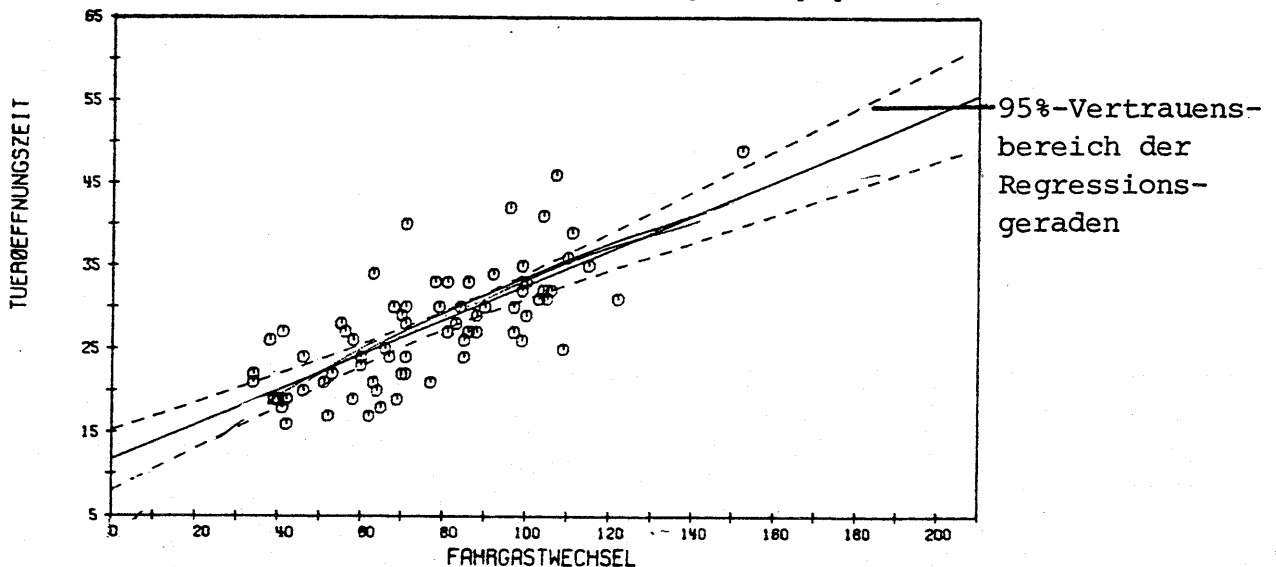


Abb. 4-26: Türöffnungszeit in Abhängigkeit von der Fahrgastwechselzahl bei einer Strassenbahn-Doppeltraktion der VBZ-Serie 2001 ff. [34].

5 Methodik und Umfang der eigenen Untersuchungen

5.1 Umfang der eigenen Untersuchungen

5.1.1 Zielgrössen und Eignung der bisherigen Erkenntnisse

5.1.1.1 Zielgrössen

Aus der Modellbildung in Abschnitt 2 leiten sich die Zielgrössen ab, welche sich den drei Betrachtungsstufen entsprechend zusammenfassen lassen:

- *Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre:* Spezifische Türleistungsfähigkeit und Fahrgastwechselzeit mit Erwartungswert, Streuung und Verteilungsfunktion, Abhängigkeit von den Eigenschaften der Fahrgäste, den Charakteristiken der Fahrzeuge und der Anlagen sowie den Begleitumständen
- *Fahrgastwechselzeit am Türsystem:* Erwartungswerte, Streuung und Verteilungsfunktion in Abhängigkeit von Türzahl, Türverteilung und Fahrgastverteilung; Fahrgastdichten auf dem Perron und im Fahrzeug
- *Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt:* Umschlagfaktor, Linienkonstante

5.1.1.2 Eignung der bisherigen Erkenntnisse

Bevor eigene Felduntersuchungen in Angriff genommen wurden war zu prüfen, welche der Fragen mit Hilfe bereits existierender Veröffentlichungen beantwortet werden konnten. Das Ergebnis ist in Abschnitt 4 dargestellt worden. Demnach sind die bisherigen Untersuchungen geprägt von deren unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Zielen. Die Einflussfaktoren sind unbefriedigend systematisiert. Zum Fahrgastwechsel an einer bestimmten Türe existieren viele uneinheitliche Einzelangaben, wobei die Gründe für die Differenzen mangels genauerer Informationen oft nicht erkennbar sind. Praktisch unerforscht geblieben ist der Einfluss der Eigenschaften der Fahrgäste und der Umstände wie Tageszeit, Verkehrszweck und klimatische Verhältnisse. Der bedeutende Einfluss des Besetzungsgrades mit seinen Rückstaufolgen ist noch nicht geschlossen dargestellt worden. Gewisse Aussagen finden sich zur Bewegungsrichtung und zur gegenseitigen Behinderung. Häufigen Gegenstand von Untersuchungen gebildet haben die Breite der Türen und die Einstiegshöhe. Leider fehlen auch hier allgemeingültige Erkenntnisse. Der Leistungsverlust der Einstiege infolge wachsender Einstiegshöhe lässt sich immerhin abschätzen. Der Einfluss der ergonomischen Treppengestaltung liegt dagegen noch weitgehend im Dunkeln und die Angaben zur Streuung der Fahrgastwechselzeiten sind wenig konsistent.

Praktisch unmöglich ist es, aufgrund der Literaturangaben die Fahrgastwechselzeit eines Zuges sowie die Streuungen zuverlässig zu bestimmen. Zwar werden behelfsmässige Verfahren vorgeschlagen, welche aber auf sehr groben Vereinfachungen beruhen und welche die Eigenschaften des Fahrzeuges und des Türsystems nicht mit den Fahrgastwechselzeiten verknüpfen. Die Einflüsse auf die effektiv nutzbare Türkapazität sind kaum erkannt. Schliesslich liegen keine Angaben zur Berechnung der Fahrgastwechselzeiten einer ganzen Fahrt vor.

5.12 Festlegung der näher untersuchten Zielgrössen

Da die Literaturangaben die meisten Fragen offenliessen bestand ein grosser Forschungsbedarf. Die zur Verfügung stehenden Mittel machten die Beschränkung der eigenen Erhebungen auf gezielte Fragestellungen notwendig. Für das Ziel der Untersuchung ist die Kenntnis folgender Grössen von erstrangiger Bedeutung:

- Verteilungsfunktion und Streuung der Fahrgastwechselzeiten an den Einzeltüren
- Einfluss des Besetzungsgrades und der Verteilung der Fahrgäste im Fahrzeug
- Einfluss der Hauptkennwerte der Türe wie Breite und Einstiegshöhe
- Bewegungsrichtung und gegenseitige Behinderung
- Einfluss der Türzahl und -verteilung, der Verteilung der Fahrgäste auf die Türen sowie der Fahrgastwechselzahl auf die Fahrgastwechselzeit des Kurses
- Einfache Abschätzung der Fahrgastwechselzeit einer ganzen Kursfahrt

Mit diesen Informationen lassen sich die Fahrgastwechselzeiten hinreichend genau vorausrechnen, insbesondere für die Fahrzeugkonzeption, die Betriebsplanung und die Betriebsführung. Lediglich der Verfeinerung dienen folgende Punkte, welche deshalb nicht näher erforscht wurden:

- Einfluss der Belastung durch Gepäck
- Einfluss von Alter, Geschlecht und Grösse der Fahrgäste
- Verkehrszweck der Fahrgäste
- Einfluss von Tageszeit, Witterung und Klima
- Spaltbreite zwischen Perron und Fahrzeug, ergonomische Gestaltung, Zustand der Oberfläche
- Verteilung der Fahrgäste auf der Haltestelle

Dabei handelt es sich um Einflüsse zweiter Ordnung oder um Faktoren ohne praktische Anwendung.

5.13 Wahl der Methodik

Als Methoden zur Bestimmung der weiter untersuchten Grössen kamen in Betracht:

- Messungen an existierenden Fahrzeugen
- Messungen an Modellen 1 : 1
- Computerberechnungen

Jede dieser Methoden wurde in einem Teilbereich der Studie eingesetzt. Unvermeidbarerweise erweckt dieses pragmatische Vorgehen zwar den Eindruck einer methodischen Inhomogenität, die sich aber fallweise wie folgt begründen lässt:

Tab. 5-1: Wahl der Methoden in dieser Untersuchung für die einzelnen Zielgrössen.

Zielgrösse	Methode	Begründung
Fahrgastwechselzeit an Einzeltüre	Messungen im Betrieb Messungen am Modell	Erfassung des realen Verhaltens und Vergleich mit den Resultaten aus anderen Forschungen
Fahrgastwechselzeit am Fahrzeug	Messungen im Betrieb, Computerberechnungen namentlich für grosse Kurse	Messungen möglich bis zu vier Türen; Computerberechnungen für Fahrzeuge mit mehr als vier Türen und anderer Tür- und Fahrgastverteilung unumgänglich; Vergleich mit den Resultaten aus anderen Forschungen; beliebige Variation der Parameter möglich
Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt	Messungen im Betrieb,	Literaturstudien liefern nur grobe Hinweise
Verteilung der Fahrgäste im Fahrzeug	Zählungen im Betrieb	Literaturstudien liefern nur grobe Hinweise

5.2 Fahrgastwechselzeit an Einzeltüre

5.2.1 Art und Umfang der Messungen

5.2.1.1 Erfasste Messgrössen

Die Messung der Fahrgastwechselzeit an den einzelnen Türen wurde manuell durchgeführt, da keine geeigneten automatischen Messvorrichtungen existieren. Es wurde darauf geachtet, dass das Messpersonal möglichst viele Daten erfasste. Begrenzt wurde dessen Aufnahmevermögen durch folgende Einflüsse:

- Zum Notieren der Messwerte stand nur die Fahrzeit zwischen zwei Haltestellen zur Verfügung.
- Eine Messperson vermochte nur eine Türe gleichzeitig zuverlässig zu beobachten.

Maximal konnte eine Messperson von einem Halt folgende Grössen festhalten:

- Zahl der aussteigenden Fahrgäste
- Zahl der einsteigenden Fahrgäste
- Fahrgastwechselzeit
- Totale Haltezeit
- Anzahl Personen in den einzelnen Fahrzeugsektoren

Fahrgastwechsel mit bis zu etwa zehn beteiligten Fahrgästen waren fehlerfrei erfassbar. Bei den fehleranfälligen grossen Fahrgastwechseln fällt eine einzelne Fehlzählung anteilmässig weniger stark ins Gewicht, weshalb die Methode verantwortet werden konnte. Das Messpersonal wurde mit einer Ausnahme aus Mitarbeitern des Institutes rekrutiert.

5.21.2 Überblick über die ausgeführten Messungen

Statt an einer grossen Zahl verschiedener Fahrzeuge wenige Messungen durchzuführen, wurden nur wenige Fahrzeugtypen ausgewählt, diese aber besonders intensiv beobachtet. Dafür sprachen insbesondere die bedeutenden Streuungen bei Messungen in der Praxis. Wird dieser Tatsache nicht durch viele Messwerte begegnet, so ist die Gefahr von Fehlinterpretationen zu gross. Die Fahrzeugauswahl ist geprägt durch gewisse geschichtliche Zufälligkeiten, denn für die Messungen an Niederflurfahrzeugen standen zunächst lediglich die Niederflurstrassenbahnen in Genf und Grenoble sowie der Gelenkbusprototyp von MAN zur Verfügung. Im weiteren wurden Untersuchungsaufträge, welche in einem anderen Zusammenhang standen, für die Forschungsarbeit nutzbar gemacht. Insgesamt gelang aber die Erfassung repräsentativer Fern-, Regional- und Stadtverkehrsfahrzeuge:

- Intercity-Verkehr: Einheitswagen IV der SBB
- Regionalverkehr, S-Bahnen: Doppelstockwagen der NS, Doppelstockwagen der SBB, Triebwagenzug BR 420 der DB
- Stadtbahn: Niederflurstadtbahn Grenoble SEMITAG, Niederflurgelenktram der Genfer Verkehrsbetriebe TPG
- Autobus, Trolleybus: Gelenktrolleybusse der Basler Verkehrsbetriebe BVB, Niederflurgelenkbus MAN

Auf umfangreiche eigene Messungen an einem Modell 1 : 1 musste aus Gründen des Versuchsaufwandes verzichtet werden. Es bot sich aber die Möglichkeit, die Rohdaten von Modelluntersuchungen der SBB und SWP für das Rollmaterial von Bahn 2000 zu übernehmen. Total liessen sich 4807 Fahrgastwechsel mit 46'331 Fahrgästen auswerten:

Tab. 5-2: Überblick über die Messungen des IVT für die Erhebung von Fahrgastwechselzeiten.

Betrieb	Fahrzeug	Datum	Messwerte	Fahrgäste	FG/Messung
TPG Genf	Niederflurtram Be 4/6	26./27.10.1988	421	1934	4.6
SEMITAG Grenoble	Niederflurtram 1989	27./28.10.1988	761	4487	5.9
S-Bahn München	Doppelstockwagen NS	12.-14.6.1989	1307	18'884	14.4
S-Bahn München	BR 420 der DB	12.-14.6.1989	548	3064	5.6
BVB Basel	Trolleybus Serie 921-922	23.4.1990	226	954	4.2
BVB Basel	Gelenkbus MAN-NG 272	23./24.4.1990	505	2477	4.9
BVB Basel	Trolleybus Serie 911ff.	24.4.1990	294	1245	4.2
S-Bahn Zürich	Doppelstockwagen SBB	16.1.1993	517	6278	12.1
SBB	Einheitswagen IV, Betrieb	3.-14.6.1993	210	6390	30.4
SBB	Einheitswagen IV, Labor	24.6.1993	6	198	33.0
SBB/SWP	Doppelstockwagen, Labor	24.6.1993	12	420	35.0
Total			4807	46'331	9.6

5.21.3 Vorgehen bei den Messungen im Betrieb

Das Messpersonal befand sich mit einer Ausnahme während der ganzen Fahrt auf den Fahrzeugen. Ein anderes methodisches Vorgehen wurde einzig bei den Einheitswagen IV der SBB angewandt, welche an den Bahnhöfen Winterthur und Bern durch stationäres Personal beobachtet wurden. Bei den Untersuchungen in Genf und Grenoble wurde versuchsweise die Zeit vom Beginn des Türöffnungsvorganges bis zum Ende des Türschliessens gemessen und anschliessend die fixen Zeitanteile für das Öffnen und Schliessen der Türe sowie die Mindestoffenzeit abgezogen. Als Vorteile zeigten sich dabei:

- Zeitliche Trennung der Zeitmessung und der Fahrgastzählung.
- Gute Erkennbarkeit der Grenzen des Zeitintervalls.
- Möglichkeit zur Berücksichtigung des vor der vollständigen Türöffnung einsetzenden Fahrgastwechsels.

Die Türkonstruktionen der meisten übrigen Fahrzeuge gestatteten dieses Vorgehen nicht und es zeigten sich auch verschiedene Erschwernisse bei der Auswertung. Es wurde daher bei den übrigen Versuchen die Zeit gemessen, während welcher sich Fahrgäste im Türquerschnitt befanden.

5.22 Die Messungen im einzelnen

5.22.1 Intercity-Züge mit EW IV, Maquette von IC-Doppelstockwagen

5.22.11 Anlass der Messungen und Durchführung

Für Tests der Fahrgastwechseleigenschaften der geplanten SBB-Intercity-Doppelstockwagen hat die Firma Schindler Waggon Pratteln zwei Einstiegs- und Innenraummaquetten im Massstab 1 : 1 erstellt. Die Labormessungen wurden am 24. Juni 1993 mittels rund 35 Personen des Werkstattpersonals der SWP vorgenommen (vorwiegend männlich; Durchschnittsalter 39.7 Jahre). Keine der Messpersonen hatte Gepäck mitzuführen. Die Personenzusammensetzung musste nicht repräsentativ sein, da die Korrektur für den realen Fahrgastmix über Vergleichsmessungen im praktischen Betrieb erfolgte. Die Versuchspersonen wurden sowohl beim Einsteige- wie beim Aussteigerversuch direkt um die Türe gruppiert, was nicht der Realität entspricht, aber den günstigsten Fall wiedergeben sollte.

Da das Verhalten der Fahrgäste am Einstieg des geplanten Wagens nur in einer Laborsituation beobachtet werden konnte, wurden ebenfalls am 24. Juni 1993 unter gleichen Bedingungen und mit denselben Versuchspersonen auch der Einheitswagen IV geprüft. Die Vergleichbarkeit der Laborwerte mit der Realität wurde hergestellt, indem das praktische Betriebsverhalten von Einheitswagen IV zwischen dem 3. und 14. Juni 1993 bei einer grösseren Zahl von Intercity-Zügen in Bern und Winterthur mit Perronhöhen von 300 und 550 mm erfasst wurde.

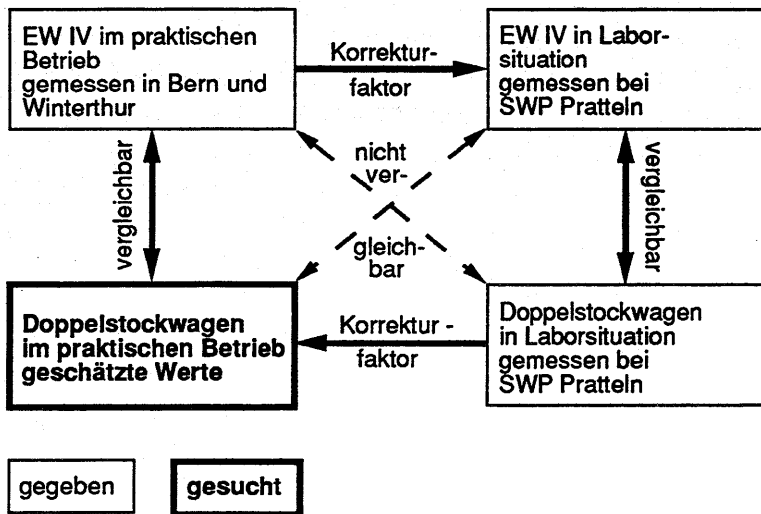


Abb. 5-1: Untersuchungskonzept für die Fahrgastwechselzeit der Doppelstockwagen von Bahn 2000.

5.22.12 Einheitswagen IV der SBB

Der Einheitswagen IV der SBB wurde ab 1981 in grosser Stückzahl geliefert und bildet heute die Standardausstattung der Intercity-Züge. Er verfügt über 60 Sitzplätze in 1. Klasse und über 86 Sitzplätze in 2. Klasse. Die Wagenbodenhöhe im Einstiegsbereich beträgt 1180 mm, was drei Treppenstufen erforderlich macht. Die Wagentüren haben im geöffneten Zustand eine lichte Breite von 800 mm.

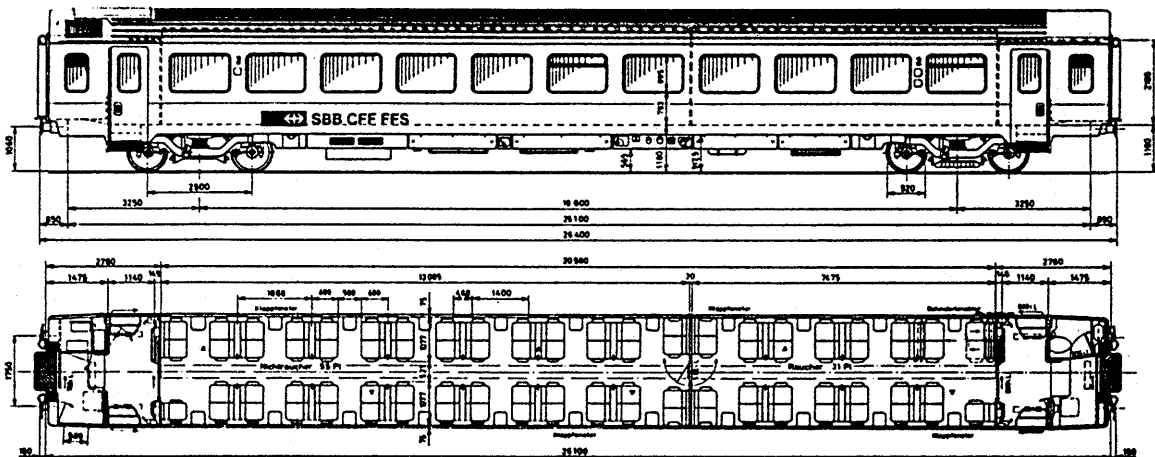


Abb. 5-2: Einheitswagen IV der SBB, 2. Klasse [159].

5.22.13 Doppelstockwagen Variante 15-M/15-E von SWP

Der Doppelstockwagen von SWP wurde in zwei Untervarianten projektiert. Die Untervariante 15-E unterscheidet sich von der Untervariante 15-M dadurch, dass deren Aufstieg ins Obergeschoss zum Fahrzeugende hinführt, während er sich beim anderen Vorschlag gegen die Fahrzeugmitte

orientiert. Der Wagen verfügt über beidseitig je eine Einstiegstüre mit einer lichten Breite von 1400 mm. Die Wagenbodenhöhe im Einstiegsbereich beträgt 500 mm über SOK. Die Türe muss asymmetrisch angeordnet werden, um eine übermäßige Spaltbreite an der Innenkante gekrümmter Perronanlagen zu vermeiden. Die Maquette erlaubte die Prüfung der Zweckmässigkeit beider Aufstiegsvarianten.

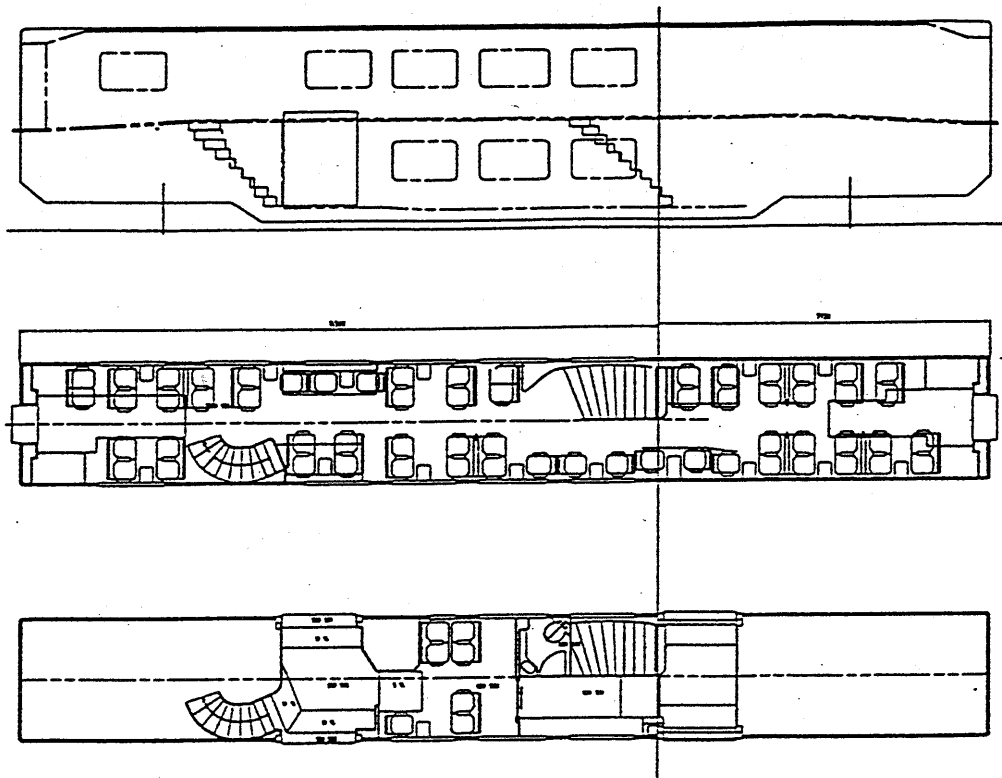


Abb. 5-3: Maquette 1 : 1 der SWP für die Einsteigeversuche vom 24. Juni 1993 [442].

5.22.2 Doppelstockwagen der NS und BR 420 der DB bei der S-Bahn München

5.22.21 Anlass der Messungen und Durchführung

Im Kernbereich der S-Bahn München bündeln sich zwischen Donnersbergerbrücke und Ostbahnhof sieben S-Bahn-Linien. In der Spitzenstunde ist die Strecke zu 87,5 % ausgelastet (Stand 1989). Parallel dazu existieren keine ähnlich attraktiven öffentlichen Verkehrsmittel, weshalb die S-Bahn häufig von Kurzstreckenfahrern benützt wird. Allmählich stösst sie an ihre Leistungsgrenzen und, da weder Länge noch Zahl der Züge vergrössert werden können, erschien der Doppelstockwagen als Ausweg zur Kapazitätssteigerung. Vom 28. Mai bis zum 21. Juni 1989 führte die DB entsprechende Versuchsfahrten durch, indem ein Zug der damaligen S4 durch vier Doppelstockwagen der NS ersetzt wurde. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Gelegenheit zur Begleitung der Versuche genutzt. Als Vergleichsfahrzeug wurde der S-Bahn-Triebzug der BR 420 einbezogen [558]. Die Perronhöhen auf der Linie S4 betragen im Kernbereich 950 mm und auf den Aussenstrecken 750 mm. In Pasing sind als Ausnahme 850 mm zu verzeichnen. Eine Besonderheit bildet die "spanische Bahnsteiganordnung" der Haltestellen Hauptbahnhof, Karlsplatz und Marienplatz, bei welchen Einsteiger und Aussteiger nach Wagenseite getrennt werden, um den Fahrgastwechsel zu beschleunigen.

5.22.22 Doppelstockwagen der NS

Der Versuchszug wurde aus Doppelstockfahrzeugen der Typen AB und B mit je einer Lokomotive der Baureihe 120 an beiden Enden gebildet. Um eine höhere Stehplatzkapazität zu erlangen, wurden sämtliche Sitzplätze auf den Einstiegsplattformen entfernt. Das Sitzplatzangebot reduzierte sich damit beim Typ AB auf 128 und beim Typ B auf 144 Plätze. Dafür stieg die Stehplatzfläche auf insgesamt 41.2 m^2 bei beiden Wagentypen an, was bei einer Belegung mit 4 P/m^2 ein Stehplatzfassungsvermögen von 165 P ergibt. Ein Wagen des Typs AB bot somit 293 Plätze und jener des Typs B deren 309. Bezüglich der Gesamtzahl der Sitzplätze waren der Versuchszug und der Langzug BR 420 beinahe ebenbürtig. Das gesamte Platzangebot entsprach demjenigen eines Vollzuges. Die Einstiegstüren des Doppelstockwagens befinden sich über den Drehgestellen. Sie weisen eine lichte Breite von 1900 mm auf und sind mit Schiebetüren versehen. Die Wagenbodenhöhe liegt auf 1183 mm über SOK. Bei den in München vorkommenden Perronhöhen ergaben sich zwei beziehungsweise eine Treppenstufe. Bei den Treppen ins Ober- beziehungsweise Untergeschoss wurde eine asymmetrische Zweitrepplösung einer symmetrischen Dreitreppenlösung vorgezogen [558].

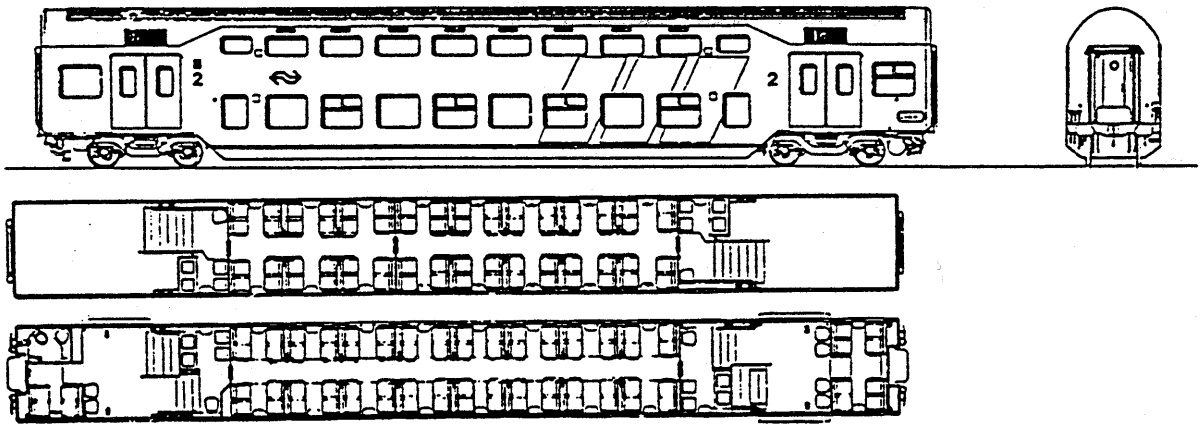


Abb. 5-4: Doppelstockwagen der NS, Typ B [315].

5.22.23 S-Bahn-Triebzug BR 420 DB, München

Der Triebwagenzug der Baureihe 420 wurde gezielt auf den S-Bahn-Einsatz hin konzipiert. Das Fassungsvermögen beläuft sich pro Einheit auf total 194 Sitzplätze. Bei einer gesamten Stehplatzfläche von 74.7 m^2 und einer Belegung von 4 P/m^2 kommen 299 Stehplätze dazu. Das Gesamtfassungsvermögen beträgt damit 493 Personen pro Triebzug. Der Fussboden liegt maximal 1030 mm über der Schienenoberkante, weshalb auf Stufen am Fahrzeug verzichtet werden konnte. Bei einer Bahnsteighöhe von 950 mm im inneren Netzbereich besteht ein nahezu ebenerdiger Einstieg, während bei der Perronhöhe von 750 mm lediglich eine Stufe zu überwinden ist. Charakteristisch ist die grosse Zahl von vier Türen pro Wagen und Seite mit je 1000 mm lichter Weite, wobei beidseits der Türe nur je ein Abteil angeordnet ist (siehe Abbildung 3-53!).

5.22.3 Fahrgastwechsellmessungen bei der S-Bahn Zürich

5.22.31 Anlass der Messungen und Durchführung

Im Zusammenhang mit einer Zweckmässigkeitsprüfung verschiedener Doppelspurausbauten der rechtsufrigen Zürichseelinie beobachtete das IVT am 16. Januar 1993 die Fahr- und Haltezeiten auf der S-Bahn-Linie S7 zwischen Zürich und Rapperswil. Mit vier Mitarbeitern wurden rund 500 Messungen an Doppelstockfahrzeugen ausgeführt. Jeder Zug konnte nur von einer einzigen Person begleitet werden. Nebst der Haltezeit und der Abfahrtszeit des Zuges konnten daher nur die Fahrgastwechselzahlen und -zeiten an einer einzigen Türe erhoben werden. In der Hälfte der Messfahrten war die Messperson bei der unmittelbar der Lokomotive benachbarten Türe postiert, in der anderen Hälfte bei der führerstandsseitige Türe des Steuerwagens. Da nicht der gesamte Fahrgastwechsel des Zuges erfasst wurde, kann keine Korrelation zwischen der Fahrgastwechselzahl und der Fahrgastwechselzeit des Zuges hergestellt werden [207]. Die Perronhöhen der betrachteten Linie betragen auf fünf Bahnhöfen 550 mm, auf einem Bahnhof 480 mm, auf einem Bahnhof 270 mm und auf acht Bahnhöfen 250 mm.

5.22.32 Doppelstockwagen der S-Bahn Zürich

Die Doppelstockzüge der SBB bestehen aus einer Lokomotive Re 450, einem Personenwagen B, einem Personenwagen AB sowie einem Steuerwagen Bt. Die Personenwagen sind in ihren baulichen Daten, insbesondere der Einstiegs- und Innenraumgestaltung, weitgehend mit den Fahrzeugen der NS identisch. Wie bei der NS-Bauart ist die Türe beim Führerstand des Steuerwagens lediglich 1400 mm breit, während die übrigen Einstiege des Zuges 1900 mm messen. Die Fussbodenhöhe des Einstieges beträgt 1150 mm.

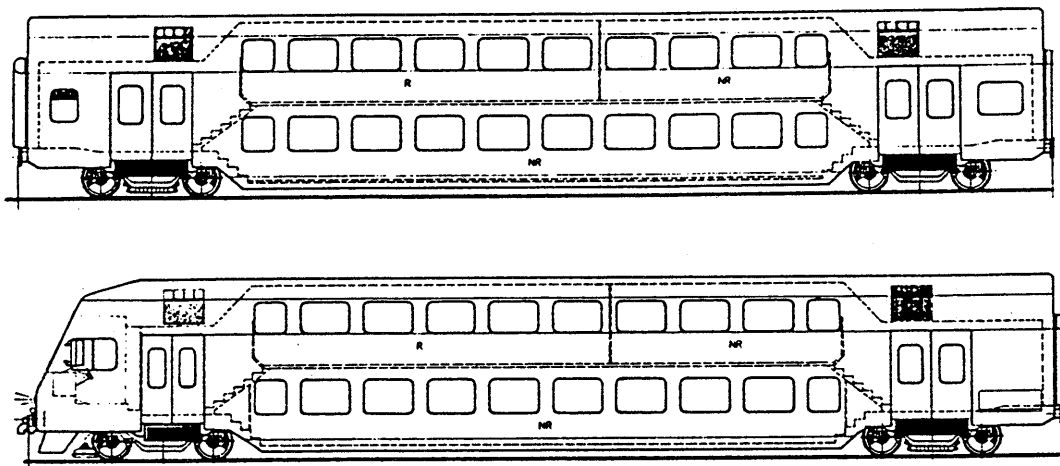


Abb. 5-5: Doppelstock-Pendelzug der SBB für den Einsatz auf der S-Bahn Zürich, oben: B, unten: Bt (Abbildung: SBB).

5.22.4 Niederflurstrassenbahnen Genf und Grenoble

5.22.41 Anlass der Messungen und Durchführung

Mit den Niederflurwagen von Genf und Grenoble wurden erstmals in neuer Zeit die Einstiegshöhen deutlich unter die bisher üblichen Werte gesenkt. Erkauft wurde dieser Vorteil durch eine ungünstigere Türverteilung, durch schlecht erschlossene Endabteile und durch Treppen im Wa-

geninnern. Die beiden Strassenbahnbetriebe verfügten zum Zeitpunkt der Messungen über je nur eine Linie. In Genf handelte es sich um die Linie 12 Bachet=de=Pesay-Moillesulaz, in Grenoble die Linie A Fontaine=La Poya-Grenoble Grand'Place [557].

5.22.42 Der Niederflurstrassenbahnwagen der TPG Genf

Der Niederflurtramwagen Be 4/6 der TPG zählt zur Niederflurgruppe 2 mit konventionellen Motordrehgestellen und unkonventionellen Kleinradlaufdrehgestellen (siehe Abbildung 4-22!). Mit seiner Wagenbodenhöhe von 480 mm gehört er strenggenommen in die Kategorie der Mittelflurfahrzeuge. Bei einer Perronhöhe von etwa 150 mm verbleibt eine Einstiegshöhe von 330 mm, welche zwei Treppenstufen notwendig macht. Da der Wagenboden über den beiden Motordrehgestellen eine Höhe über SOK von 870 mm aufweist, müssen zwischen Einstiegsraum und Endraum rund 390 mm Höhendifferenz mittels zweier Treppenstufen überwunden werden. Die lichte Breite der vier Fahrzeugtüren beträgt 1240 mm. Vom Wagenboden liegen nur 60 % und von den 48 Sitzplätzen befinden sich deren 28 oder 58 % im Niederflurteil. Die Stehplatzfläche beträgt rund 21.0 m², im Niederflurbereich etwa 17.1 m² oder 81 %. Vom gesamten Platzangebot entfallen rund 73 % auf den Niederflurbereich. Dank einer Wagenkastenbreite von 2300 mm konnte ein Gang mit einer Breite von 722 mm realisiert werden [557].

5.22.43 Der Niederflurstrassenbahnwagen der SEMITAG Grenoble

Ebenfalls zur Niederflurgruppe 2 zählt der Niederflurgelenkwagen der SEMITAG Grenoble. Allerdings wurde im Unterschied zu Genf ein Loseradlaufdrehgestell gewählt, sodass der Wagenboden auf einer Höhe von lediglich 345 mm über SOK stufenlos durch den Drehgestellbereich gezogen werden konnte. Dies wurde erleichtert durch die normalspurige Ausführung. Dank der Perrons mit ihrer Höhe von rund 270 mm verbleibt zum Einstieg lediglich eine Höhendifferenz von etwa 80 mm. Die 530 mm Höhendifferenz zwischen der Einstiegsplattform und den Endabteilen über den Motordrehgestellen mit ihrer Höhe über SOK von 875 mm müssen mittels dreier Stufenritte überwunden werden. Die als Schiebetüren ausgebildeten Eingänge verfügen über eine lichte Breite von 1300 mm. Drängelräume zu beiden Seiten der Türen fehlen. Mit rund 4.3 m Länge ist das höhergelegene Endabteil nur wenig länger als jenes des Genfer Wagens mit seinen 4.2 m. Der Niederfluranteil des Fahrgastraumes von 61 % ist ähnlich wie jener von Genf, identisch ist auch die Fahrzeugbreite von 2300 mm. Von den 54 Sitzplätzen befinden sich deren 30 oder 56 % im Niederflurbereich. Die Stehplatzfläche beläuft sich auf rund 32.5 m², davon rund 74 % im niederflurigen Fahrzeugbereich. Das gesamte Platzangebot befindet sich zu rund 69 % im Niederflurbereich [557].

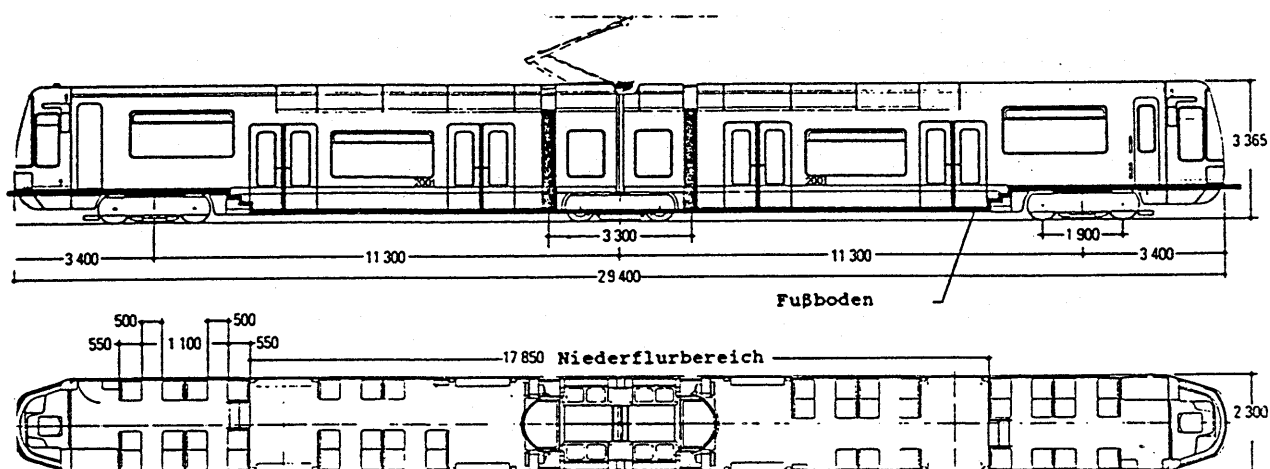


Abb. 5-6: Niederflurstrassenbahnwagen der SEMIRAG Grenoble [1].

5.22.5 Gelenkbusse für die BVB Basel

5.22.51 Anlass der Messungen und Durchführung

Im Jahr 1990 evaluierten die Basler Verkehrsbetriebe (BVB) verschiedene Offerten neuer Gelenktrolleybusse. Als Bedingung waren Tiefeinstiege vorgegeben. Die BVB stellten sich die Frage, ob der Verzicht auf die zweite Fahrzeugtüre im Nachläufer durch den beschleunigten Fahrgastwechsel kompensiert wird, sodass sich die Haltezeit nicht verlängert. Um dies sowie die Akzeptanz bei den Fahrgästen zu klären, setzten die BVB zwischen dem 12. April und dem 2. Mai 1990 einen Niederflurgelenkbus MAN-NG 272 im fahrplanmässigen Betrieb auf der Trolleybuslinie 33 ein. Das IVT wurde mit der Untersuchung der Fahrgastwechselzeiten, der Türbenützung und der Besetzung der Fahrzeugbereiche beauftragt. Das Messprogramm wurde darauf ausgerichtet, dass vom Niederflurbus etwa gleich viele Messwerte vorlagen wie von den beiden konventionellen Referenzfahrzeugen zusammen [559].

5.22.52 Gelenktrolleybusse Serie 911-920 der BVB

Die Trolleybusserie 911-920 der BVB weist vier recht gleichmässig auf die Fahrzeuglänge verteilte Türen auf. Die Türen 2, 3 und 4 haben eine lichte Weite von rund 1230 mm, die Türe 1 eine solche von 690 mm. Der Wagenboden liegt bei den Türen 1, 3 und 4 auf 755 mm, bei der Türe 2 auf 850 mm. Das Fassungsvermögen beträgt bei 17.2 m² nutzbarer Stehplatzfläche 38 Sitzplätze, 69 Stehplätze und total 107 Plätze. 6.6 m² oder 39 % der Stehplatzflächen können als optimal erschlossene Auffangräume gelten, während die restlichen 10.6 m² oder 61 % auf weniger gut erreichbare Gangflächen entfallen. Auffällig sind die grosszügigen Gänge, welche sich aus der 2+1-Bestuhlung ergeben [559].

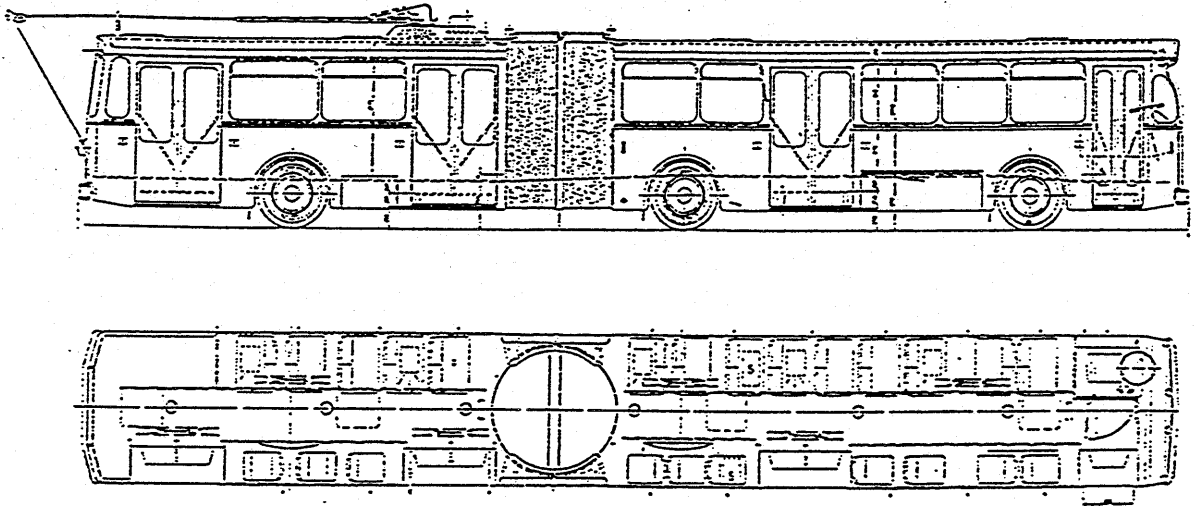


Abb. 5-7: Gelenktrolleybus BVB-Serie 911-920 (Zeichnung: BVB).

5.22.53 Gelenktrolleybusse der Serie 921-922 der BVB

Die beiden Trolleybusse 921 und 922 der BVB besitzen drei grosszügig bemessene Türen von 1280 mm lichter Breite. Der Wagenboden liegt auf lediglich 718 mm. Mit einer nutzbaren Stehplatzfläche von 17.1 m^2 und einem Stehplatzbelegungsgrad von 4 P/m^2 erhält man 69 Stehplätze und mit 47 Sitzplätzen ein totales Fassungsvermögen von 116 Personen. Durch die dreitürige Ausführung des Fahrzeuges ist der Anteil der optimal erschlossenen Stehplatzfläche mit 35 % (6.1 m^2) etwas tiefer als bei der Serie 911-920, während umgekehrt etwa 11.1 m^2 oder 65 % der Fläche als schlecht erschlossen gelten müssen. Durch eine angepasste Bestuhlung wurde die Gangbreite auf die Bedürfnisse eines möglichst ungehinderten Fahrgastflusses abgestimmt [559].

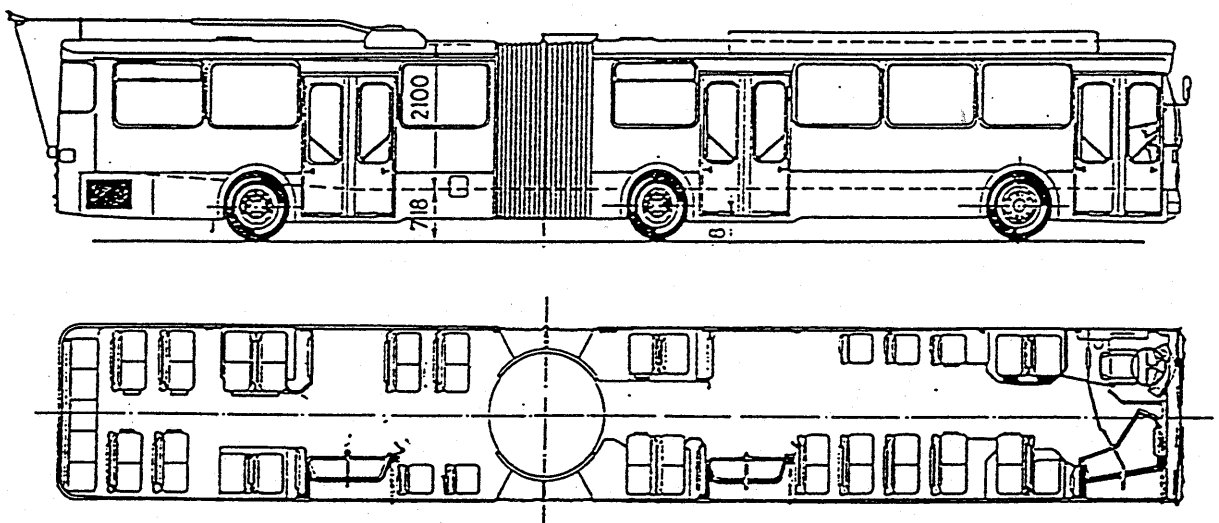


Abb. 5-8: Gelenktrolleybus BVB-Serie 921-922 (Zeichnung: BVB).

5.22.54 Niederflurgelenkbus MAN NG 272

Der dreitürige Niederflurgelenkbus NG 272 von MAN weist keinen durchgehend tiefen Fussboden auf. Die Türen 1 und 2 liegen im Niederflurbereich, wobei sich die unmittelbaren Türbereiche dank einer Abschrägung des Wagenbodens auf nur 317 beziehungsweise 340 mm Höhe befinden. Bei einer Perronhöhe von 150 mm beträgt der Höhenunterschied noch 167 beziehungsweise 190 mm und lässt sich durch das Kneeling um weitere 65 mm verringern. Die Einstiegshöhe der Türe 3 beträgt 590 mm. Mit einer lichten Weite von 1220 mm im geöffneten Zustand sind die Türen eher knapp dimensioniert. Um den Fussboden mit einer Rampe über das Gelenk führen zu können, musste die Türe 2 wesentlich weiter vorne angeordnet werden als üblich. Von der gesamten Stehplatzfläche von 14.4 m² sind 6.0 m² oder 42 % gut erschlossen. Bei 58 Stehplätzen und 53 Sitzplätzen beträgt das Fassungsvermögen 111 Plätze.

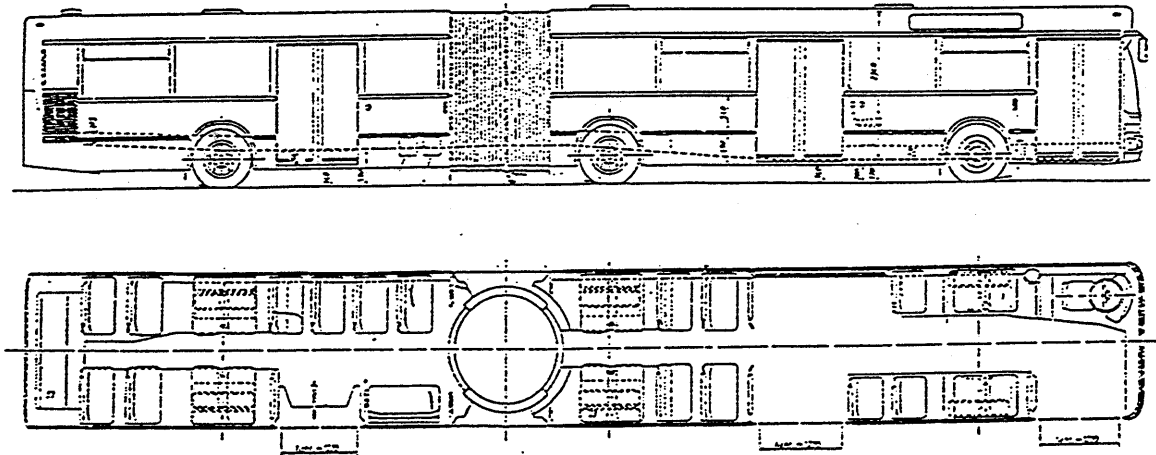


Abb. 5-9: Niederflurgelenkbus NG 272 von MAN (Zeichnung: MAN).

5.23 Auswertemethodik

Die Auswertung der Messungen erfolgte mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogrammes Excel auf Apple-Macintosh. Für spezielle Fragen (insbesondere nichtlineare Regressionsrechnungen) wurde das Statistikprogramm Cricket Graph angewandt. Diese Rechenprogramme gestatteten insbesondere die rasche Korrelation zwischen der Fahrgastwechselzeiten und ausgewählten Kenngrößen. Trotz EDV-Hilfsmitteln war eine Anzahl weiterer zeitraubender Handauswertungen erforderlich, so bei der Bereinigung der Protokolle und der Aufbereitung der Daten.

5.3 Fahrgastwechselzeit am Türsystem

5.31 Messungen im praktischen Betrieb

5.31.1 Möglichkeiten

Für die Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses ist die Zeitspanne zwischen dem ersten und dem letzten Fahrgastwechsel an irgend einer Türe des Kurses massgebend. Dabei muss es sich nicht in beiden Fällen um dieselbe Türe handeln. Die Untersuchung der Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses wird durch die ausserordentlich hohe Zahl kombinatorischer Möglichkeiten von Türzahl, Türverteilung und Türleistungsfähigkeit stark erschwert, wobei viele denkbare Para-

meterkombinationen bisher nicht realisiert wurden. Bei sehr langen Kursen mit vielen Türen steigt der Aufwand für die vollständige Messung der Fahrgastwechselzeiten in untragbare Höhe. Die zur Verfügung stehenden Mittel erlaubten Felduntersuchungen mit bis zu vier Mitarbeitern und damit die vollständige Beobachtung von Kursen mit bis zu vier Türen. Für längere Kurse wurde das im nächsten Abschnitt beschriebene Computerprogramm entwickelt.

5.31.2 Umfang der Messungen und Durchführung

Die Auswertung der Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse wurde für die Messfahrten von Genf, Grenoble sowie Basel durchgeführt und damit Fahrzeuge mit drei beziehungsweise vier Türen erfasst. Die übrigen Messfahrten eigneten sich für diese Fragestellung nicht. Die Belastung durch die Beobachtung einer Türe erlaubte es leider nicht, dass eine Messperson zusätzlich die Gesamtfahrgastwechselzeit erfasste. Es wurde daher bei der Auswertung die Annahme getroffen, dass die am längsten geöffnete Türe jeder Haltestelle jeweils gerade die Gesamtfahrgastwechselzeit wiedergibt. Diese Vereinfachung erschien verantwortbar, weil es sich bei der längstgeöffneten Türe meist um jene mit dem grössten Andrang handelte, welche sich aufgrund dessen in der Regel auch als erste öffnet. Die Fahrgastwechselzeit pro Person ergab sich als Division der Fahrgastwechselzahl des ganzen Kurses durch die Fahrgastwechselzeit an der längstgeöffneten Türe.

5.32 Entwicklung des Computerprogrammes ACoST.NeXT

5.32.1 Veranlassung und Auftrag

Die manuelle analytische Errechnung der Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses auf der Basis der Wahrscheinlichkeitsrechnung gemäss Abschnitt 2.33 ist unter gewissen Voraussetzungen möglich, aber ausserordentlich aufwendig. Im Rahmen einer Nebenfach-Semesterarbeit der Abteilung IIC für Informatik der ETH Zürich bot sich im Wintersemester 1992/1993 die Gelegenheit, zwei Studenten mit der Erarbeitung eines entsprechenden Computerprogrammes zu beauftragen. Dieses sollte es erlauben, die Einsteigezeit an einer Haltestelle für beliebige Fahrzeugtypen und frei wählbare Fahrgastverteilungen auf dem Perron zu ermitteln. Als Komponenten wurden namentlich verlangt:

- *Eingabeteil:* Die Benutzerschnittstelle zur Eingabe der Parameter sollte graphisch orientiert sein.
- *Berechnungsteil:* Die Berechnung sollte wenn möglich analytisch erfolgen. Der Übergang auf die Simulation blieb für den Fall vorbehalten, dass analytische Verfahren versagen.
- *Ausgabeteil:* Für die errechnete Fahrgastwechselzeit waren mindestens der Erwartungswert und die Streuung in numerischer sowie die Wahrscheinlichkeitsdichte in graphischer Form auszugeben.

Gemäss Vorgabe der Semesterarbeit war das Programm auf dem Computer NeXT mittels NeXT-Step zu erstellen [416]. Verzichtet wurde auf die Betrachtung der Aussteigevorgänge, da andernfalls ein hoher zusätzlicher Aufwand ohne wesentliche neue Erkenntnisse entstanden wäre. Das etwas schnellere Aussteigen kann durch eine nach oben korrigierte Türleistungsfähigkeit berücksichtigt werden.

5.32.2 Programmspezifikation

5.32.21 Programmstruktur

Als Basis des Programms ACoST.NeXT (Advanced Calculation of Service Time auf NeXTStep) war zunächst ein Modell der Realität mit den erforderlichen Vereinfachungen zu bilden.

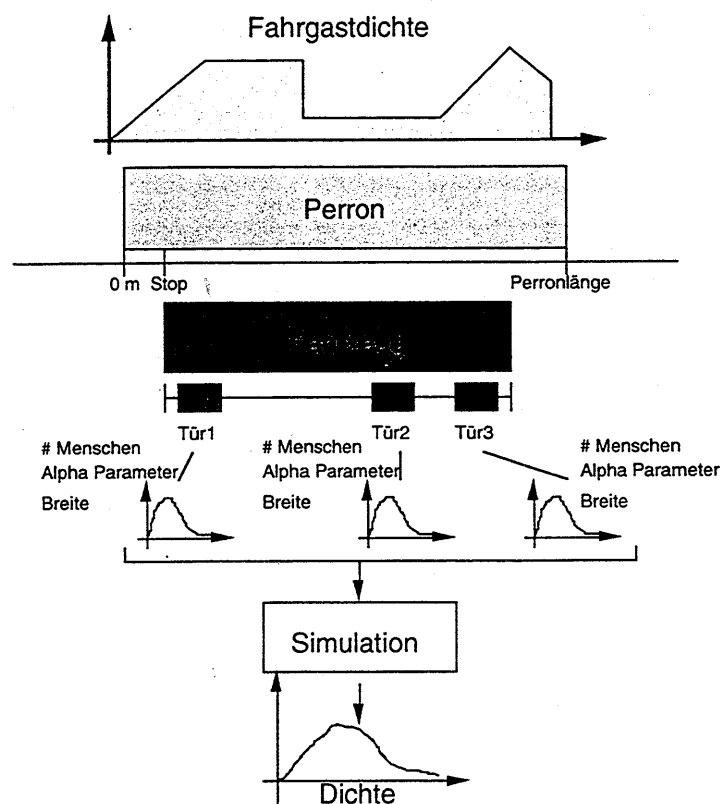


Abb. 5-10: Logisches Modell, welches dem Berechnungsprogramm für die Einsteigezeit zugrundelag [416].

Die Verteilung der Fahrgäste auf der Haltestelle ist praktisch nicht geschlossen in Abhängigkeit von den Zugangsverhältnissen und der Haltestellenausstattung darstellbar. Als Behelfsgröße wird die Fahrgastlängsdichte [P/m'] auf dem Perron verwendet, wobei der Dichteverlauf mittels Polygonzug angenähert wird. Es wird vorausgesetzt, dass die Fahrgäste die jeweils nächstliegende Türe benutzen, sodass die Grenze der Einzugsgebiete in der Mitte der beiden Türen zu liegen kommt. Auf die Abbildung des Ausweichens von Fahrgästen auf wenig belastete Türen musste verzichtet werden, da dies den Übergang von der analytischen Berechnung auf die Simulationstechnik verlangt hätte. Zur Umsetzung des logischen Modells in ein Datenmodell wurde für die Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron ein Verteilungseditor und für die Charakteristiken des Fahrzeuges ein Fahrzeugeditor geschaffen. Ein dritter Programmblock umfasst die Berechnung und ein vierter schliesslich die Resultatsausgabe.

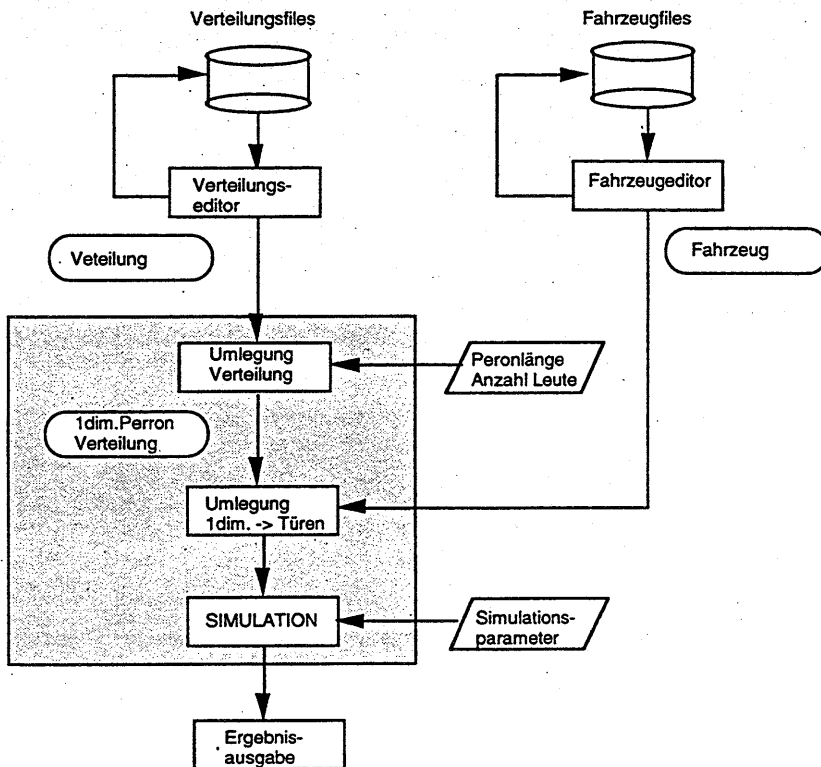


Abb. 5-11: Datenmodell für Verteilung, Fahrzeug und Berechnung [416].

5.32.2 Berechnungsalgorithmen

Der Berechnungsteil basiert auf den in Abschnitt 2 dargestellten statistischen Gesetzmässigkeiten, wobei die Integrationen numerisch gelöst wird. Bei der Zuteilung der Personen auf die einzelnen Türen wurde ein Rundungsalgorithmus vorgesehen, sodass jede Türe mit ganzzahligen Fahrgästen belastet wird. Die Türleistungsfähigkeiten werden angenommen als Erlang-k-verteilt mit $k = 2$ oder optional als normalverteilte Zufallsgrösse mit frei wählbarem Verhältnis zwischen Standardabweichung und Erwartungswert.

5.32.3 Anwendung

Vom Anwender verlangt das Programm die Definition des Kurses und die Fahrgastlängsdichte auf dem Perron:

- **Definition des Kurses:** Der Kurs ist bestimmt durch seine Länge, die Lage der Türachsen in Bezug auf den Anfang des Kurses, die Breite der Türen sowie den Erwartungswert und die Streuung der spezifischen Leistungsfähigkeit. Die Türen werden auf dem Bildschirm dargestellt und können mit dem Cursor bewegt werden.

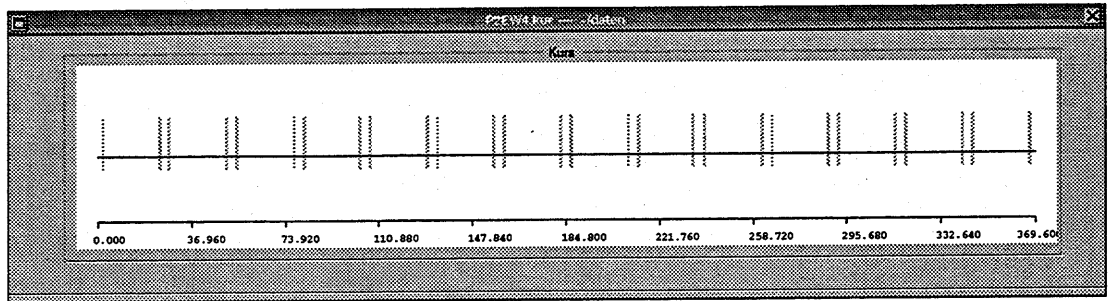


Abb. 5-12: Benutzeroberfläche bei der Definition des Kurses (Fahrzeueditor).

Fahrgastverteilung auf dem Perron: Zur Vereinfachung wurde auf eine zweidimensionale Definition der Fahrgastverteilung auf der Perronfläche verzichtet. Getrennt wurden ausserdem die Eingabe der relativen Verteilung und der absoluten Zahl der Fahrgäste. Zunächst wird mittels eines Polygonzuges die gewünschte relative Längsverteilung der Fahrgäste eingegeben. Die absolute Fahrgastwechselzahl wird vom Programm erst im Berechnungsblock erfragt. Die Umrechnung der Fahrgastwechselzahl auf die absolute Fahrgastlängsdichte übernimmt das Programm.

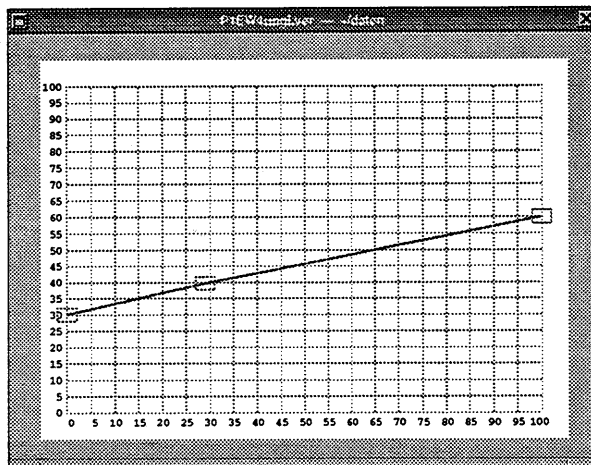


Abb. 5-13: Benutzeroberfläche bei der Eingabe der Dichte der wartenden Fahrgäste (Verteilungseditor).

Verschiedene Kurse und Fahrgastverteilungen können beliebig kombiniert werden. Es ist dadurch möglich, den Einfluss verschiedener standardisierter Verteilungen auf ein bestimmtes Fahrzeug oder die Auswirkung veränderter Türanordnungen bei einer bestimmten Fahrgastverteilung zu untersuchen. Um eine Berechnung durchzuführen sind ein Fahrzeug und eine Fahrgastverteilung auszuwählen und die Fahrgastwechselzahl vorzugeben. Weitere Arbeiten werden vom Anwender nicht verlangt. Das Programm liefert den Erwartungswert und die Streuungsmasse der Einsteigezeit als numerische Werte sowie die Dichtefunktion als Graphik.

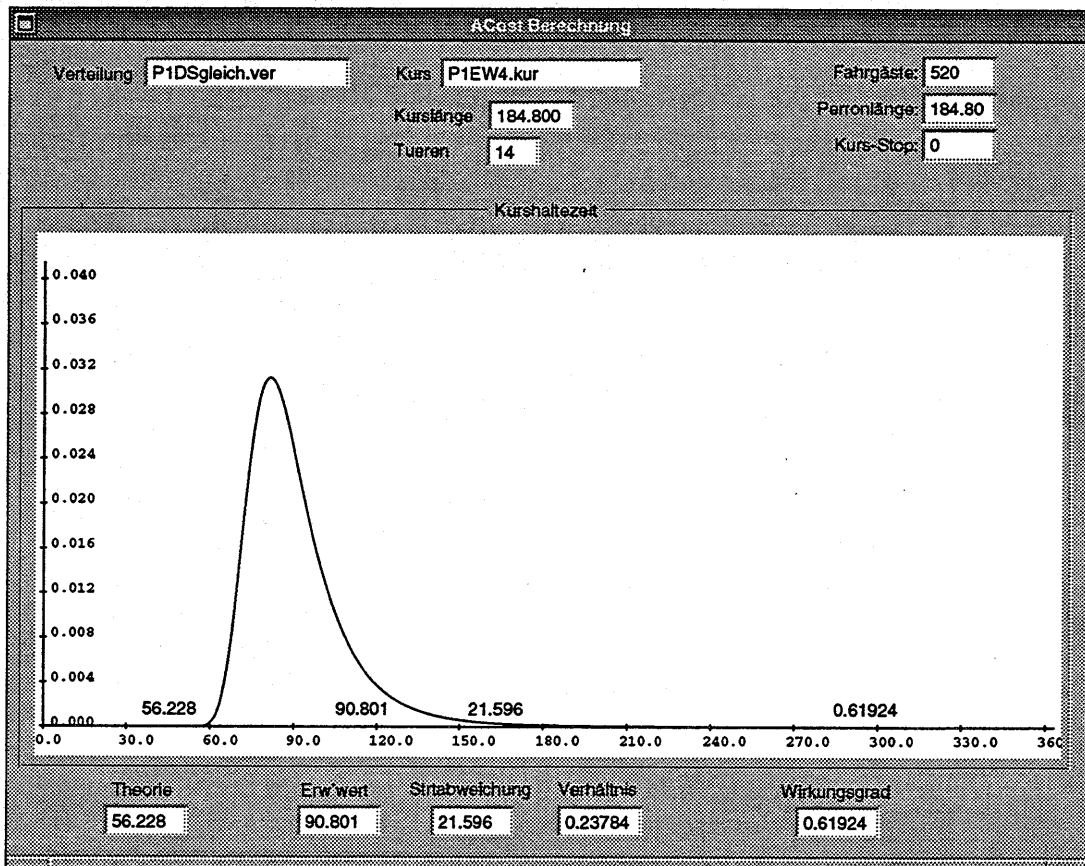


Abb. 5-14: Benützeroberfläche beim Berechnungsvorgang und der Resultatsausgabe.

5.4 Fahrgastwechselzahlen einer Fahrt

5.4.1 Messfahrten

Zur Erhebung der Fahrgastwechselzahlen einer ganzen Fahrt konnten strenggenommen nur diejenigen Messfahrten genutzt werden, bei welchen der gesamte Kurs während der ganzen Fahrt beobachtet werden konnte. Diese zwei Bedingungen wurden nur bei den Messfahrten von Grenoble und Basel erfüllt. Mit gewissen Einschränkungen nutzbar waren auch die Messfahrten in Genf, wo zwar nur ein Fahrzeug der Doppeltraktion erfasst werden konnte, wo aber immerhin die Fahrt über die ganze Strecke verfolgt wurde und ein Fahrgastaustausch zwischen den zwei Fahrzeugen, welcher das Resultat verfälscht hätte, nicht möglich war.

5.4.2 Vorgehen und Umfang

Da sämtliche Ein- und Aussteiger an allen Türen und an jeder Haltestelle auch bei sehr kleinen Fahrgastwechselzahlen und bei Zeitfehlmessungen registriert wurden, fielen die Fahrgastwechselzahlen ohne Zusatzaufwand an. Aus der Differenz der Ein- und Aussteiger konnte für jeden

Haltestellenabschnitt die Belegung des Fahrzeuges errechnet werden, womit auch der meistbelastete Querschnitt gegeben war. Mit diesen Basisdaten liess sich die Häufigkeitsverteilung der Fahrgastwechselzahlen an den Haltestellen, bezogen auf die Höchstbelastung während der betreffenden Kursfahrt, errechnen.

5.5 Verteilung der Fahrgäste im Fahrzeug

5.5.1 Zweck

Die Zählung der Fahrgäste in den einzelnen Fahrzeugbereichen verfolgte den Zweck, die Gesetzmässigkeiten des Fahrgastverhaltens im Fahrzeug genauer kennenzulernen. Namentlich von Interesse waren die effektiv erzielten Stehplatzbelegungsgrade der verschiedenen Flächen und die Belegung der Stauräume bei den Türen in Funktion der Gesamtbesetzung des Fahrzeuges, dies als Grundlage zur Berücksichtigung des Rückstaus beim Fahrgastwechsel.

5.5.2 Vorgehen und erfasste Fahrzeuge

5.5.2.1 Vorgehen

Die Fahrgäste wurden bei den Messungen in Genf, Grenoble, Basel und München zwischen jeder Haltestelle getrennt nach ihrem Aufenthaltsort im Fahrzeug gezählt. Dazu wurden die Fahrzeuge in Bereiche unterschiedlicher Qualität unterteilt. Zunächst wurden die direkten Türauffangräume ausgeschieden und anschliessend der Rest des Fahrzeuges entsprechend den ungefähren Einzugsgebieten der Türen und den Möglichkeiten der Zählung gegliedert. Getrennt wurden im weiteren die Sitzplätze und die Stehplatzbereiche. Die Zählung der Fahrgäste war vorzunehmen, wenn die frisch zugestiegenen Fahrgäste ihren Platz gefunden hatten und die aussteigewilligen Fahrgäste noch nicht aufgestanden waren. Gerade bei hohen Frequenzen herrschte während der gesamten Fahrt eine gewisse Unruhe, weshalb dem Messpersonal in diesen Fällen ein Ermessensspielraum zukam.

5.5.2.2 Erfasste Fahrzeuge

Bei der Baureihe 420 war die Zählung auch bei hoher Besetzung leicht möglich, da der gesamte zugeteilte Fahrzeugraum vom Aufenthaltsort des Messpersonals gut überblickt werden konnte. Bei den Doppelstockwagen liessen sich die Fahrgäste in den beiden Geschossen nicht genau zählen, weshalb sich das Messpersonal zwischen den Haltestellen jeweils ins Unter- und Obergeschoss begeben musste. Bei starker Fahrzeugbesetzung war dies wegen Überfüllung der Einstiegsräume und kurzer Haltestellenabstände im Kernbereich nicht möglich, weshalb gerade der interessanteste Teil der Fahrt nicht exakt erfasst werden konnte. Mit Stichproben und Plausibilitätsüberlegungen war eine ersatzweise Abschätzung vorzunehmen.

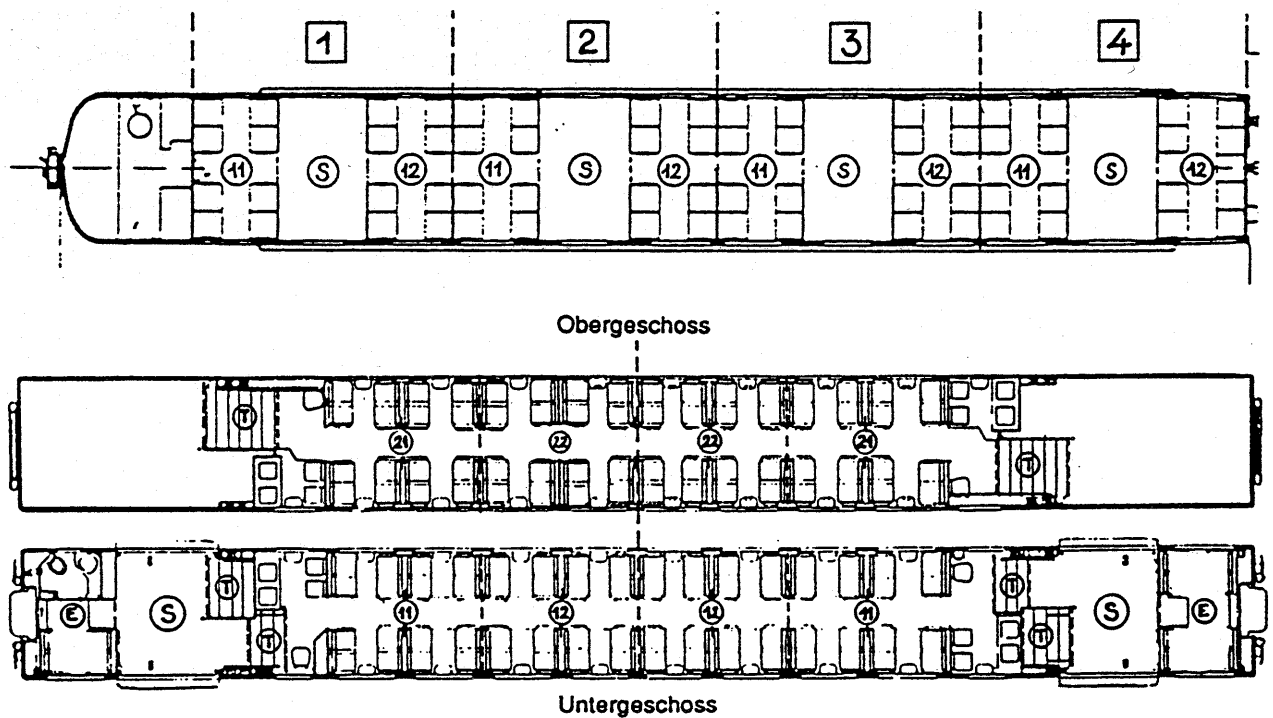


Abb. 5-15: Fahrzeugaufteilung zur Fahrgastzählung bei der S-Bahn München; BR 420 (oben) und Doppelstockwagen der NS (unten).

Bei den Stadtbahnwagen von Genf und Grenoble richtete sich das Interesse vor allem auf die Belegung der Tür Räume und der Endabteile. Die Belegung der restlichen Fahrzeugbereiche wurde nachträglich rechnerisch abgeschätzt.

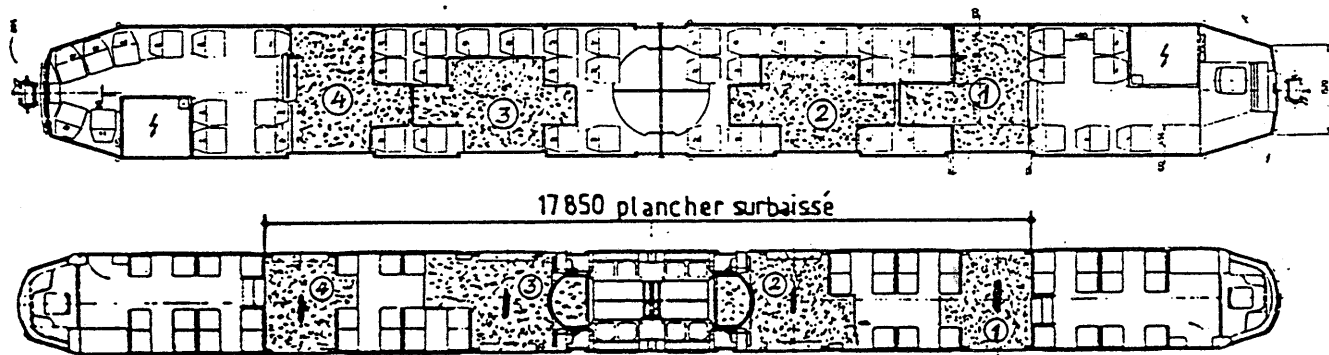


Abb. 5-16: Fahrzeugaufteilung zur Fahrgastzählung bei den Niederflurstrassenbahnen von Genf (oben) und Grenoble (unten).

Die Busse der BVB wurden in sechs beziehungsweise sieben Aufenthaltsbereiche eingeteilt. Eine noch feinere Unterteilung hätte den Erhebungs- und Auswertungsaufwand im Vergleich zur zusätzlichen Aussage übermäßig gesteigert. Es zeigte sich ausserdem, dass bei den kurzen Haltestellenabständen bereits bei mittlerer Auslastung höchstens etwa vier Sektoren von einer Messperson ausgezählt und protokolliert werden konnten und dass sich in dieser Situation zusätzlich die Übersicht über das Fahrzeug deutlich verschlechterte.

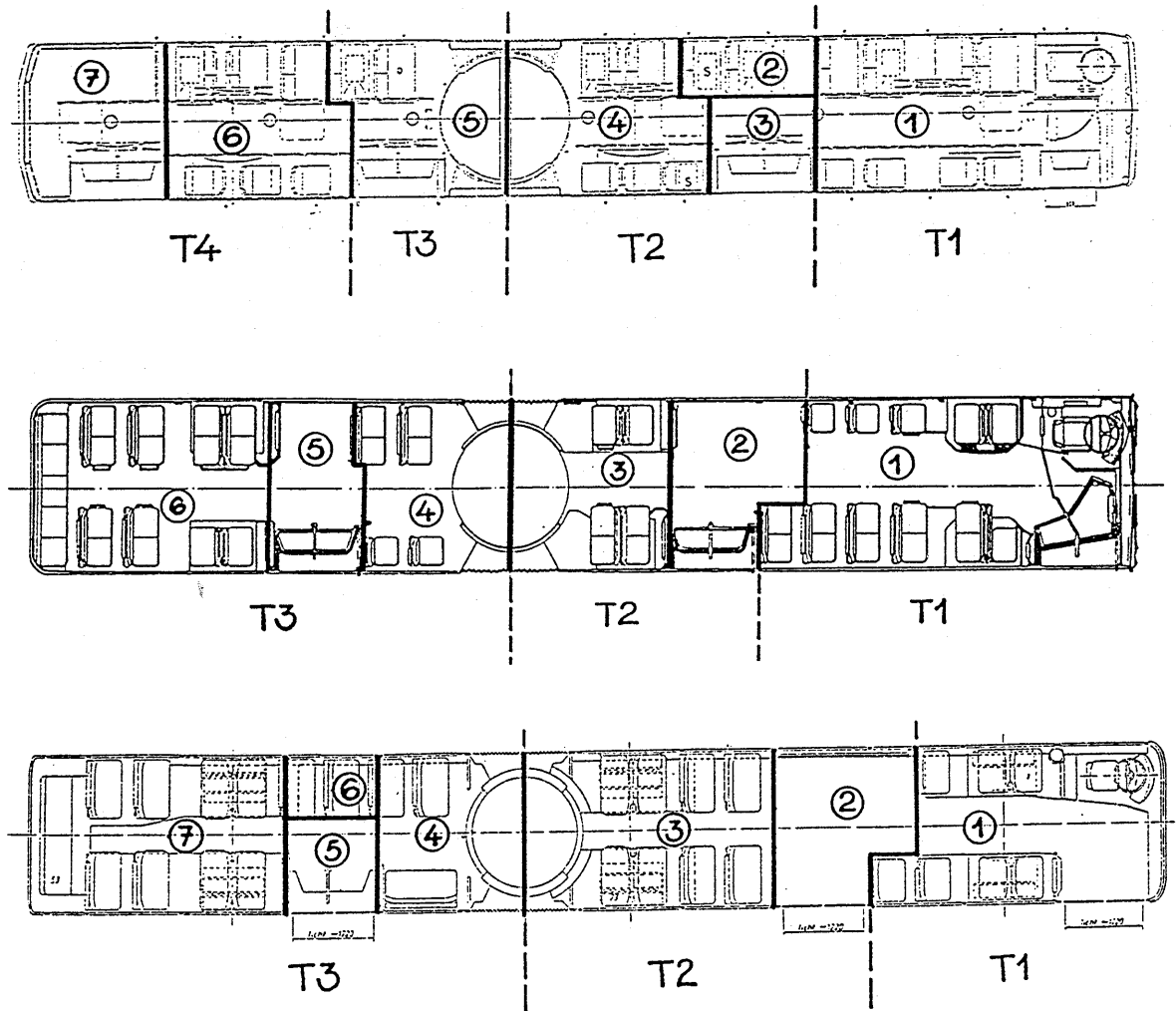


Abb. 5-17: Fahrzeugaufteilung zur Fahrgastzählung bei den Gelenkbussen in Basel. Serie 911 ff. (oben), Serie 921 f. (Mitte) und Niederflurgelenkbus MAN-NG 272 (unten).

5.52.3 Auswertung

Die Korrelationsrechnung für die Abhängigkeit der Sektorbelegung von der Gesamtauslastung des Fahrzeuges wurde mit dem Rechenprogramm Cricket Graph durchgeführt.

6 Die Fahrgastwechselzeit

6.1 Überblick über die Einflussgrößen und Zusammenhänge

6.1.1 Einleitung

6.1.1.1 Vorbemerkung

In den Abschnitten 2 bis 5 wurden der Ablauf des Fahrgastwechsels dargestellt, die vier betroffenen Systemkomponenten Fahrgast, Anlage, Fahrzeug und Betrieb näher beleuchtet, die bisherigen Erkenntnisse zum Fahrgastwechsel zusammengefasst und das Vorgehen bei den eigenen Untersuchungen kurz erläutert. Der vorliegende Abschnitt 6 bezweckt nun einen detaillierten Überblick über die wesentlichen Punkte der vorangehenden Kapitel, stellt die Verbindung zwischen anderen Untersuchungen und den eigenen Messungen her, quantifiziert die postulierten Gesetzmässigkeiten mit dem Ziel der Schaffung von Hilfsmitteln für praktische Anwendungen und enthält die Folgerungen, welche für die beteiligten Systemkomponenten abzuleiten sind. Er soll eine weitgehend geschlossene Erörterung der Thematik sein, zum Preis einiger unerlässlicher Wiederholungen aus früheren Abschnitten. Verzichtet wird auf die nochmalige Definition der Begriffe und die Herleitung der Gesetzmässigkeiten mit deren ausführlicher Begründung. Ein Kurzüberblick über die wichtigsten Punkte der Untersuchung findet sich im Abschnitt 7.

6.1.1.2 Der Fahrgastwechsel im Rahmen der Betriebsplanung und Betriebsführung

Zusammen mit den festen Haltezeitanteilen, der Fahrzeit, der Verlustzeit und den Wendezeiten bildet die Fahrgastwechselzeit einen Bestandteil der Umlaufzeit eines Kurses. Die Kenntnis ihrer Grösse ist für die Betriebsplanung und Betriebsführung unerlässlich. Beeinflusst wird der Fahrgastwechsel durch die Systemkomponenten Fahrgast, feste Anlagen, Fahrzeug und Betrieb, wirkt aber auch seinerseits auf diese Systemkomponenten zurück. Drei Arten von Fahrgastwechselzeiten sind auseinanderzuhalten:

- *Fahrgastwechselzeit an der einzelnen Türe:* Für sich allein ist die Fahrgastwechselzeit an einer Einzeltüre zwar nur von beschränktem Interesse, doch ist sie eine entscheidende Eingangsgrösse für die Berechnung der Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse. Jede der Türen ist definiert durch ihren Anteil am Fahrgastwechsel des Kurses sowie durch den Erwartungswert und die Streuung ihrer spezifischen Leistungsfähigkeit in Funktion der Einflussfaktoren.
- *Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses:* Die Fahrgastwechselzeit eines Kurses mit ihrem Erwartungswert und ihrer Streuung ist eine zentrale Kennzahl der Betriebsplanung und Betriebsführung. Sie bestimmt namentlich die Leistungsfähigkeit stark belasteter Streckenabschnitte mit. Ein Kurs verfügt zum Austausch der Fahrgäste meist über mehrere Türen, welche in der Regel freizügig verwendet werden können. Eine Ausnahme bilden Kurse mit Fahrgastabfertigung im Fahrzeug sowie Kurse, bei welchen die Türbenützung nur in einer Richtung gestattet ist. Massgebend für die Dauer des Fahrgastwechsels ist die am längsten geöffnete Türe, welche nicht in jedem Fall die statistisch meistbelastete sein muss.
- *Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt:* Die Summe der Fahrgastwechselzeiten aller Halte bildet die Gesamtfahrgastwechselzeit. Die Gesamtfahrgastwechselzeit stellt na-

men mit der Fahrzeit die Hauptbestimmungsgrösse für die Beförderungsgeschwindigkeit und die Effizienz des Fahrzeug- und Personaleinsatzes.

6.12 Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre

6.12.1 Berechnung der Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre

Ein Fahrzeugeinstieg lässt sich als Engpass verstehen, weshalb der Fahrgastwechsel an einer Einzeltüre im wesentlichen den Gesetzmässigkeiten des Fussgängerverkehrs folgt, zumindest solange man sich auf Einstiege ohne Abfertigung beschränkt. Die Fahrgastwechselzeit ist definiert als die Zeit, während welcher sich Fahrgäste durch den Querschnitt einer Türe bewegen. Nicht unter diesen Begriff fallen die Zeit für das Öffnen und Schliessen der Türen sowie die übrigen festen Haltezeitanteile. Damit errechnet sich der erforderliche Zeitaufwand einer Fahrgastgruppe für das Durchschreiten einer Türe mittels folgender Grundbeziehung:

$$(6-1) \quad t_{h,f} = F \cdot t_{h,fs} = \frac{F}{L_T}$$

wobei	$t_{h,f}$	Fahrgastwechselzeit an einer Einzeltüre [s]
	F	Fahrgastwechselzahl der Einzeltüre [P]
	L_T	Leistungsfähigkeit der Einzeltüre [P/s]

Fahrgäste bewegen sich bei einem Fahrzeugeinstieg hochgradig ungeordnet. Selbst die Fahrgastwechselzeit eines einzelnen Fahrgastes ist nicht ein fester Wert, sondern eine Zufallsgrösse, welche einer bestimmten Verteilungsfunktion gehorcht. Das Verhalten ist damit einer quantitativen Behandlung schwer zugänglich und erfordert eine statistische Betrachtungsweise. Die Fahrgastwechselzeit einer bestimmte Fahrgastgruppe ist daher durch den Erwartungswert, die Verteilungsfunktion beziehungsweise die Dichte und das Streuungsmass gegeben. Der Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit einer Fahrgastgruppe lautet:

$$(6-2) \quad t_{h,f} = F \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot p(x) dx$$

wobei	$t_{h,f}$	Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit an einer Einzeltüre [s]
	$p(x)$	Dichte der Zufallsvariablen der spezifischen Fahrgastwechselzeit

Die Dichte der spezifischen Fahrgastwechselzeit kann symmetrisch sein oder eine Schiefe aufweisen. Analog zur spezifischen Fahrgastwechselzeit ist auch deren Kehrwert, die Türleistungsfähigkeit, zufallsverteilt.

6.12.2 Einflüsse auf die Fahrgastwechselzeit an einer Einzeltüre

6.12.21 Systematik der Einflüsse

Die Einflüsse auf die Fahrgastwechselzeit an einer einzelnen Türe, welche den Erwartungswert, die Streuung und die Wahrscheinlichkeitsdichte der Fahrgastwechselzeit bestimmen, lassen sich bei Einstiegen ohne kommerzielle Abfertigung in folgende drei Hauptgruppen gliedern:

- *Eigenschaften der Fahrgäste:* Die Fahrgäste unterscheiden sich bezüglich ihrer körperlichen Eigenschaften wie Geschlecht, Alter, Grösse, Gesundheitszustand, Charakter und Temperament, Stimmungslage und Belastung durch Gepäck.
- *Begleitumstände des Fahrgastwechsels:* Das Verhalten der Fahrgäste wird weiter beeinflusst durch die Begleitumstände des Fahrgastwechsels, namentlich den Verkehrszweck, die Tageszeit, die Witterung und das Klima, den Besetzungsgrad des Fahrzeuges sowie den Grad der Behinderung durch Fahrgäste, welche sich in entgegengesetzter Richtung bewegen.
- *Einstiegsgestaltung:* Die wesentlichen Kenngrössen eines Fahrzeugeinstieges sind seine Einstiegshöhe und seine Türbreite, aber auch die Treppenneigung, die Haltemöglichkeiten, die Beleuchtung und die Beschaffenheit des Fussbodens. Im weiteren Sinn gehören dazu die Grösse der Türstauräume und die Abflussmöglichkeiten ins Fahrzeuginnere.

Bei kommerzieller Abfertigung an einer Türe wie Fahrausweisverkauf und -kontrolle kommen Faktoren wie die individuelle Arbeitsgeschwindigkeit, der Anteil der Fahrausweiskategorien und das Verhalten der Fahrgäste bei der Abfertigung hinzu. Wesentlich für den Zeitbedarf ist aber auch die Zahl der pro Fahrausweisverkauf ablaufenden Handlungen.

Tab. 6-1: Einflussfaktoren auf die mittlere Fahrgastwechselzeit einer Einzeltüre beziehungsweise auf deren spezifische Leistungsfähigkeit.

Eigenschaften der Fahrgäste	Begleitumstände des Fahrgastwechsels	Einstiegs- und Perrongestaltung
Geschlecht Alter Grösse Gesundheitszustand Erholungsgrad Charakter, Temperament Stimmungslage Zeitdruck Gepäckbelastung Körperliche Behinderungen Gewohnheiten Vertrautheit mit dem System	Verkehrszweck Jahreszeit Wochentag Tageszeit Klima Witterung Höhenlage über Meer Besetzungsgrad des Kurses Bewegungsrichtung Gegenseitige Behinderung Fahrgastwechselzahl	Perronhöhe Wagenbodenhöhe Türbreite Abflussmöglichkeiten Perron Fahrgastfluss im Fahrzeug Spaltbreite Perron-Trittbrett Einstiegswinkel, Ergonomie Festhaltungsmöglichkeiten Beleuchtung Oberflächenzustand

Während sich die Eigenschaften der Fahrgäste von Individuum zu Individuum unterscheiden, betreffen die Begleitumstände des Fahrgastwechsels alle Fahrgäste einer beteiligten Fahrgastgruppe in gleicher Weise. Die Einstiegsgestaltung schliesslich beeinflusst den Fahrgastwechsel unbe-

sehen der Zusammensetzung der Fahrgastgruppe und der äusseren Bedingungen. Von den drei Gruppen sind die Eigenschaften der Fahrgäste und die Begleitumstände des Fahrgastwechsels vom Betreiber nicht zu steuern. Hingegen kann er über die Einstiegsgestaltung des Fahrzeuges und die Höhenlage des Perrons den Ablauf des Fahrgastwechsels mitbeeinflussen, weshalb die Frage der Einstiegs- und Perrongestaltung für ihn im Zentrum des Interesses steht.

6.12.22 Zusammenhänge zwischen den Einflussgrössen

Die meisten Einflüsse sind untereinander verknüpft. Oftmals wirkt ein bestimmter Einflussfaktor direkt, gleichzeitig aber auch indirekt über einen von ihm mitbestimmten anderen Faktor auf die Fahrgastwechselzeit ein.

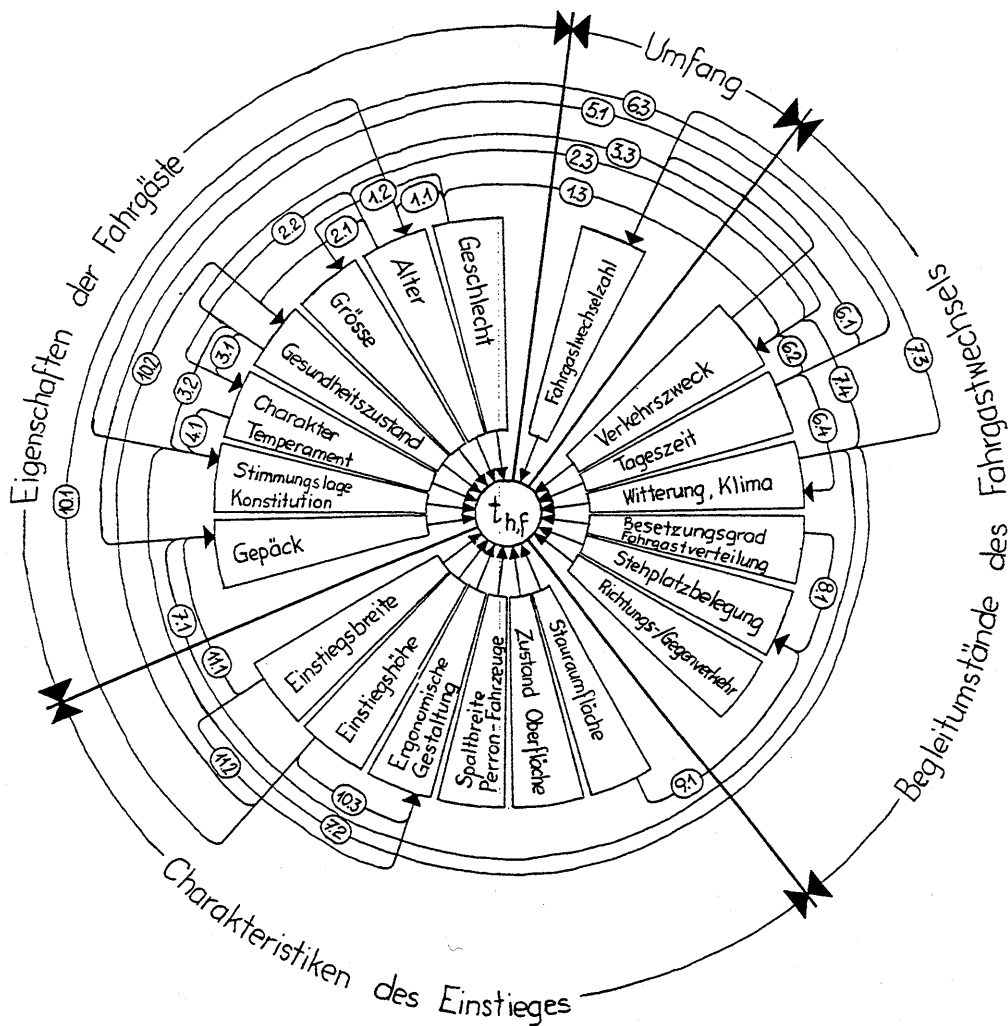


Abb. 6-1: Einflussfaktoren auf die Fahrgastwechselzeit an einer Einzeltüre und gegenseitige Abhängigkeiten (Erläuterungen siehe folgende Seiten!).

Im wesentlichen und zunächst rein qualitativ lassen sich die gegenseitigen Verknüpfungen folgendermassen charakterisieren:

1. Das *Geschlecht der Fahrgäste* beeinflusst Altersverteilung (1.1) und Körpergrösse (1.2). Frauen leben länger als Männer, sind aber kleiner und weniger kräftig. Im Durchschnitt dürften die weiblichen Fahrgäste daher eher etwas älter und langsamer sein als die Männer. Noch immer unterscheidet sich die Berufstätigkeit von Mann und Frau, weshalb die Geschlechtszugehörigkeit auch ein Einflussfaktor für den Verkehrszweck ist (1.3).
2. Mit dem *Alter der Fahrgäste* hängen zunächst der Gesundheitszustand (2.1) und das Temperament (2.2) zusammen. Ältere Menschen sind eher weniger gesund und in ihrem Verhalten ruhiger. Ebenfalls stark mit dem Alter verknüpft ist der Verkehrszweck (2.3), indem die Fahrten junger Menschen häufig dem Ausbildungsverkehr zuzuordnen sind, jene der 20- bis 65-jährigen dem Berufs- und Werksverkehr sowie jene der über 65-jährigen dem Ausflugsverkehr.
3. Der *Gesundheitszustand* ist mitbestimmend für das Temperament (3.1) und die Stimmungslage (3.2). Im weiteren ist der Anteil der Berufstätigen unter den Gesunden wesentlich höher als unter den Gebrechlichen (3.3).
4. Das *Temperament* beeinflusst die Stimmungslage (4.1).
5. Der Verkehrszweck ist die massgebliche Einflussgrösse für die Gepäckmitnahme (5.1). Schüler oder Studenten führen meist eine Tasche mit sich, Mütter sind oft mit einem Kinderwagen unterwegs und ältere Menschen gehen am Stock.
6. Eine wesentliche Steuergrösse für Fahrgastwechselzahl, Verkehrszweck, Stimmungslage/Konstitution der Fahrgäste und für das Klima stellt die *Tageszeit* dar. Zunächst schwankt das Fahrgastaufkommen im Verlaufe eines Tages (6.1) und gleichzeitig verschieben sich die Verkehrszwecke (6.2), was beim Berufspendlerverkehr am augenfälligsten ist. Abhängig sind infolge tagesperiodischer Leistungsschwankungen des Menschen zudem dessen Stimmungslage und körperliche Konstitution (6.3) sowie schliesslich die Umgebungstemperatur beziehungsweise das Aussenklima (6.4).
7. *Witterung und Klima* sind für eine unterschiedliche Belastung der Fahrgäste durch Gepäck, namentlich durch Regenschirme, mitverantwortlich (7.1). Sie beeinflussen zusätzlich die Stimmungslage der Fahrgäste sowie deren körperliche Konstitution über die Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse (7.2). Einige Verkehrszwecke sind witterungsabhängig, namentlich der Ausflugsverkehr, sodass die Witterung auch auf die Fahrgastwechselzahl (7.3) und die Zusammensetzung der Verkehrszwecke (7.4) einwirkt.
8. Der *Besetzungsgrad des Fahrzeuges* und die *Verteilung der Fahrgäste* sind entscheidend für den örtlichen Stehplatzbelegungsgrad im Fahrzeug (8.1).

9. Die *Stauraumgrösse im Fahrzeug und auf dem Perron* bestimmt bei gegebener Fahrgastwechselzahl die auftretende Fahrgastdichte (9.1) und damit die dadurch hervorgerufene Behinderung des Fahrgastwechsels.
10. Die *Einstiegshöhe*, vor allem die Ausführung des Einstieges als Treppe oder ebener Durchgang, erleichtert oder erschwert die Benützung der Türe, namentlich für gehbehinderte (10.1) und ältere (10.2) Menschen. Eine gute Einstiegsgestaltung ohne Höhendifferenz führt zu einem erhöhten Anteil älterer und behinderter Fahrgäste und umgekehrt. Je kleiner die Höhendifferenz ist, desto grösser ist zudem der Spielraum für eine ergonomisch günstige Einstiegsgestaltung (10.3).
11. Nur bei bestimmten *Einstiegsbreiten* können Kinderwagen oder Rollstühle verladen werden (11.1). Ausserdem wird die ergonomische Gestaltung durch die Breite der Türe beeinflusst (11.2).

Es ist im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich, die vielfältigen Zusammenhänge umfassend zu quantifizieren, weshalb sie sich darauf beschränkt, Anhaltspunkte zu den wesentlichsten Punkten zu gewinnen. Die Auswirkungen vieler Einflüsse werden zumindest teilweise über die Streuung berücksichtigt.

6.12.3 Streuung der Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre

Die Streuung der Fahrgastwechselzeit an einer einzelnen Türe ist für den Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit des Türsystems und in Bezug auf die Streuung der Fahrgastwechselzeit des Kurses von Bedeutung. Ihr Ausmass ist eine Folge von Unregelmässigkeiten des Fahrgastwechselforganges und ist ein Hinweis auf die Regelmässigkeit des Fahrgastwechsels. Eine tiefe Streuung an jeder einzelnen Türe trägt nicht nur zur Verstetigung des Betriebsablaufes bei, sondern auch zur Senkung der mittleren Fahrgastwechselzeiten des Kurses. Ein idealer Fahrgastwechselforgang mit minimaler mittlerer Fahrgastwechselzeit und maximaler Türleistungsfähigkeit ist gekennzeichnet durch eine in ihrem Verhalten homogene Fahrgastgruppe und durch die Ausnützung sämtlicher Zeitlücken am Einstieg zwischen erstem und letztem Fahrgast. Beides trifft in der Realität nicht zu:

1. *Zusammensetzung der Fahrgastgruppen:* Keine Fahrgastgruppe ist homogen zusammengesetzt und in jeder Gruppe wird es schnellere und langsamere Fahrgäste haben beziehungsweise solche, welche mehr und solche, welche weniger Platz zur Fortbewegung benötigen.
2. *Dichte des Fahrgastzustromes:* Die Zeitlücken an einem Einstieg können nur dann restlos ausgenützt werden, wenn während des gesamten Fahrgastwechselforganges nie der Zustrom massgebend wird. In Wirklichkeit schwellt der Einsteigerzustrom zunächst an und flacht nach einem Maximalwert wieder ab. Ist die Fahrgastwechselzahl insgesamt klein, so wird die Türleistungsfähigkeit gar nicht erreicht und die Fahrgastwechselzeit wird abhängig von den Zufälligkeiten des Eintreffens von Fahrgästen an der Türe.

Beim Aussteigevorgang kann die Kapazität der Wege im Fahrzeuginnern für den Fahrgaststrom massgebend werden, falls deren gesamte Leistungsfähigkeit unter jener des Türquerschnittes liegt. Zu einem diskontinuierlichen Ablauf des Fahrgast-

wechsels führt die Innenraumgestaltung auch, wenn die Fahrgastkolonne infolge der individuell unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeit auseinandergezogen wird und enge Platzverhältnisse ein Überholen langsamer Fahrgäste nicht gestatten. Dadurch entstehen wiederholte ungenützte Zeitlücken. Besonders schwerwiegend wirken sich diesbezüglich enge und schlecht begehbbare Treppen aus.

Die Grösse der Streuung gibt somit zum ersten die Homogenität der Zusammensetzung der Fahrgastgruppe wieder und ist zum zweiten ein Mass für die Regelmässigkeit des Fahrgastflusses als Folge des Fahrzeug- und Perronkonzeptes. Ersteres ist nahezu unbeeinflussbar, da es im wesentlichen durch den Fahrgastmix bestimmt wird. Einzig durch eine gute Information und Führung der Fahrgäste lässt sich deren Verhalten etwas homogenisieren. Die Streuungen durch längere Zugangswege und Kapazitätsrestriktionen im Fahrzeug wie Treppen und Verbindungsgänge sind dagegen durch eine optimierte Fahrzeuggestaltung begrenzt.

6.13 Fahrgastwechselzeit eines Kurses

6.13.1 Berechnung der Fahrgastwechselzeit

Die Fahrgastwechselzeit eines Kurses ist jene Zeit, welche die an einer Haltestelle ein- oder aussteigenden Fahrgäste eines Kurses zur Benützung des Türsystems benötigen. Massgebend dafür ist der Beginn des Fahrgastwechsels an der ersten und das Ende desselben an der letzten Türe. Unterläge der Fahrgastwechelvorgang an den einzelnen Türen keinen Streuungen, so wäre stets die Türe mit der höchsten relativen Türbelastung massgebend. Da die Fahrgäste meist die ihnen nächstgelegene Türe benützen, liesse sich diese mittels ihres Einzugsgebietes bestimmen. Aufgrund der Streuungen ergibt sich die Fahrgastwechselzeit eines Kurses aber aus der Gegenüberstellung von Fahrgastwechselzahl und effektiv genutzter Türleistungsfähigkeit.

$$(6-3) \quad t_{h,f} = \frac{F}{L'_{T,K}}$$

wobei	$t_{h,f}$	Fahrgastwechselzeit des Kurses [s]
	F	Fahrgastwechselzahl des Kurses [P]
	$L'_{T,K}$	Effektive Leistungsfähigkeit des Türsystems des Kurses [P/s]

Diese effektive Türleistungsfähigkeit liegt selbst bei gleichmässiger Verteilung der Fahrgäste unter der theoretischen Leistungsfähigkeit als Summe der Türleistungsfähigkeiten, da sie das Ergebnis einer Anzahl parallel ablaufender Prozesse mit zufallsverteilter Verarbeitungsdauer ist, bestehend aus den Fahrgastwechseln an den einzelnen Türen. Die am längsten geöffnete Türe ist deshalb nicht in jedem Fall die statistisch meistbelastete. Wird beispielsweise die meistbelastete Türe zufälligerweise von schnellen Fahrgästen benützt, zum Beispiel von Schülern, so kann sie sich unter Umständen vor einer weniger beanspruchten Türe schliessen, welche von älteren Menschen begangen wird.

Die Fahrgastwechselzeit eines Kurses lässt sich mit Hilfe der Verteilungsfunktionen der Fahrgastwechselzeiten an den einzelnen Türen ausdrücken, sofern folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- Der Fahrgastwechsel beginnt an jeder Türe gleichzeitig.
- Die Fahrgäste benützen immer die nächstliegende Türe.
- Die Türen sind freizügig benützbar.

Es gilt dann:

$$(6-4) \quad t_{h,f} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot \left(\frac{d}{dx} \prod P_{T,i}(x) \right) dx$$

wobei $P_{T,i}$ Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzeit an der Türe i [s]

Indessen reagieren die Fahrgäste auf die jeweilige Fahrgastwechselsituation, indem sie von überlasteten auf weniger belastete Türen ausweichen, wenn dies ein schnelleres Einsteigen oder einen günstigeren Platz im Fahrzeug verspricht. Bei hoher Auslastung des Kurses kann es ferner zum Rückstau und zur Verlangsamung des Fahrgastwechsels kommen. Die bei einem Fahrgastwechselfvorgang an einer bestimmten Haltestelle auftretenden Phänomene sind somit analytisch nicht vollständig erfassbar. Eine einfache Berechnung der Fahrgastwechselzeit ist solange nicht möglich, als nicht wesentliche Vereinfachungen eingeführt werden. Andernfalls wird der Übergang auf die Simulationstechnik notwendig.

6.13.2 Einflüsse auf die Fahrgastwechselzeit eines Kurses

6.13.21 Systematik der Einflüsse

Die im praktischen Betrieb erzielte effektive Leistungsfähigkeit des Türsystems eines Kurses wird zunächst durch den Fahrgastwechsel an den einzelnen Türen bestimmt, namentlich durch den Erwartungswert und die Streuung. Beide sind für den Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses von Belang. Hinzu kommen folgende Einflüsse:

- *Eigenschaften der Fahrgäste, Ablauf:* Das Verhalten der Fahrgäste entscheidet über die Gleichmässigkeit beziehungsweise Ungleichmässigkeit der Aufteilung des Fahrgastflusses auf die zur Verfügung stehenden Türen und damit über die Überlastung einzelner Durchgänge.
- *Fahrzeuggestaltung:* Die Anordnung der Türen des Fahrzeuges bestimmt deren Auslastungsgrad. Zudem spielt die Innenraumgestaltung bezüglich Stauraumgrösse und Abflusskapazität eine Rolle.
- *Anlagengestaltung:* Die Verteilung der Fahrgäste im Warteraum ist wesentlich, weil die Fahrgäste die ihnen am nächsten liegende Türe auswählen. Damit beeinflusst die Anlagengestaltung in starkem Masse auch die Türbenützung.

Tab. 6-2: Einflussfaktoren auf die mittlere Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses.

Eigenschaften der Fahrgäste Ablauf	Fahrzeuggestaltung	Anlagengestaltung
Erwartungswert an Einzeltüre Streuung an Einzeltüre Ganzzahligkeit des Fahrgast- wechsels Typische Fahrgastverteilung auf dem Perron Typische Fahrgastverteilung im Kurs Zufällige Fahrgastverteilung auf dem Perron Zufällige Fahrgastverteilung im Kurs Zeitpunkt der Anmeldung des Öffnungswunsches Reaktion auf Situation	Anzahl der Türen Fahrzeugkonzept Türverteilung des Kurses Abstimmung des Fassungsver- mögens auf die Türleistungs- fähigkeit Unterscheidung 1./2. Klasse Vorschriften für Türbenützung Innenraumaufteilung Abflussmöglichkeiten	Grösse der Warteraumfläche Ort der Zugänge des Perrons Ausstattung des Perrons

6.13.22 Zusammenhänge zwischen den Einflussgrössen

Wie bei den einzelnen Türen bestehen auch unter den Einflussgrössen auf die Fahrgastwechselzeiten ganzer Kurses vielfältige wechselseitige Abhängigkeiten. Diesen Abhängigkeiten kommt eine besondere Bedeutung zu, da die Einflussfaktoren auf die Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses in ausgeprägterem Masse als bei der Einzeltüre nur indirekt wirken:

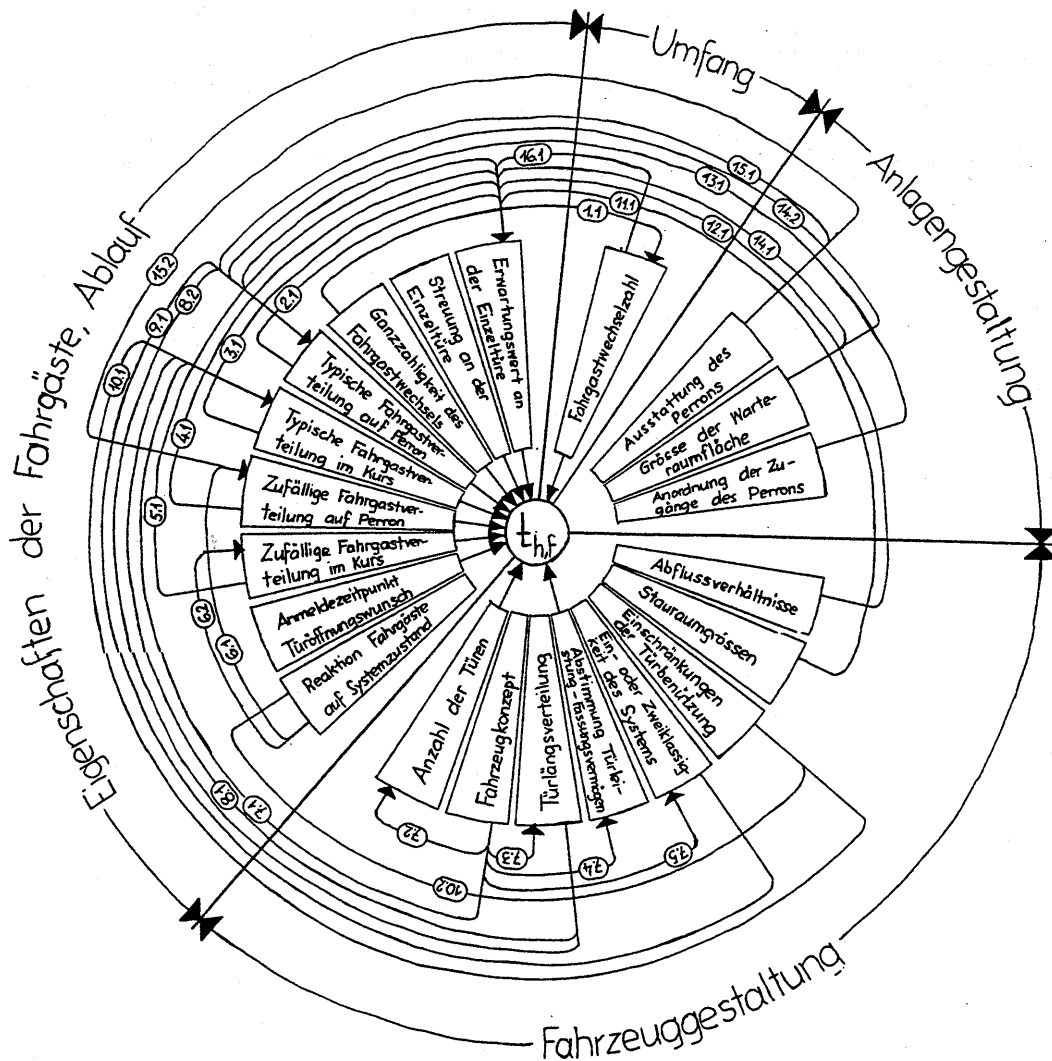


Abb. 6-2: Einflussfaktoren auf die Fahrgastwechselzeit eines Kurses (Erläuterungen siehe folgende Seiten!).

1. **Ganzzahligkeit des Fahrgastwechsels:** Naturgemäss ist der Fahrgastwechsel immer ganzzahlig, weshalb die Fahrgastwechselzahl der einzelnen Türen nur natürliche Werte annehmen kann (1.1).
2. **Typische Fahrgastverteilung auf dem Perron:** Die Fahrgäste verteilen sich in einer bestimmten typischen Weise auf dem Perron. Dies bestimmt die jeweilige Türbelastung und damit auch die spezifische Türleistungsfähigkeit (2.1).
3. **Typische Fahrgastverteilung im Kurs:** In gleicher Weise wie auf dem Perron entscheidet auch im Fahrzeug die Fahrgastverteilung über die Türbelastung und damit über den erzielten Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit an jedem Durchgang (3.1).
4. **Zufällige Fahrgastverteilung auf dem Perron:** Zufällige Einflüsse führen zu einer vom Durchschnitt abweichenden Fahrgastverteilung auf dem Perron. Dies beeinflusst die Türbenutzung und den Erwartungswert der spezifischen Türleistungsfähigkeit (4.1).

5. *Zufällige Fahrgastverteilung im Fahrzeug:* In Analogie zum Perron führen Zufälligkeiten auch zu einer untypischen Verteilung der Fahrgäste im Fahrzeug und zu einer vom Normalfall abweichenden spezifischen Türbelastung (5.1).
6. *Reaktion der Fahrgäste auf den Systemzustand:* Auf eine örtliche Überlastung des Systems reagieren die Fahrgäste, indem sie auf dem Perron (6.1) oder im Fahrzeug (6.2) weniger dicht beanspruchte Bereiche aufsuchen.
7. *Fahrzeugkonzept:* Mit seiner Raumgestaltung und insbesondere der Anordnung und Zugänglichkeit der Sitz- und Stehplatzbereiche bestimmt das Fahrzeugkonzept die typische Fahrgastverteilung im Kurs (7.1). Im weiteren entscheidet die Anordnung der Fahrwerke und die Gliederung des Fahrzeuges über die Zahl (7.2) und Längsverteilung der Türen (7.3), über die Abstimmung von Fassungsvermögen und Türleistungsfähigkeit (7.4) sowie über die Anordnung einer allfälligen 1. und 2. Klasse im Kurs (7.5).
8. *Türlängsverteilung:* Da die Fahrgäste meist in der Nähe der von ihnen benützten Türe verweilen, beeinflusst die Türverteilung auch die Fahrgastverteilung im Fahrzeug (8.1). Die Fahrgäste gewöhnen sich zudem an das auf einer Linie üblicherweise eingesetzte Rollmaterial, weshalb die Türlängsverteilung einen Einfluss auf den Aufenthaltsort der Fahrgäste auf dem Perron hat (8.2).
9. *Ein-/Zweiklassigkeit:* Wenn den Fahrgästen der Standort der 1. beziehungsweise 2. Wagenklasse im Voraus bekanntgegeben wird oder wenn der Halteort der gesuchten Abteile aus Erfahrung bekannt ist, so führt dies zu einer bestimmten Fahrgastverteilung auf dem Perron (9.1).
10. *Einschränkungen in der Türbenützung:* Durch eine Einschränkung der Benützbarkeit von Fahrzeugtüren, zum Beispiel Türen, welche bestimmten Fahrgastkategorien vorbehalten bleiben oder solche, welche nur das Ein- oder Aussteigen gestatten, wird die Fahrgastverteilung im Fahrzeug gesteuert (10.1). Ist den auf dem Perron wartenden Fahrgästen der Ort der mit der Restriktion belegten Türe nicht im Voraus bekannt, so sind sie gezwungen, nach Einfahrt des Kurses eine andere Türe aufzusuchen (10.2).
11. *Stauraumgrößen:* Die Grösse des Stauraumes beeinflusst die Bewegungsmöglichkeiten der Fahrgäste im Türbereich des Fahrzeuges sowie die Menge der Fahrgäste, welche ohne Rückstaugefahr das Fahrzeug betreten können. Dadurch wird der Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit mitbestimmt (11.1).
12. *Abflussmöglichkeiten:* In ähnlicher Weise wie mit der Stauraumgrösse verändert sich die Rückstaugefahr im Fahrzeug auch mit besseren oder schlechteren Abflussverhältnissen (12.1).
13. *Anordnung der Zugänge zum Perron:* Die Fahrgäste haben die Tendenz, in der Nähe der Perronzugänge zu verweilen, womit die Fahrgastverteilung auf dem Bahnsteig gesteuert wird (13.1).

14. *Grösse der Warteraumfläche:* Wie im Fahrzeug wird auch die Bewegung der Fahrgäste auf dem Perron durch kleine Warteraumflächen behindert und der Fahrgastwechsel verzögert (14.1). Die Fahrgäste suchen sich zudem auf dem Perron einen Ort mit nicht allzu grosser Personendichte aus (14.2).
15. *Ausstattung des Perrons:* Ausstattungsgegenstände wie Sitzbänke oder Witterungsschutz haben für die Fahrgäste eine erhöhte Attraktivität, weshalb sie sich öfters in deren Nähe aufhalten (15.1). Sind auf dem Perron Billetautomaten oder Informationseinrichtungen installiert, so kann eine zufällig untypische Fahrgastverteilung zustandekommen, wenn Fahrgäste von diesen Einrichtungen Gebrauch machen (15.2).
16. *Fahrgastwechselzahl:* Die Fahrgastwechselzahl bestimmt die spezifische Belastung der einzelnen Fahrzeugtüren und beeinflusst damit deren spezifische Leistungsfähigkeit (16.1).

6.13.3 Streuung der Fahrgastwechselzeit des Kurses

Selbst bei gegebener Fahrgastwechselzahl streut die Fahrgastwechselzeit eines Kurses an einer bestimmten Haltestelle aus folgenden Gründen:

- *Zufälligkeit der Fahrgastverteilung auf die Türen:* Die Fahrgäste verteilen sich nicht immer dem Erwartungswert entsprechend auf die einzelnen Türen.
- *Streuung der spezifischen Leistungsfähigkeit an den einzelnen Türen:* Da die spezifischen Leistungsfähigkeiten der einzelnen Türen Zufallsgrössen sind, muss auch das Ergebnis dieser parallelen Prozesse eine Zufallsgrösse sein. Die Einflüsse, welche zur Streuung an der einzelnen Türe beitragen, beeinflussen somit auch diejenige des ganzen Kurses.

Besonders grosse Streuungen sind demnach zu erwarten, wenn die Fahrgastwechselzahl klein ist und die Türwahl durch jeden einzelnen Fahrgast ein grosses Gewicht erhält sowie bei grossen Streuungswerten an den einzelnen Türen.

6.14 Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt

6.14.1 Berechnung der Fahrgastwechselzeit

Die Fahrgastwechselzeit eines Kurses während einer ganzen Fahrt entspricht der Summe der Fahrgastwechselzeiten an jeder einzelnen Haltestelle, nicht aber der Summe der Haltezeiten, da diese zusätzlich die festen Haltezeitanteile umfassen. Wäre die mittlere Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse von der Grösse des Fahrgastwechsels unabhängig, so wäre die Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt linear von der Gesamtfahrgastwechselzahl abhängig und es würde gelten:

$$(6-5) \quad t_{h,ftot} = \frac{F_{tot}}{L_{T,K}}$$

wobei $t_{h,ftot}$ Gesamte Fahrgastwechselzeit zwischen zwei Endstationen [s]
 $L_{T,K}$ Leistungsfähigkeit des Türsystems eines Kurses [P/s]

Da aber die mittlere Fahrgastwechselzeit eines Fahrgastes an einer Haltestelle von der Grösse des Fahrgastwechsels abhängt und bei grossen Fahrgastwechselzahlen günstigere Werte erreicht als bei kleinen, ist die genannte einfache Beziehung sehr ungenau. Vielmehr muss die Fahrgastwechselzeit für jede Haltestelle einzeln bestimmt und anschliessend aufzusummiert werden:

$$(6-6) \quad t_{h,ftot} = \sum_{i=1}^{i=n} t_{h,fi} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{F_i}{L'_{T,Ki}}$$

wobei $t_{h,fi}$ Fahrgastwechselzeit der Haltestelle i [s]
 $t_{h,ftot}$ Gesamtfahrgastwechselzeit einer Kursfahrt [s]
 F_i Fahrgastwechselzahl der Haltestelle i [P]
 $L'_{T,Ki}$ Effektive Türleistungsfähigkeit des Kurses bei Fahrgastwechselzahl F_i [P/s]

Zwischen der Fahrgastwechselzahl einer Fahrt und dem maximal während dieser Fahrt erzielten Fahrgastaufkommen besteht ein Zusammenhang, indem die Summe der Ein- und Aussteigevorgänge jederzeit kleiner oder gleich sein muss wie das Fassungsvermögen des Kurses. Vom Fassungsvermögen lässt sich aber auch - die Kenntnis der Parameter der Linie vorausgesetzt - auf die höchstmögliche Fahrgastwechselzahl einer Kursfahrt und damit auf die maximale Gesamtfahrgastwechselzeit schliessen.

6.14.2 Einflüsse auf die Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt

6.14.21 Systematik der Einflüsse

Die Einflüsse auf das Verkehrsaufkommen einer Linie und insbesondere das Fahrgastaufkommen an den einzelnen Haltestellen zählen nicht zum engeren Themenbereich der vorliegenden Untersuchung und werden daher nur gestreift. Im wesentlichen lassen sich die Faktoren in drei Gruppen einteilen:

- **Momentane Tageszeit:** Die Tageszeit bestimmt die Ganglinie des Verkehrsaufkommens und die Bedeutung der einzelnen Reisezwecke. Die Ganglinie ist zumindest im Nahverkehr geprägt von den Verkehrsspitzen am Morgen und Abend sowie von den sehr tiefen Auslastungen am Vormittag und in der Nacht.
- **Charakteristiken des durchfahrenen Gebietes:** Das von einer Linie bediente Gebiet kennzeichnet sich durch seine Bevölkerungs- und Arbeitsplatzdichte, die Bevölkerungsstruktur bezüglich Alter, Einkommen oder Erwerbstätigkeit sowie durch die Qualität seines Wegnetzes zur Verbindung der Siedlungsbereiche mit den Haltestellen. Damit wird das Verkehrsaufkommen, der Fahrgastmix und der Mix der Verkehrszwecke massgeblich beeinflusst.

- **Funktion der Verkehrslinie:** Im Gegensatz zu den beiden vorgenannten äusseren Einflussfaktoren ist die Funktionszuweisung an eine Linie im Gesamtverkehrsnetz vom Betreiber beeinflussbar und damit ein systeminterner Faktor. Die Funktionszuweisung ist ein wesentlicher Parameter für die Häufigkeit von Fahrgastwechsellvorgängen während einer Kursfahrt.

Während die beiden externen Einflussgrössen, welche verkehrsplanerischer Natur sind, nicht näher betrachtet werden, wird im folgenden der Einfluss der Funktionszuweisung an eine Linie auf das Fahrgastwechselgeschehen detaillierter beleuchtet.

6.14.22 Insbesondere Einfluss der Funktion der Linie

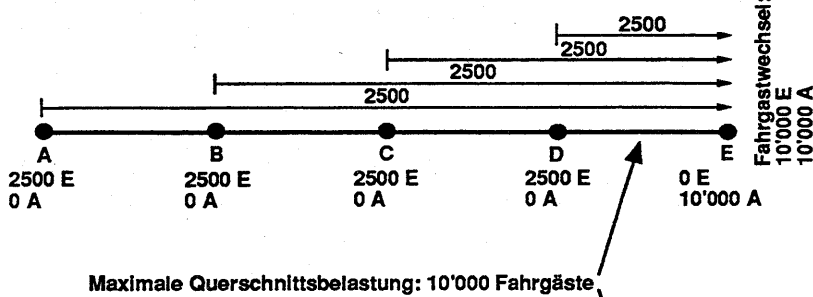
Je grösser der Anteil der Kurzstreckenfahrergäste ist, desto grösser ist der Fahrgastwechsel bei gleicher Querschnittsbelastung und die Zahl der insgesamt während einer Fahrt beförderten Personen. Für die Grösse des Fahrgastwechsels und dessen Zeitbedarf ist somit nicht nur die Belastung der Linie massgebend, sondern ebenso sehr deren Verkehrsfunktion. Näherungsweise lassen sich folgende zwei für den Fahrgastwechsel wesentliche Hauptfunktionen unterscheiden:

- **Sammelfunktion:** Eine Verkehrslinie mit Sammelfunktion sammelt Fahrgäste entlang ihrer Fahrt und befördert sie bis zum Endpunkt im Stadtzentrum oder einem wichtigen Umsteigebahnhof. Unterwegs steigen in Richtung der Hauptstation nur Fahrgäste ein, nicht aber aus, in Gegenrichtung trifft das Gegenteil zu.
- **Verteilerfunktion:** Eine Verkehrslinie mit Verteilerfunktion stellt die interne Erschliessung des von ihr durchfahrenen Gebietes sicher. An jeder Haltestelle besteigen und verlassen Fahrgäste den Kurs. Der Anteil der Kurzstreckenfahrergäste ist hoch. Charakteristisch für Linien mit Verteilerfunktion ist die grosse Zahl bedienter Anschlusslinien mit entsprechend häufigen Umsteigevorgängen.

Im Normalfall lässt sich keine Linie streng einer der beiden Kategorien zuordnen, sondern die beiden Funktionen überlagern sich mit unterschiedlichem Gewicht. Erkennbar ist dies an der durchschnittlichen Fahrtweite, welche bei einer Linie mit Sammelfunktion gross, bei einer solchen mit Verteilerfunktion klein ist. Die Unterscheidung ist dennoch wesentlich, weil der Zusammenhang zwischen der Funktion der Linie und dem Umfang des Fahrgastwechsels eng ist, wie das folgende einfache Beispiel verdeutlicht:

Sammelfunktion

(wenig Kurzstreckenverkehr)



Verteilerfunktion

(viel Kurzstreckenverkehr)

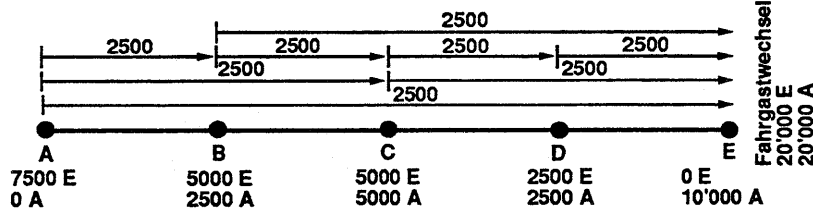


Abb. 6-3: Prinzipieller Zusammenhang zwischen der Verkehrsfunktion einer Linie, maximaler Querschnittsbelastung der Strecke und Grösse des Fahrgastwechsels. Oben: Sammelfunktion mit Beförderung der Fahrgäste aus der Region ins Zentrum, kleiner Fahrgastwechsel. Unten: Verteilerfunktion mit Sammlung und Verteilung von Fahrgästen längs der Linie, grosser Fahrgastwechsel.

Mit der Verkehrsfunktion der Linie verschiebt sich somit das Verhältnis zwischen maximaler Querschnittsbelastung und Fahrgastumschlag. Je ausgeprägter die Kurzstreckenfunktion ist, desto höher ist dieser Umschlagfaktor. Je mehr die Linie auf den Langstrecken- beziehungsweise Sammelverkehr ausgerichtet ist, desto kleiner wird er und im Extremfall entspricht die maximale Querschnittsbelastung gerade der Gesamtzahl der beförderten Fahrgäste einer Fahrt. In der Folge weist eine Linie mit Verteilerfunktion bei gleicher maximaler Querschnittsbelastung deutlich längere Fahrgastwechselzeiten auf als eine Linie mit Sammelfunktion. Wird nun eine Linie mit hohem Kurzstreckenanteil durch eine entsprechende Netzgestaltung, zum Beispiel durch die Einführung leistungsfähiger Parallelverkehrsmittel, vom Kurzstreckenverkehr entlastet, so lässt sich bei gleicher Querschnittsbelastung die Fahrgastwechselzeit sowie die Streckenbelegung verkürzen und damit die Streckenleistungsfähigkeit anheben.

6.14.3 Streuung der Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt

Selbst bei gegebener Tageszeit sowie bekannten Parametern des bedienten Gebietes und der Linie treten Unregelmässigkeiten der Fahrgastzahl auf. Ursachen dafür sind im wesentlichen die Zufälligkeit, mit welcher die Fahrgäste einen bestimmten Kurs benützen sowie Unregelmässigkeiten in den Anschlussverhältnissen als Folge von Betriebsstörungen. Hinzu kommt namentlich im

Nahverkehr ein vermehrter Fahrgastandrang bei Verspätung des Kurses beziehungsweise eine ungewohnt kleine Nachfrage bei vorzeitigem Verkehren.

Die Streuung der Fahrgastwechselzeit an jeder einzelnen Haltestelle summiert sich über die ganze Fahrt zur Streuung der Gesamtfahrgastwechselzeit auf. Je grösser die Streuung der Fahrgastwechselzeit an jeder Haltestelle bei gegebener Fahrgastwechselzahl ist, desto grösser ist demnach auch die Streuung der Gesamtfahrgastwechselzeit und damit die Empfindlichkeit auf Fahrplanunregelmässigkeiten. Kennt man die Verteilungsfunktion der Gesamtfahrgastwechselzeit, so gibt dies einen Hinweis für die erforderliche Grösse von Fahrzeitreserven.

6.2 Die Leistungsfähigkeit der Einzeltüre

6.2.1 Zweckmässige Kenngrössen

Zur quantitativen Beschreibung des Fahrgastwechsels an einer Einzeltüre beschränkt man sich sinnvollerweise auf möglichst wenige und gut handhabbare Kennzahlen:

- *Mittlere Fahrgastwechselzeit [s/P]:* Die mittlere Fahrgastwechselzeit nimmt immer Bezug auf eine bestimmte Einstiegsgestaltung. Ist der Einstieg definiert, so stellt sie ein Mass dar, welches dem Vorstellungsvermögen sehr entgegenkommt. Der Nachteil liegt in der fehlenden Übertragbarkeit auf andere Fälle.
- *Spezifische Türleistungsfähigkeit [P/sm]:* Allgemeine Fälle lassen sich gut mit dem etwas abstrakteren Mass der sogenannten spezifischen Türleistungsfähigkeit behandeln, welche sich die lineare Abhängigkeit von Türleistungsfähigkeit und Türbreite zunutze macht. Grundsätzlich könnte auch deren Kehrwert, die spezifische Fahrgastwechselzeit, verwendet werden, doch ist sie wenig anschaulich.

Da die spezifische Leistungsfähigkeit das allgemeinere Mass darstellt, werden zunächst alle Untersuchungen mittels dieser Kenngrösse. Die Ergebnisse werden in ausgewählten Fällen auf die Einheit [s/P] umgerechnet.

6.2.2 Erwartungswerte und Streuungen

6.2.2.1 Erwartungswerte

6.2.2.1.1 Mittelwerte aus Literatur und Messungen

Aus mehreren Dutzenden publizierter Fahrgastwechseluntersuchungen mit insgesamt 80 Einzelangaben lässt sich für die spezifische Leistungsfähigkeit der Fahrzeugtüren ein Richtwert von 0.97 P/sm bei ebenen Verhältnissen und von 0.66 P/sm bei üblichen Treppeneinstiegen gewinnen. Die eigenen Messungen ergaben weitere 25 Datensätze mit folgenden Rohdaten:

Tab. 6-3: Durchschnittswerte von mittlerer Fahrgastwechselzeit und spezifischer Türleistungsfähigkeit bei den eigenen Messungen.

Betrieb und Fahrzeugtyp	Türbreite [mm]	Einstieg [mm]	$t_{h,fm}$ [s/P]	L_s [P/sm]
SBB, Einheitswagen IV, Bahnhof Winterthur	800	630	1.98	0.67
SBB, Einheitswagen IV, Bahnhof Bern	800	880	1.90	0.68
SBB, Einheitswagen IV, Labor P55	800	630	1.43	0.75
SBB, Einheitswagen IV, Labor P30	800	880	1.55	0.66
SBB/SWG, Einstiegsmaquette 15-E, Labor P55	1400	0	0.74	0.97
SBB/SWG, Einstiegsmaquette 15-E, Labor P30	1400	250	0.69	1.04
SBB/SWG, Einstiegsmaquette 15-M, Labor P55	1400	0	0.64	1.12
SBB/SWG, Einstiegsmaquette 15-M, Labor P30	1400	250	0.66	1.09
NS, Doppelstockwagen, S-Bahn München/P950	1900	233	1.02	0.57
NS, Doppelstockwagen, S-Bahn München/P750	1900	433	0.97	0.60
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich/P55	1900	600	1.37	0.43
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich/P25	1900	900	1.72	0.34
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich/P55	1400	600	1.38	0.55
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich/P25	1400	900	1.59	0.49
DB, BR 420, S-Bahn München/P950	1000	50	1.27	0.85
DB, BR 420, S-Bahn München/P750	1000	250	1.31	0.83
TPG Genf, Niederflurtram Be 4/6	1240	330	1.51	0.59
SEMITAG Grenoble, Niederflurtram	1300	75	1.18	0.75
BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 911 ff.	1230	700	1.35	0.63
BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 911 ff.	1230	605	1.34	0.67
BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 921-922	1280	568	1.35	0.62
MAN, Prototyp-Niederflurgelenkbus NG 272	1220	190	1.28	0.68
MAN, Prototyp-Niederflurgelenkbus NG 272	1220	440	1.41	0.61

Die meisten Messungen wurden im laufenden Betrieb durchgeführt und erfassten sehr unterschiedliche Fahrgastwechselzahlen, weshalb es nicht zulässig ist, bereits auf ihrer Basis Schlussfolgerungen zu formulieren. Lediglich in sechs Fällen waren Labormessungen an einem Einheitswagen IV der SBB sowie an einem Einstiegsmodell möglich.

6.22.12 Abhängigkeit von der Grösse des Fahrgastwechsels

Für aussagekräftige Resultate muss der Einfluss der Fahrgastwechselzahl berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wurden die Leistungsfähigkeiten zunächst der jeweiligen Fahrgastwechselzahl gegenübergestellt und eine Korrelationsrechnung durchgeführt. Sowohl die theoretischen Überlegungen wie auch die praktischen Messresultate führen auf eine Regressionskurve des Verlaufes $a \cdot x^b$ mit tiefer Leistungsfähigkeit bei kleinen Fahrgastwechselzahlen und einem Grenzwert bei sehr grossem Fahrgastwechsel.

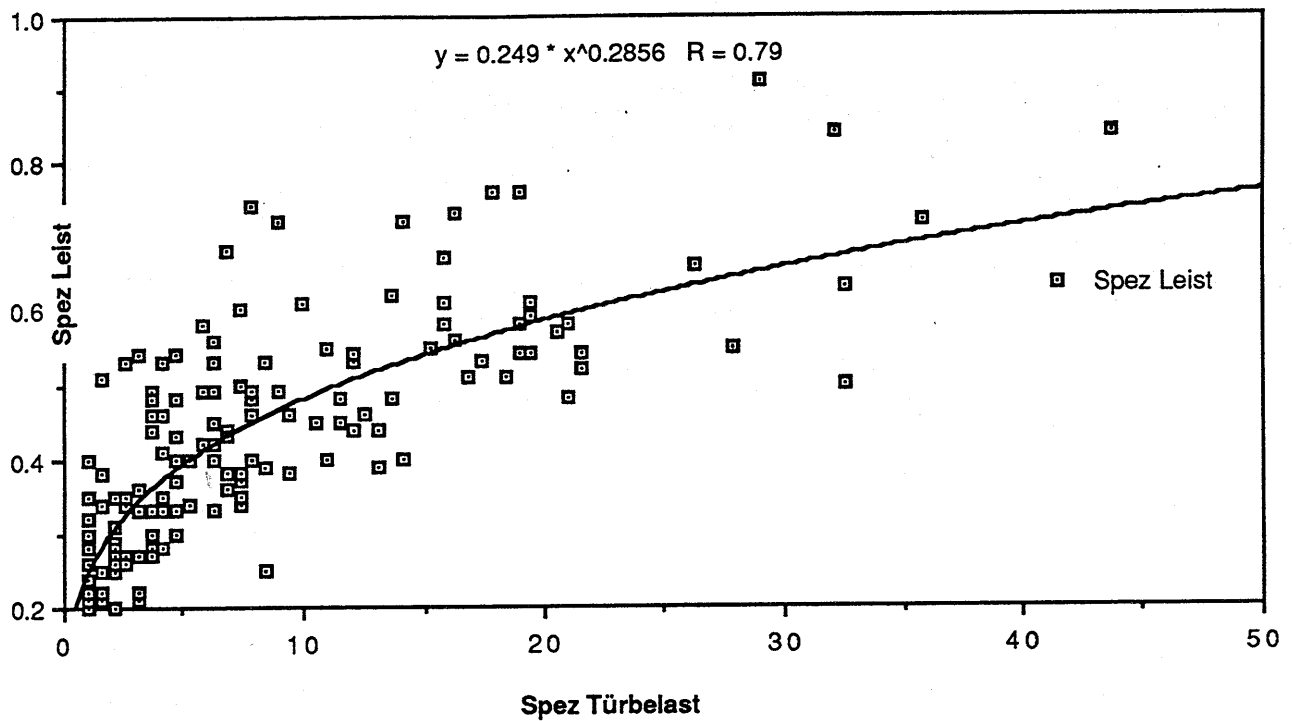


Abb. 6-4: Beispiel für die spezifische Türleistungsfähigkeit in Funktion von der Fahrgastwechselzahl an der einzelnen Türe. Doppelstockwagen der SBB bei der Zürcher S-Bahn, Türe mit einer lichten Breite von 1900 mm.

Aus den Korrelationsgleichungen der einzelnen Messreihen können die Leistungswerte für typische Fahrgastwechselzahlen von 5, 10, 20 oder 50 Personen ermittelt werden. Beides ist im Anhang zusammengestellt. Dies berücksichtigt das Geschehen an einer Einzeltüre allerdings nur unvollkommen, denn massgebend ist der Ausnützungsgrad der Zeitlücken und damit die Dichte des Fahrgaststromes. Die spezifische Leistungsfähigkeit muss demnach der spezifischen Türbelastung als Mass für die Verkehrsstromdichte gegenübergestellt werden:

Tab. 6-4: Spezifische Türleistungsfähigkeiten für bestimmte spezifische Türbelastungen.

Betrieb und Fahrzeugtyp	$L_{s,5'}$ [P/sm]	$L_{s,10'}$ [P/sm]	$L_{s,20'}$ [P/sm]	$L_{s,50'}$ [P/sm]
SBB, Einheitswagen IV, Bahnhof Winterthur	0.54	0.60	0.67	0.78
SBB, Einheitswagen IV, Bahnhof Bern	0.54	0.58	0.62	0.67
NS, Doppelstockwagen, S-Bahn München/P950	0.53	0.59	0.66	0.75
NS, Doppelstockwagen, S-Bahn München/P750	0.57	0.64	0.72	0.84
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich, T1900/P55	0.39	0.48	0.59	0.76
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich, T1900/P25	0.36	0.43	0.51	0.63
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich, T1400/P55	0.51	0.57	0.63	0.73
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich, T1400/P25	0.48	0.50	0.52	0.56
DB, BR 420, S-Bahn München/P950	0.83	0.89	0.95	1.04
DB, BR 420, S-Bahn München/P750	0.83	0.87	0.91	0.97
TPG Genf, Niederflurtram Be 4/6	0.57	0.58	0.59	0.60
SEMITAG Grenoble, Niederflurtram	0.71	0.74	0.76	0.79
BVB Basel, Gelenkrolleybus Serie 911 ff., Türe 2	0.62	0.63	0.63	0.63
BVB Basel, Gelenkrolleybus Serie 911 ff., Türe 3, 4	0.64	0.64	0.64	0.64
BVB Basel, Gelenkrolleybus Serie 921-922	0.62	0.64	0.67	0.70
MAN, Prototyp-Niederflurgelenkbus NG 272, Türe 2	0.68	0.67	0.65	0.60
MAN, Prototyp-Niederflurgelenkbus NG 272, Türe 3	0.61	0.63	0.66	0.69

Erklärung

$L_{s,5'}$ Spezifische Leistungsfähigkeit bei einer spezifischen Türbelastung von 5 Personen pro Meter Türbreite

Die Leistungsfähigkeiten der Einstiege nähern sich bei grosser spezifischer Türbelastung an. Die durch die unterschiedlichen Fahrgastwechselzahlen und Türbreiten entstandenen Differenzen werden ausgeglichen. Der Unterschied zwischen den Fahrzeugen mit verschiedener Einstieghöhe akzentuiert sich, erkennbar insbesondere an den sehr hohen Leistungswerten der BR 420 mit ihrem fast niveaugleichen Einstieg. Der Unterschied zu den Literaturwerten verschwindet weitgehend. Die Geschwindigkeit der Annäherung an den Grenzwert ist unterschiedlich und hängt mit dem Fahrgastverhalten und mit den baulichen Eigenschaften der Fahrzeuge zusammen:

- **Nahverkehrs-/Fernverkehrsverhalten:** Im Nahverkehr warten die Fahrgäste bereits vor dem Anhalteruck in der Nähe der Türe, während sie sich im Fernverkehr oft erst nach dem Anhalteruck zu den Türen begeben.
- **Grosse/kleine Türabstände:** Je kleiner die Türabstände sind, desto schneller sind die Fahrgäste beim Durchgang. Bei gleicher spezifischer Türbelastung läuft dadurch der Fahrgastwechsel rascher ab und die erzielte Türleistungsfähigkeit steigt an.

Auffällig ist das unterschiedliche Verhalten der baugleichen Doppelstockwagen von NS und SBB. Zwar stimmen deren spezifische Türleistungsfähigkeiten im hohen Beanspruchungsbereich praktisch überein, doch ist im tiefen Beanspruchungsbereich ein Leistungsrückstand des SBB-Wa-

gens zu verzeichnen, der nur mit dem Verhalten der Fahrgäste zu erklären ist. Da die S-Bahn-Fahrgäste in München an kurze Haltezeiten gewöhnt sind und die S-Bahn häufig als Kurzstreckenverkehrsmittel benützen, verhalten sie sich wie im städtischen Nahverkehr. Die Fahrgäste der S-Bahn Zürich, welche erst seit 1990 in Betrieb steht, legen dagegen ein fernverkehrsmässiges Verhalten an den Tag, indem sie sich oft erst beim Anhalteruck von ihren Plätzen erheben. Diese Verhaltensweise hat sich vom früheren eisenbahnmässigen Betrieb der Zürcher Regionallinien gehalten und wird durch die bescheidene Kurzstreckenbedeutung der S-Bahn unterstützt. Der Nachteil dieser Verhaltensweise für den Betriebsablauf kommt vor allem bei kleinen Fahrgastwechseln deutlich zum Ausdruck.

Die Beschleunigung des Fahrgastwechsels bei höheren Fahrgastwechselzahlen beziffert die Literatur bei einer Steigerung der Fahrgastwechselzahl von 2 auf 20 P mit 12 % und bei einer solchen auf 40 P mit 26 %. Berechnet man die mittlere Fahrgastwechselzeit beispielhaft für die mittelgrosse Türe von 1250 mm lichter Breite, so erhält man aufgrund von Tabelle 6-7 eine Reduktion der mittleren Fahrgastwechselzeit um 21 % beziehungsweise 26 %. Es lässt sich damit im Durchschnitt eine ähnliche Abhängigkeit nachweisen wie in der Literatur. Allerdings besteht ein beträchtlicher Unterschied zwischen Nahverkehrsfahrzeugen mit einer Beschleunigung um lediglich etwa 12 % bis 13 % einerseits und Fernverkehrsfahrzeugen mit einer solchen um 39 %.

6.22.13 Praktische Grenzwerte der spezifischen Leistungsfähigkeit

Ein allgemeiner Richtwert der spezifischen Leistungsfähigkeit existiert demnach nicht, sondern diese muss mit der Belastung und mit den Einstiegsverhältnissen zusammen untersucht werden. Als Fahrzeuge mit ebenen Einstiegen konnten nur die BR 420 der DB und das Niederflurtram der SEMITAG Grenoble ausgewertet werden. Der Messwert an der niederflurigen Türe des MAN-NG 272 konnte wegen sehr schlechter Abstützung nicht verwendet werden. Der Doppelstockwagen der NS musste zu den Fahrzeugen mit Treppeneinstiegen gezählt werden, da die Einstiegs konstruktion ein bequemes Besteigen oder Verlassen mit nur einem Schritt nicht gestattet. Die in die Untersuchung einbezogenen Treppeneinstiege weisen eine durchschnittliche Einstiegshöhe von 0.601 m auf.

Bei einer sehr starken Beanspruchung mit 50 P/m' zeigt sich bei ebenen Einstiegen eine spezifische Leistungsfähigkeit von 0.93 P/sm beziehungsweise bei Treppen von 0.69 P/sm. Selbst bei den Laborversuchen von SBB und SWP mit idealen Verhältnissen wurden nur leicht höhere Leistungsfähigkeiten gemessen [571]:

- Einstiegshöhe 0.88 m, Treppe $L_S = 0.81$ P/sm (Einheitswagen IV der SBB)
- Einstiegshöhe 0.63 m, Treppe $L_S = 0.88$ P/sm (Einheitswagen IV der SBB)
- Einstiegshöhe 0.25 m, eben $L_S = 1.09$ P/sm (Einstiegsmaquette Variante 15M)
- Einstiegshöhe 0.00 m, eben $L_S = 1.12$ P/sm (Einstiegsmaquette Variante 15M)

Das Ergebnis liegt nahe an den Mittelwerten aus der Literatur, welche fast durchwegs aus Messungen mit starkem Fahrgastwechsel stammen. Damit erklärt sich die Differenz zwischen den Literaturwerten und den Rohdaten der Messungen. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Literatur für den Normalfall zu günstige Kennwerte angibt, denn diese Türbelastung erreichen gebräuchliche Fahrzeuge erst, wenn sich ein vollbesetztes Fahrzeug komplett entleert und umgehend wieder füllt. Der Befund lässt sich zusätzlich mit den Leistungsfähigkeiten von Fussgängeranlagen vergleichen:

Tab. 6-5: Vergleich der Literaturangaben und der Messergebnisse der spezifischen Türleistungsfähigkeit mit derjenigen von Fussgängeranlagen für ebenerdige Einstiege bis etwa 250 mm Höhendifferenz sowie für Treppeneinstiege mit einer Höhendifferenz von etwa 600 bis 700 mm.

Anlagentyp	Spezifische Leistungsfähigkeit			Verhältnisse	
	Literatur (Gesamtmittel)	Messungen (bei 50 P/m')	Fussgänger (Maximum)	Literatur/ Fussgänger	Messungen/ Fussgänger
Ebener Einstieg Treppe	0.97 P/sm 0.66 P/sm	0.93 P/sm 0.69 P/sm	1.23 P/sm 0.91 P/sm	78.9 % 72.5 %	75.6 % 75.8 %
Durchschnitt	-	-	-	75.7 %	75.7 %
L_s (Treppe) in [%] von L_s (eben)	68.0 %	74.2 %	74.0 %	-	-

Ist die Türe mit 50 P/m' sehr hoch beansprucht, so werden demnach erst rund drei Viertel der maximalen Leistungsfähigkeit der jeweiligen Fussgängeranlage des gleichen Typs erreicht und es wird im praktischen Betrieb kaum je die Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen zu beobachten sein.

Die bei Fahrzeugeinstiegen auftretende Fussgängerdichte bei hoher Belastung beträgt gemäss den Leistungsfähigkeits-Dichte-Beziehungen bei ebenen Einstiegen 0.8 P/m^2 und bei Treppeneinstiegen 1.1 P/m^2 . Damit liegen beide Einstiegstypen im Grenzbereich von LOS E und LOS F. Hier sind ein Gegenverkehr und das Überholen praktisch unmöglich und die Bewegungsfreiheit sowie die Geschwindigkeitswahl sind stark eingeschränkt, es treten aber noch keine unbeabsichtigten Berührungen zwischen den Fahrgästen auf. Dies entspricht der qualitativen Erfahrung bei Fahrgastwechseln im täglichen Betrieb. Im genannten Dichtebereich liegen zudem die Dimensionierungswerte, welche für Engpässe bei Fussgängeranlagen als kurzzeitig zulässig erkannt wurden. Bestätigt wird dies durch die erwähnten Versuche der SBB. Aus der Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit von der Fussgängerdichte lässt sich nämlich ermitteln, dass die dabei auftretenden Fussgängerdichten im Falle des Treppeneinstieges bei rund 1.6 P/m^2 lagen, bei den ebenen Einstiegen bei rund 1.0 P/m^2 , also ebenfalls im Bereich von LOS F.

6.22.14 Standardisierte Leistungsfähigkeitskurven

Der Kurvenverlauf, welcher die spezifische Leistungsfähigkeit für den gesamten Wertebereich der relativen Türbelastung wiedergibt und der zusätzlich die Begingung erfüllt, wonach die spezifische Leistungsfähigkeit bei einer relativen Türbelastung von 50 P/m' etwa 76 % der maximalen Leistungsfähigkeit einer Fussgängeranlage beträgt, ergibt sich aus den Messungen. Da die Zahl der untersuchten Fahrzeuge beschränkt ist, werden nur zwei Kategorien gebildet:

- *Fahrzeuge mit grossen Türabständen von über etwa 10 m: Einheitswagen IV der SBB, Doppelstockwagen der NS, Doppelstockwagen der SBB.*
- *Fahrzeuge mit kleinen Türabständen von unter etwa 10 m: BR 420 der DB, Be 4/6 der TPG, Niederflurstrassenbahn der SEMITAG, Trolleybusse der BVB, Gelenkbusprototyp von MAN.*

Die empirischen Kurven wurden an den Zielwert angepasst, indem der Leistungsfähigkeitswert bei einer Türbelastung von 50 P/m' zu 100 % gesetzt wurde. Mit Stützwerten in Abständen von 5 P/m' und einer erneute Korrelationsrechnung ergaben sich die beiden folgenden Standardkurvenverläufe:

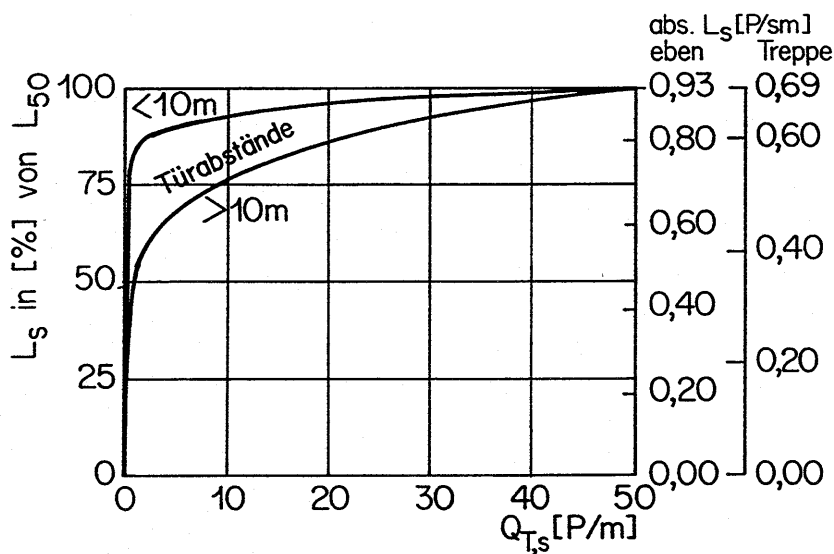


Abb. 6-5: Spezifische Türleistungsfähigkeit von Fahrzeugen mit grossem beziehungsweise kleinem Türabstand, dargestellt in Prozenten der erreichten Leistungsfähigkeiten bei einer spezifischen Türbelastung von 50 P/m' sowie in Absolutwerten als Funktion der relativen Türbelastung.

Die Leistungsfähigkeit der Türen der vier Fahrzeugkategorien errechnet sich demnach folgendermassen:

Tab. 6-6: Spezifische Türleistungsfähigkeiten in Funktion der spezifischen Türbelastung; ebene Einstiege und Treppeneinstiege mit einer Einstiegshöhe von etwa 600 bis 700 mm.

	Grosse mittlere Türabstände (über 10 m)	Kleine mittlere Türabstände (unter 10 m)
Ebene Einstiege (bis 250 mm Höhendifferenz)	$L_s = 0.488 \cdot Q_{T,s}^{0.1651}$ (6 - 7)	$L_s = 0.781 \cdot Q_{T,s}^{0.0450}$ (6 - 8)
Treppeneinstiege (Höhendifferenz von etwa 600 bis 700 mm beziehungs- weise drei Trittstufen)	$L_s = 0.361 \cdot Q_{T,s}^{0.1651}$ (6 - 9)	$L_s = 0.578 \cdot Q_{T,s}^{0.0450}$ (6 - 10)

6.22.15 Richtwerte für die mittlere Fahrgastwechselzeit in Funktion der Fahrgastwechselzahl

Die Beziehungen (6 - 7) bis (6 - 10) lassen sich nun zusammen mit (2 - 8) und (2 - 10) zur Berechnung der mittleren Fahrgastwechselzeit an einer bestimmten Türe umformen, was für typische Fahrgastwechselzahlen zu folgenden Richtwerten führt:

Tab. 6-7: Mittlere Fahrgastwechselzeiten an ein-, zwei- und dreispurigen Fahrzeugtüren bei typischen Fahrgastwechselzahlen, grosse und kleine Türabstände, ebene Einstiege und Treppen.

Einstiegs- bauart	Türabstand	Spurzahl und Türbreite		Fahrgastwechselzahl				
				5 P	10 P	20 P	50 P	100 P
Ebener Einstieg	gross	1	800 mm	1.89	1.69	1.51	1.29	*)
		2	1250 mm	1.30	1.16	1.04	0.89	*)
		3	1900 mm	0.92	0.82	0.73	0.63	0.56
	klein	1	800 mm	1.47	1.43	1.38	1.33	*)
		2	1250 mm	0.96	0.93	0.90	0.88	*)
		3	1900 mm	0.65	0.63	0.61	0.58	0.56
Treppen- einstieg	gross	1	800 mm	2.56	2.28	2.04	1.75	*)
		2	1250 mm	1.76	1.57	1.40	1.21	*)
		3	1900 mm	1.24	1.11	0.99	0.85	0.76
	klein	1	800 mm	1.99	1.93	1.87	1.80	*)
		2	1250 mm	1.30	1.26	1.22	1.17	*)
		3	1900 mm	0.87	0.85	0.82	0.79	0.76

Erklärung

*) Fahrgastwechselzahlen von 100 P sind bei diesen Türen nicht zu erwarten.

6.22.2 Streuungen

6.22.21 Grösse der Streuung

Die Literatur liefert mit zwischen 18 % und 75 % des Mittelwertes kaum brauchbare Angaben zur Streuung der Fahrgastwechselzeit. Bei den eigenen Messungen wurden folgende Werte festgestellt:

Tab. 6-8: Standardabweichung der mittleren Fahrgastwechselzeit und der spezifischen Türleistungsfähigkeit in Absolutwerten und in Prozenten des Durchschnittes.

Betrieb und Fahrzeugtyp	$\sigma_{h,fm}$		$\sigma_{L,s}$	
	[s/P]	[%]	[P/sm]	[%]
SBB, Einheitswagen IV, Bahnhof Winterthur	0.544	27.5	0.148	22.1
SBB, Einheitswagen IV, Bahnhof Bern	0.330	17.4	0.109	16.1
NS, Doppelstockwagen, S-Bahn München/P950	0.342	33.5	0.166	29.4
NS, Doppelstockwagen, S-Bahn München/P750	0.341	35.3	0.184	30.5
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich, T1900/P55	0.485	35.3	0.149	34.9
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich, T1900/P25	0.489	28.5	0.124	36.7
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich, T1400/P55	0.354	25.7	0.132	23.9
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich, T1400/P25	0.442	27.9	0.139	28.5
DB, BR 420, S-Bahn München/P950	0.370	29.1	0.233	27.3
DB, BR 420, S-Bahn München/P750	0.388	29.7	0.220	26.6
TPG Genf, Niederflurtram Be 4/6	0.450	29.9	0.181	30.9
SEMITAG Grenoble, Niederflurtram	0.465	39.6	0.263	35.0
BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 911 ff., Türe 2	0.305	22.7	0.137	21.6
BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 911 ff., Türe 3, 4	0.406	30.4	0.211	31.5
BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 921-922	0.368	27.2	0.175	28.1
MAN, Prototyp-Niederflurgelenkbus NG 272, Türe 2	0.330	25.8	0.172	25.1
MAN, Prototyp-Niederflurgelenkbus NG 272, Türe 3	0.322	22.8	0.133	21.8

Erklärung

- $\sigma_{h,fm}$ Standardabweichung der mittleren Fahrgastwechselzeit
 $\sigma_{L,s}$ Standardabweichung der spezifischen Türleistungsfähigkeit

Die Standardabweichungen der unterschiedlichen Fahrzeuge differieren wesentlich weniger in der Literatur. Diejenige der mittleren Fahrgastwechselzeit liegt bei 28.9 % des Erwartungswertes, jene der spezifischen Leistungsfähigkeit bei 27.3 %. Ermittelt man die Standardabweichungen der spezifischen Türleistungsfähigkeit getrennt nach den einzelnen Fahrzeugkategorien, so lassen sich charakteristische Unterschiede sowie vor allem eine Tendenz zu höherer Streuung mit wachsender Türbreite feststellen:

- Fernverkehr 19.1 %
- S-Bahn-Verkehr 29.7 %
- Strassenbahn 33.0 %
- Autobus 25.6 %
- Nahverkehr insgesamt 27.7 %

Die beste Korrelation zwischen Türbreite und Standardabweichung ergibt ein Polynom zweiten Grades:

$$(6-11) \quad \sigma_{L,s} = 1.5186 + 29.1628 \cdot l_{T,bi} - 6.7181 \cdot l_{T,bi}^2$$

wobei $\sigma_{L,s}$ Standardabweichung der spezifischen Leistungsfähigkeit in [%] des Erwartungswertes
 $l_{T,bi}$ Lichte Türbreite [m]

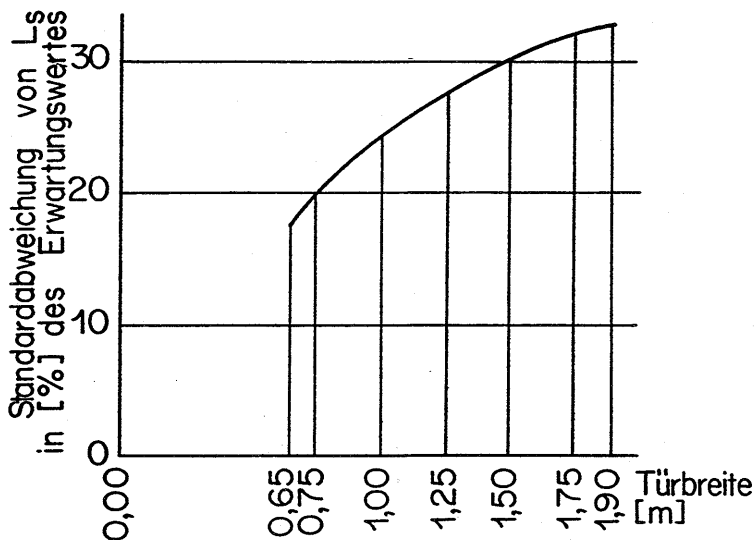


Abb. 6-6: Korrelation zwischen Türbreite und Standardabweichung der spezifischen Türleistungsfähigkeit.

Grosse Türen sind somit wesentlich streuungsanfälliger als schmale. Beispielsweise betragen die Standardabweichungen der spezifischen Türleistungsfähigkeiten in [%] des Erwartungswertes für die typischen Türbreiten von 800 mm, 1250 mm und 1900 mm:

- Türbreite 800 mm 20.5 %
- Türbreite 1250 mm 27.5 %
- Türbreite 1900 mm 32.7 %

Ein Einfluss der Einstiegshöhe auf die Streuung ist nicht erkennbar. Insbesondere liegen die Streuungen von ebenen Einstiegen nicht spürbar unter jenen von Treppeneinstiegen. Dies gilt nur für die an einem Fahrgastwechsellvorgang beteiligten Fahrgastkollektive als ganzes, nicht aber für die Einsteigezeit der einzelnen Individuen.

6.22.22 Verteilungsfunktionen

Zur Verteilungsfunktion der Türleistungsfähigkeiten finden sich in der Literatur keine Angaben. Die Messungen zeigen, dass die spezifischen Türleistungsfähigkeiten praktisch normalverteilt sind. Der k-Faktor der Erlang-Verteilung beträgt etwa 13, was nur eine leichte Schiefe ergibt.

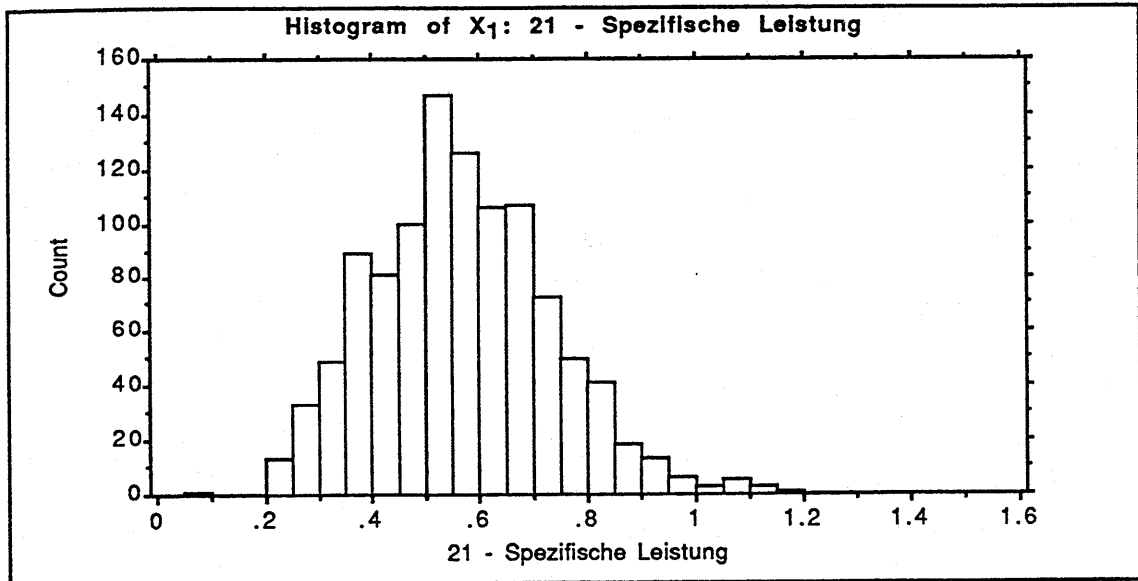


Abb. 6-7: Histogramm der spezifischen Türleistungsfähigkeit am Beispiel des Doppelstockwagens der NS im Einsatz bei der S-Bahn München, Perron 950 mm.

Bei symmetrisch verteilter spezifischer Türleistungsfähigkeit muss deren Kehrwert, die mittlere Fahrgastwechselzeit, linksschief sein, was die meisten Messungen bestätigen.

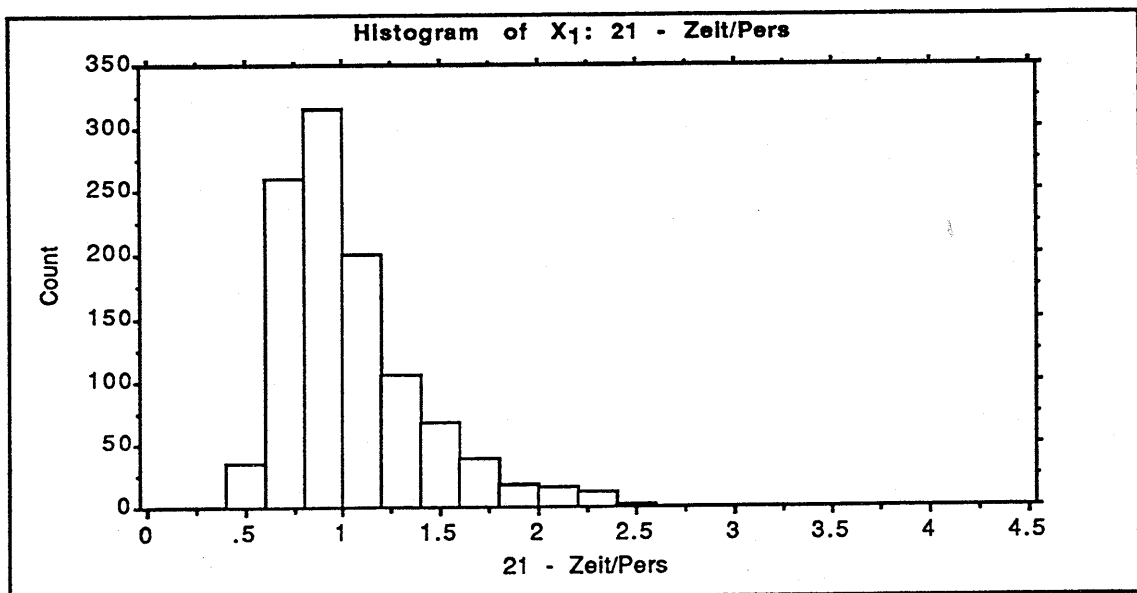


Abb. 6-8: Histogramm der mittleren Fahrgastwechselzeit am Beispiel des Doppelstockwagens der NS im Einsatz bei der S-Bahn München, Perron 950 mm.

6.23 Abhängigkeit von den Einflussfaktoren

6.23.1 Eigenschaften der Fahrgäste

Der Einfluss der Eigenschaften der Fahrgäste ist nur von beschränktem praktischem Interesse, da die Fahrgastgruppen in ihrer Zusammensetzung als gegeben zu betrachten sind und da im jeweiligen Einzelfall kaum die nötigen Informationen zu den Fahrgasteigenschaften vorliegen. Es muss aus diesen Gründen und infolge der spärlichen Datenlage mit summarischen Bemerkungen sein Bewenden haben:

- **Geschlecht:** Aufgrund ihrer grösseren Körperlänge und Leistungsfähigkeit bewegen sich Männer im Durchschnitt um 10.9 % schneller als Frauen. Es ist bei Frauen daher eine etwas verlängerte Fahrgastwechselzeit zu erwarten.
- **Alter:** Das Alter eines Menschen beeinflusst dessen Bewegungsgeschwindigkeit in hohem Masse. Ist es bei Kindern unter etwa sieben Jahren vor allem die Körpergrösse, welche eine kleinere Bewegungsgeschwindigkeit verursacht, so sind es mit zunehmendem Alter die schwindenden Körperkräfte. Aus dem Verlauf der Gehgeschwindigkeit des Menschen in Funktion seines Lebensalters leitet sich ein Hinweis zur Abhängigkeit der Fahrgastwechselzeit ab, indem der Kehrwert der Geschwindigkeit betrachtet wird:

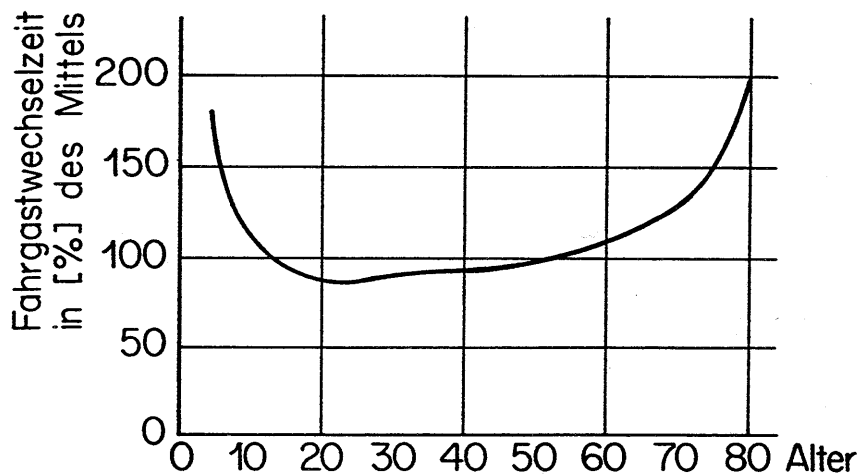


Abb. 6-9 Schätzung der Fahrgastwechselzeit in Funktion des Lebensalters als Prozentsatz des Mittelwertes, abgeleitet als Kehrwert der Gehgeschwindigkeit.

- **Belastung durch Gepäck:** Obwohl rund 75 % der Fahrgäste mit einem Gepäckstück irgendwelcher Art und gegen 30 % sogar mit mittlerem bis grossem Gepäck unterwegs sind, wurden bisher kaum diesbezügliche Untersuchungen angestellt. Erkennbar ist aber immerhin, dass bei einem sehr hohen Gepäckanteil bis zur eine Verdreifachung der Fahrgastwechselzeit eintreten kann.

- **Körperliche Behinderungen:** Die Formen körperlicher Behinderungen sind sehr vielfältig, ebenso die resultierenden Einschränkungen in der Beweglichkeit und Bewegungsgeschwindigkeit. Rund 0.5 % der Bevölkerung zählen zu den Rollstuhlfahrern, welche den öffentlichen Verkehr nur mit fremder Hilfe benützen können und rund 2.5 % sind als Gehbehinderte zu bezeichnen. Ihr Zeitbedarf für das Besteigen und Verlassen eines Fahrzeuges des öffentlichen Verkehrs liegt um ein Vielfaches über jenem der Nichtbehinderten, ohne dass dazu genauere Angaben möglich wären.

Die Auswirkungen aller dieser Einflussfaktoren werden durch den Erwartungswert und die Streuungsmasse der Türleistungsfähigkeit weitgehend erfasst.

6.23.2 Begleitumstände des Fahrgastwechsels

6.23.21 Verkehrszweck

Weder liessen sich in der Literatur konkrete Angaben zur Abhängigkeit der Fahrgastwechselzeit vom Verkehrszweck finden, noch konnten die eigenen Messungen diesbezüglich ausgewertet werden. Orientierende Anhaltspunkte liefern einzig die Untersuchungen zum Fussgängerverkehr, welche folgende Abweichungen der Fussgängergeschwindigkeit vom Mittelwert zeigen:

•	Pendlerverkehr	+ 11 %
•	Einkaufsverkehr	- 13 %
•	Nutz- und Werkverkehr	+ 20 %
•	Touristik- und Freizeitverkehr	- 18 %

6.23.22 Tageszeit

Die Tageszeit beeinflusst die Fahrgastwechselzeit in zweierlei Hinsicht:

- **Tageszeitabhängiger Fahrgastmix:** Im Tagesverlauf verändert sich der Fahrgastmix bezüglich Alter, Geschlecht, Gewandtheit und Reisezweck. In der Morgenspitze sind fast ausschliesslich Berufspendler unterwegs. Während des Vormittags ist ein hoher Anteil älterer Menschen zu beobachten, während um die Mittagszeit die Schulkinder überwiegen. Der Nachmittagsverkehr wird von älteren Menschen sowie von Müttern mit kleinen Kindern geprägt. In der Abendspitze überlagert sich der Rückreiseverkehr der Stadtbesucher und jener der Berufspendler.
- **Unterschiedliche körperliche Leistungsfähigkeit:** Die körperliche Leistungsfähigkeit des Menschen hängt von der Tageszeit ab. Sie weist ein grösseres Maximum um etwa 8 Uhr morgens sowie ein kleineres um etwa 19 Uhr auf. Dazwischen ist die Leistungsfähigkeit deutlich tiefer mit einem Minimum um etwa 15 Uhr Ortszeit. Diese Veränderung der Leistungsfähigkeit betrifft alle Fahrgäste in gleicher Weise.

Um ein zutreffendes Bild der Tageszeitabhängigkeit der Türleistungsfähigkeit zu erhalten müssen diese Einflussfaktoren mit geeigneten Indikatoren quantifiziert werden. Dazu standen für den Zeitbereich zwischen 7.00 Uhr und 19.00 Uhr zur Verfügung:

Tagesgang der allgemeinen körperlichen Leistungsfähigkeit des Menschen: Bei normaler körperlicher Beanspruchung, wozu auch das Besteigen oder Verlassen eines Fahrzeuges zählt, mobilisiert der Fahrgast die sogenannte automatisierten Leistungen und die physiologische Leistungsbereitschaft gemäss Abbildung 3-16. Der Mittelwert dieses praktischen Leistungsvermögens der einzelnen Fahrgäste im betrachteten Zeitabschnitt wurde zu 100 % gesetzt und daraus die einzelnen Stundenfaktoren abgeleitet.

Tagesgang der Fussgängergeschwindigkeiten: Der Tagesverlauf der Fussgängergeschwindigkeiten gemäss Abbildung 3-21 beinhaltet nebst der variablen körperlichen Leistungsfähigkeit auch die tageszeitliche Verschiebung in der Zusammensetzung der Fussgängergruppen und der Verkehrszwecke. Er ist damit ein guter Indikator für die zu erwartende Leistungsfähigkeit beim Fahrgastwechsel, auch wenn aufgrund der Verkehrsmittelwahl gewisse Unterschiede im Gewicht der einzelnen Verkehrszwecke auftreten.

Tagesverlauf der Verkehrszwecke im öffentlichen Verkehr, verbunden mit der Reisezweckabhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit: Die aus dem Fussgängerverkehr bekannte und im Abschnitt 6.23.21 erwähnte Abhängigkeit zwischen den Verkehrszwecken und der mittleren Fussgängergeschwindigkeit kann mit dem Tagesgang der Verkehrszwecke im öffentlichen Verkehr gemäss Abbildung 3-102 verknüpft werden. Für jede Stunde lässt sich daraus eine gewichtete Geschwindigkeit der Fahrgäste ableiten und diese wiederum in Stundenfaktoren umrechnen.

Geeignete Messfahrten: Einen wichtigen Hinweis auf den Verlauf der mittleren Fahrgastwechselzeit während des ganzen Tages geben die Messfahrten bei den BVB Basel. Diese dauerten Dank der Kürze der Linie nur rund 20 Minuten, sodass sich eine feine Intervallunterteilung ergab. Um die zufälligen Ausschläge zu glätten wurde ein gleitendes Mittel über jeweils drei Messwerte gebildet. In den fehlenden Stunden (Pausen zwischen 10 und 11 sowie zwischen 13 und 14 Uhr) wurde interpoliert [559].

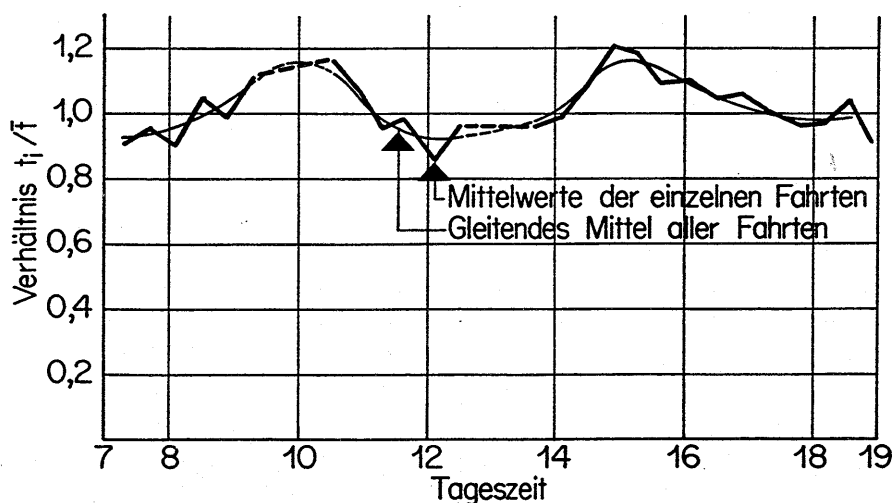


Abb. 6-10: Tagesganglinie der Fahrgastwechselzeit bei den Messfahrten des IVT vom 23. und 24. April 1990 in Basel, bezogen auf den Tagesmittelwert [559].

Die Tagesganglinie deckt sich gut mit den weniger detailliert aufschlüsselbaren Resultaten bei der S-Bahn München, wo sich ebenfalls ausgesprochen günstige Werte in der Morgenspitze, zwischen Mittag und frühem Nachmittag sowie in der Abendspitze gezeigt hatten. Als Abweichungen der mittleren Fahrgastwechselzeit vom Durchschnitt ergaben sich hier:

- Morgenspitze - 10 %
- Vormittag + 6 %
- Mittagsspitze - 6 %
- Nachmittag + 9 %
- Abendspitze - 5 %

Gut erkennbar ist in beiden Fällen der postulierte Zusammenhang mit dem Verkehrszweck. Bezüglich des Einflusses der Ermüdung der Fahrgäste können kaum weitgehende Aussagen abgeleitet werden. Immerhin zeigt die Abendspitze einen deutlich ungünstigeren Wert als die Morgenspitze.

Mittels dieser vier Indikatoren kann ein Verlauf der Türleistungsfähigkeiten während eines Tages aufgezeichnet werden, dargestellt als Prozentsatz des Mittelwertes zwischen 7.00 Uhr und 19.00 Uhr. Dessen Kehrwert ist der Korrekturfaktor für die Fahrgastwechselzeit:

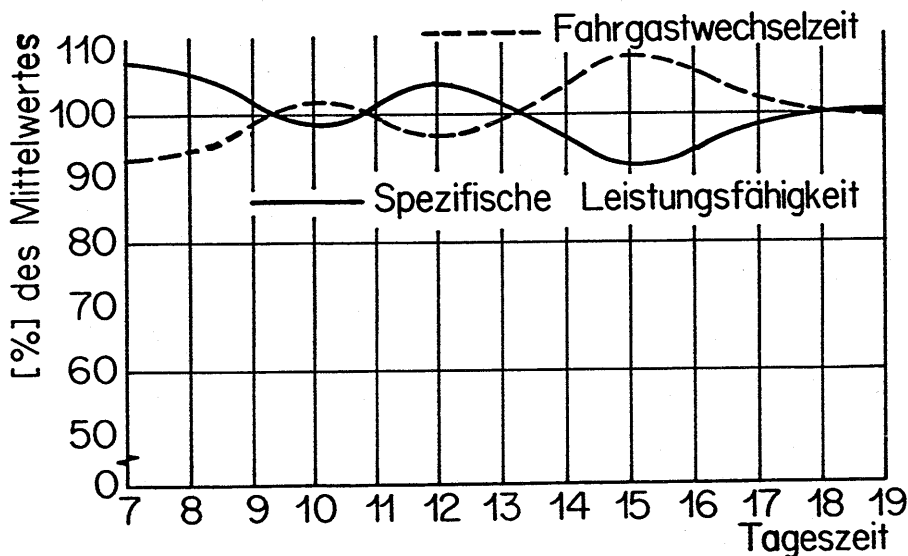


Abb. 6-11: Tagesgang der spezifischen Türleistungsfähigkeit und der mittleren Fahrgastwechselzeit, dargestellt in Prozenten des Mittelwertes zwischen 7.00 Uhr und 19.00 Uhr.

6.23.23 Witterung/Klima

Aus der Fussgängerforschung lässt sich ableiten, dass die Gehgeschwindigkeit bei 25 Grad C nur etwa 92 % des Mittelwertes erreicht, während sie bei 0 Grad Celsius auf etwa 109 % ansteigt. In erster Näherung lässt sich damit annehmen, dass bei kaltem Wetter mit etwa 10 % kürzeren, bei heißem Wetter dagegen mit etwa 10 % längeren Fahrgastwechselzeiten zu rechnen ist. Genauere Angaben sind leider nicht möglich.

6.23.24 Besetzungsgrad des Fahrzeuges

Ein hoher Besetzungsgrad eines Fahrzeuges führt zu einer starken Belegung der Stehplatzflächen im Türbereich. Die Leistungsfähigkeit der Türe wird dadurch abgemindert und die Fahrgastwechselzeit verlängert. In einem Fussgängerstrom wirken allerdings Fussgängerdichte und -geschwindigkeit in gegenläufiger Weise auf die Leistungsfähigkeit ein, indem die maximale Leistungsfähigkeit des Querschnittes einer ebenen Fussgängeranlage erst bei einer Dichte von 1.75 P/m^2 erreicht wird, jene einer Treppe sogar erst bei 2.23 P/m^2 . Im Fundamentaldiagramm des Fussgängerverkehrs (Abbildungen 3-33 und 3-35) ist der Zusammenhang zwischen der Fussgängerdichte und der spezifischen Leistungsfähigkeit dargestellt. Ihr Kehrwert zeigt bei den Dichten mit maximaler Leistungsfähigkeit sein Minimum:

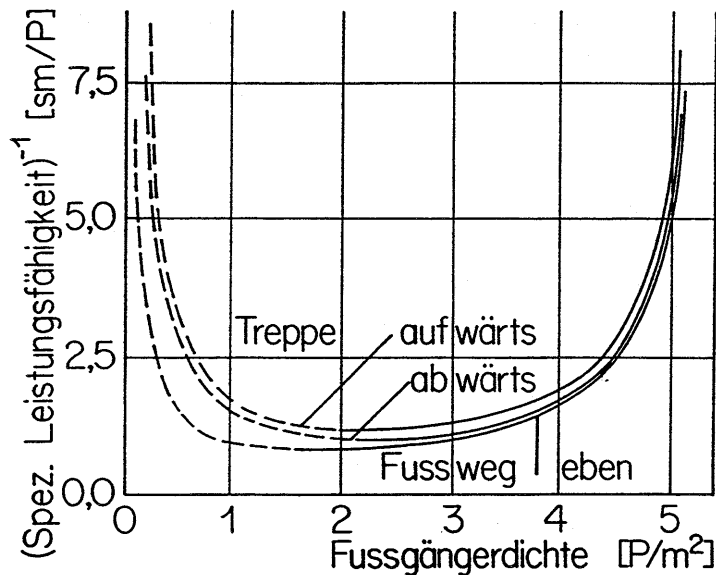


Abb. 6-12: Kehrwert der spezifischen Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen in Funktion von der Fussgängerdichte, basierend auf dem Fundamentaldiagramm für Fussgängeranlagen. Bei einem Fahrzeugeinstieg entspricht dieser Wert der spezifischen Fahrgastwechselzeit.

Dass auch bei Fahrzeugeinstiegen erst bei grösserer spezifischer Türbelastung und damit dichteren Fahrgastströmen die höchste Leistungsfähigkeit erreicht wird, wurde bereits gezeigt. Im Bereich höherer Stehplatzdichten treten dagegen zusätzliche Erscheinungen auf:

- Die Fahrgastdichte im Fahrgastwechselstrom ist kleiner als jene im Stauraum, da ein Teil der Fahrgäste im Stauraum zwar Fläche belegt, nicht aber am Fahrgastwechsel teilnimmt,
- Der Fahrgastwechselstrom ist nicht ungestört, sondern wird durch die Stehplatzfahrgäste behindert, welche die nutzbare Bewegungsfläche im Stauraum verkleinern und den effektiven Türquerschnitt einengen.
- Der Stehplatzbelegungsgrad verändert sich während des Fahrgastwechsellvorganges laufend und ist damit ein dynamischer Vorgang, der sich kaum analytisch fassen

lässt. Beim Einsteigen füllt sich der Kurs allmählich, die Fahrgastdichte steigt an und die Fahrgastwechselzeit nimmt zu. Beim Aussteigen tritt das Gegenteil ein.

- Die Leistungsfähigkeit der Verbindungswege im Fahrzeug beeinflusst massgeblich den Dichteverlauf im Stauraum während des Fahrgastwechselforganges.
- Bei hoher Stehplatzdichte im Stauraum wird zwar der Fahrgastwechsel behindert, hingegen befindet sich bereits eine grössere Zahl aussteigewilliger Fahrgäste in Türnähe und muss nach dem Halt nicht erst zu ihr gelangen. Die Zeitlücken können dadurch besser ausgenützt werden.

Diese Einflüsse wirken gegenläufig, lassen aber in der Tendenz für hohe Fahrgastdichten eine Verlangsamung des Fahrgastwechsels erwarten. Dafür sprechen verschiedene - wenn auch quantitativ inkonsistente - Hinweise aus der Literatur. Nebst den Literaturangaben konnte sich die Quantifizierung auf die Messungen von Genf, Grenoble und München stützen. Die Messungen an den Bussen der BVB Basel lassen leider infolge durchwegs schwacher Belegungen keine Aussagen zu. Der Zuschlagfaktor in Funktion des Stehplatzbelegungsgrades wurde mittels einer quadratischen Regressionsrechnung ermittelt. Die der Rechnung zugrundegelegte Fahrgastdichte ist das Mittel aus der Situation vor und nach dem Fahrgastwechselforgang und stammt aus den gleichzeitigen Belegungszählungen der Fahrzeugbereiche. Im Durchschnitt aller ausgewerteten Messungen ergab sich folgende Beziehung für den Zuschlagfaktor zur mittleren Fahrgastwechselzeit in Funktion des Stehplatzbelegungsgrades im Türraum:

$$(6 - 12) \quad k_D = 1.000 - 0.0986 \cdot D_{F,T} + 0.0374 \cdot D_{F,T}^2$$

wobei k_D Korrekturfaktor zur Fahrgastwechselzeit beim Auftreten von Stehplatzfahrgästen im Türraum [-]
 $D_{F,T}$ Stehplatzdichte im Türraum, Mittel aus Situation vor und nach dem Fahrgastwechselforgang [P/m^2]

Die Fahrgastwechselquote bei den Messungen war variabel, aber nie extrem. Der dargestellte Zuschlagfaktor ist demnach repräsentativ für durchschnittliche Verhältnisse, ist aber für die Situation vollständiger Füllung oder Entleerung eines Kurses eindeutig zu ungünstig.

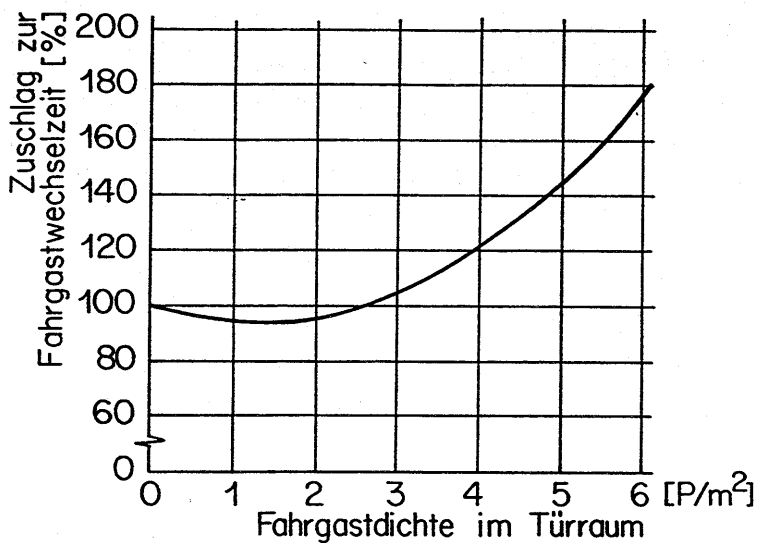


Abb. 6-13: Zuschlagsfaktor [%] zur Fahrgastwechselzeit bei Stehplatzdichte = 0 P/m², in Abhängigkeit vom Stehplatzbelegungsgrad.

Der Korrekturfaktor von 1.75 bei einer Fahrgastdichte von 6 P/m² liegt im Mittel der Literaturangaben. Zu beachten sind allerdings die Abweichungen selbst der eigenen Messungen mit Faktoren von zwischen 1.12 und 3.01 für die genannte Fahrgastdichte. Der Datenumfang ist leider zu klein, um die Gründe dafür zu eruieren. Es ist vorderhand davon auszugehen, dass diese weitgehend auf zufällige Einflüsse zurückgehen und zudem mit dem beschränkten Datenumfang zusammenhängen.

6.23.25 Bewegungsrichtung

Mit Ausnahme bestimmter Gegebenheiten im Fernverkehr verläuft das Aussteigen stets schneller als das Einsteigen. Ursachen dafür sind:

- ungeordnetes Zuströmen der Fahrgäste zur Türe beim Einsteigen, geordnetes Zuströmen beim Aussteigen
- Verluste durch Rückstau beim Einsteigen
- unbewusste Geschwindigkeitsreduktion der Fahrgäste beim Betreten eines Fahrzeuges
- langsames Aufwärtsgehen bei Treppen

Auf Treppen beträgt die maximale spezifische Leistungsfähigkeit beim Aufwärtsgehen 0.850 P/sm und beim Abwärtsgehen 0.979 P/sm mit Horizontalgeschwindigkeiten von 0.38 m/s beziehungsweise 0.44 m/s. Treppen sind somit in Steigungsrichtung um 13 % weniger leistungsfähig

als in Gefällerrichtung und die Abweichung vom Mittelwert beträgt rund $\pm 7\%$. Deutlich mehr, nämlich $\pm 11\%$, weist die Literatur für Fahrzeugeinstiege ohne Treppen aus, während für Treppeneinstiege lediglich $\pm 8\%$ genannt werden.

Die Labormessungen an Einheitswagen IV der SBB und an einem Einstiegsmodell für Doppelstockwagen haben keine klare Tendenz gezeigt. Beim Einheitswagen IV unterschieden sich die Ein- und Aussteigezeiten am Perron P55 kaum. Beim Perron P30 dagegen verlief das Aussteigen etwas schneller als das Einsteigen. Bei der Einstiegsmaquette mit ebenen Verhältnissen war bezüglich der Bewegungsrichtung kein relevanter Unterschied erkennbar, indem bei einem Teil der Messungen das Einsteigen rascher war, beim anderen Teil das Aussteigen. Die 17 Datensätze aus den Messungen im praktischen Betrieb ergeben für reine Ein- beziehungsweise Aussteigevorgänge eine Abweichung vom Mittelwert um $\pm 7\%$, desgleichen eine Regressionsrechnung über alle Messwerte. Diese Spannweite steht in Übereinstimmung mit den Beobachtungen auf Treppen und kann somit als gut gesichert betrachtet werden.

6.23.26 Gegenseitige Behinderung

Entgegengesetzte Fahrgastströme an einem Einstieg üben dreierlei Einflüsse auf die Fahrgastwechselzeit einer Fahrgastgruppe aus:

1. Lläuft der Fahrgastwechsellvorgang am Querschnitt in beiden Richtungen gleichzeitig ab, so werden die einzelnen Fahrgäste in ihrer Bewegung behindert, was den Fahrgaststrom verlangsamt und die Fahrgastwechselzeit ansteigen lässt.
2. Wird der Querschnitt von den Fahrgästen zunächst nur in der einen Richtung begangen, so bleibt der Fahrgaststrom zwar an der Türe unbehindert, wird aber ausserhalb des Türquerschnittes von den wartenden Fahrgästen der anderen Richtung behindert.
3. Indem zwei Fahrgastströme auf die Benützung des Durchganges warten, ist die Wahrscheinlichkeit grösser, dass jede Zeitlücke ausgenützt wird. Diese bessere Ausnützung der zur Verfügung stehenden Leistungsfähigkeit führt tendenziell zu tieferen Fahrgastwechselzeiten.

Qualitativ entsteht öfters der Eindruck, dass ein Fahrgastwechsel mit ausschliesslich ein- oder aussteigenden Fahrgästen weniger Zeit benötigt als ein gemischter Fahrgastwechsel bei gleicher Summe beteiligter Personen. Unter dem Zeitmehrbedarf infolge entgegengesetzter Fahrgastströme ist dabei nur jener Zeitanteil zu verstehen, welcher den aufgrund des Richtungsanteiles zu erwartenden Zeitbedarf übersteigt. Die Grössenordnung der Behinderung wird aber in der Regel überschätzt. Bei entgegengesetzten Strömen auf Fussgängeranlagen verursacht die Behinderung einen Leistungsabfall, der bei gleichgrossen Fussgängerströmen 4% beträgt und bei einem Verhältnis von 90% zu 10% auf 14.5% ansteigt. Er bleibt insgesamt klein, weil sich die Fussgängerströme separieren und sich ein Rechtsverkehr herausbildet. Eine Verlängerung der Fahrgastwechselzeit um rund 14% nennen die Literaturangaben.

Zur Bestimmung des Einflusses der gegenseitigen Behinderung wurden die Messreihen in reine Ein- beziehungsweise Aussteigevorgänge sowie in gemischte Fahrgastwechsel separiert. Die gemischten Fahrgastwechsellvorgänge wurden einer linearen Regressionsgleichung unterzogen. Aus den Leistungsfähigkeiten der reinen Ein- und Aussteigevorgänge liess sich für beliebige Richtungsanteile eine theoretische Leistungsfähigkeit unter der Annahme errechnen, dass sich

Ein- und Aussteigevorgänge in keiner Weise beeinflussen. Diese Leistungsfähigkeiten konnten nun den mittels Regressionsrechnung gefundenen Werten gegenübergestellt und aus der Differenz der Einfluss der Behinderung abgeleitet werden.

Die Auswertung der 17 Datensätze zeigt im Durchschnitt eine Zunahme der Fahrgastwechselzeit infolge gegenseitiger Behinderung um lediglich 2 % und damit deutlich weniger als aufgrund der Literatur sowie der Erkenntnisse zu den Fussgängeranlagen zu erwarten wäre. Der Widerspruch erklärt sich dadurch, dass die eingangs dargestellten behindernden Einflüsse 1 und 2 erst bei grossen Fahrgastwechselzahlen zum Tragen kommen, während der beschleunigende Einfluss 3 vor allem bei kleinen Fahrgastwechselzahlen wirksam ist. Mit durchschnittlich 9.6 Fahrgästen pro Messung waren die beobachteten Fahrgastwechselzahlen so bescheiden, dass im Mittel keine Behinderung eintreten konnte, sehr wohl aber eine bessere Ausnützung des Querschnittes. Die Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit des Türquerschnittes durch Gegenverkehr ist mithin eine Funktion der Türbelastung. Diese betrug bei einer mit der Zahl der Messungen gewichteten mittleren Türbreite von 1.43 m rund 6.7 P/m'. Die vorliegenden Angaben reichen nicht zur Formulierung einer präzisen Gesetzmässigkeit aus, aber es lässt sich immerhin folgende Arbeitshypothese aufstellen:

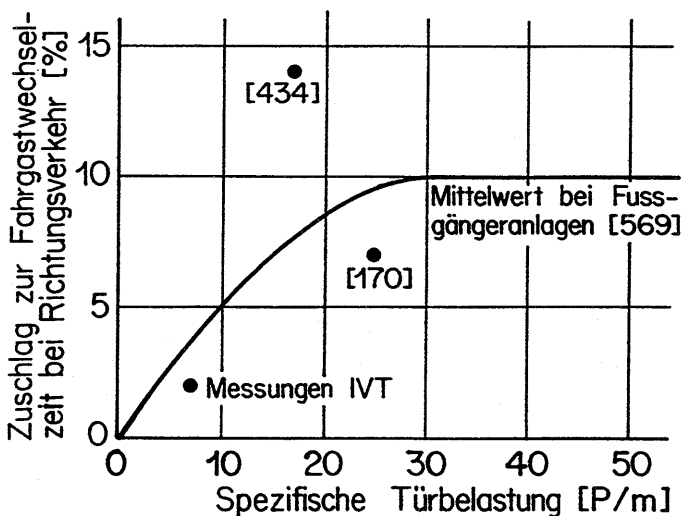


Abb. 6-14: Arbeitshypothese zur Abhängigkeit zwischen der spezifischen Türbelastung und der prozentualen Verlängerung der Fahrgastwechselzeit bei Gegenverkehr.

6.23.3 Charakteristiken des Einstieges

6.23.31 Einstiegsbreite

In der Theorie von Abschnitt 2 sowie im Zusammenhang mit den Fussgängeranlagen wurde eine lineare Abhängigkeit zwischen Türleistungsfähigkeit und Türbreite postuliert. Dem stehen die Angaben einiger Untersuchungen entgegen, wonach die Leistungsfähigkeit in Sprüngen entsprechend der Spurenzahl ansteige. Dies würde allerdings höchstens dann zutreffen, wenn die Fahr-

gäste aufgereiht vor der Türe warten und mit minimalen Zeitlücken das Fahrzeug betreten würden. In der Realität ist hingegen der Fahrgastwechsel ungeordnet, sodass die Bewegung der Fahrgäste auch am Einstieg nicht in definierten Bahnen abläuft. Fahrgäste benötigen dabei nicht primär einen bestimmten Abstand in Gehrichtung zum Vordermann, sondern vielmehr einen ellipsenförmigen Bewegungsraum bestimmter Fläche. Diese Fläche entscheidet über das Geschwindigkeitsverhalten und über die Leistungsfähigkeit des Querschnittes. Türen mit einer lichten Breite, welche keinem ganzzahligen Vielfachen der Spurbreite von etwa 0.65 m entspricht, weisen daher eine höhere Leistungsfähigkeit auf als aufgrund der nächsttieferen ganzzahligen Spurenzahl zu erwarten wäre. Selbst Spurteiler, welche eine Kanalisierung des Fahrgastwechsels erzwingen, haben deshalb keinen Einfluss auf die Fahrgastwechselzeit.

Die experimentelle Untersuchung des Einflusses der Türbreite würde Modellversuche erfordert, für welche die Mittel nicht bereitstehen. Es muss daher auf Indizien abgestellt werden, im Bewusstsein, dass damit den Erfordernissen eines wissenschaftlich korrekten Nachweises nicht Rechnung getragen werden kann. Zur Prüfung der Hypothese einer linearen Abhängigkeit wurden die 102 verfügbaren und plausiblen Angaben zur Türleistungsfähigkeit aus der Literatur und den eigenen Messungen einer Regressionsrechnung unterzogen. Untersucht wurde, ob die spezifische Leistungsfähigkeit eine Funktion der Breite der Türe ist. Bleibt die spezifische Türleistungsfähigkeiten für alle Türbreiten gleich und sind keine Ausschläge bei ganzzahligen Vielfachen der Spurbreite zu erkennen, so ist die Türleistungsfähigkeit linear von der Türbreite abhängig. Vorgängig wurden die Leistungsfähigkeiten auf eine fiktive Einstiegshöhe Null reduziert. Der spezifische Leistungsverlust von 0.3878 P/sm pro m Höhendifferenz wird im folgenden Abschnitt über den Einfluss der Einstiegshöhe hergeleitet. Die Regressionsgleichung für alle Werte lautet:

$$(6 - 13) \quad L_s(l_{T,b}) = 1.0645 \text{ P/sm} - 0.0902 \cdot l_{T,b}$$

wobei $l_{T,b}$ Türbreite [m]

Diese Gleichung besagt, dass die spezifische Türleistungsfähigkeit mit zunehmender Türbreite leicht abnimmt. Beträgt sie bei einer Türbreite von 0.70 m noch 1.00 P/sm, so sinkt sie bei einer Türe von 1.90 m Breite auf 0.89 P/sm. Die Neigung der Regressionsgeraden wird allerdings stark von einigen wenigen tiefen Werten überbreiter Türen bestimmt. Beschränkt man die Regressionsrechnung auf Türen bis 1.40 m lichter Breite, so lautet die Regressionsgleichung:

$$(6 - 14) \quad L_s(l_{T,b}) = 0.9956 \text{ P/sm} - 0.0259 \cdot l_{T,b}$$

Für die Türbreiten von 0.70 m und 1.90 m betragen die spezifischen Leistungsfähigkeiten nunmehr 0.98 P/sm und 0.95 P/sm. Diese Leistungsabnahme ist derart gering, dass der Nachweis einer linearen Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit von der Türbreite als erbracht betrachtet werden kann. Die niedrigen Werte überbreiter Türen weisen darauf hin, dass Fahrzeugtüren von über etwa 1.50 m lichter Breite im praktischen Betrieb kaum voll ausgenützt werden, weil nicht mehr die Querschnittsleistungsfähigkeit massgebend ist, sondern vielmehr das Zuströmen der Fahrgäste.

6.23.32 Einstiegshöhe

Die Untersuchung des Einflusses der Einstiegshöhe auf die Türleistungsfähigkeit konnte sich auf insgesamt 106 Angaben stützen, wovon 23 aus eigenen Messungen. Trotz des grossen Datenumfanges stösst die Erarbeitung des genauen Zusammenhanges auf verschiedene Schwierigkeiten:

- Die zur Verfügung stehenden Angaben sind inhomogen bezüglich Methodik und Fahrgastwechsellzahl.
- Es finden sich keine Messungen zu Einstiegshöhen von über etwa 900 mm.
- Verschiedene Indizien sprechen dafür, dass unterhalb eines Schwellenwertes von etwa 200 mm kein Leistungsverlust festzustellen ist.

Da Modelluntersuchungen im erforderlichen grossen Umfang zur Klärung der Detailfragen nicht möglich waren, muss die Abhängigkeit zwischen Höhendifferenz und Türleistungsfähigkeit aufgrund der vorliegenden Informationen und von Plausibilitätsüberlegungen rekonstruiert werden. Das Problem lässt sich gliedern in das generelle Ausmass der Abhängigkeit sowie die Bestimmung der unteren und oberen Schwellenwerte.

Zur Prüfung des generellen Ausmasses wurden als erstes sämtliche zur Verfügung stehenden Angaben einer Regressionsrechnung unterzogen. Die lineare Regressionsrechnung als einfachster Ansatz ergibt folgende Bestimmungsgleichung für die Leistungsfähigkeit in Funktion der Höhendifferenz:

$$(6 - 15) \quad L_s = 0.9608 - 0.3878 \cdot h_{T,v}$$

wobei $h_{T,v}$ Einstiegshöhe = Höhendifferenz zwischen Perron und Wagenboden [m]

Der spezifische Leistungsverlust von rund 0.39 P/sm·m stimmt praktisch mit dem aus den Literaturangaben abgeleiteten Wert im Abschnitt 4.32.32 überein. Demnach vermindert sich die spezifische Leistungsfähigkeit einer Tür bei einer Einstiegshöhe von 0.50 m um rund 20 % und bei einer Einstiegshöhe von 1.00 m um rund 40 %, womit sich die Fahrgastwechselzeit bei 0.50 m Höhendifferenz um 25 % und bei 1.00 m um 67 % erhöht.

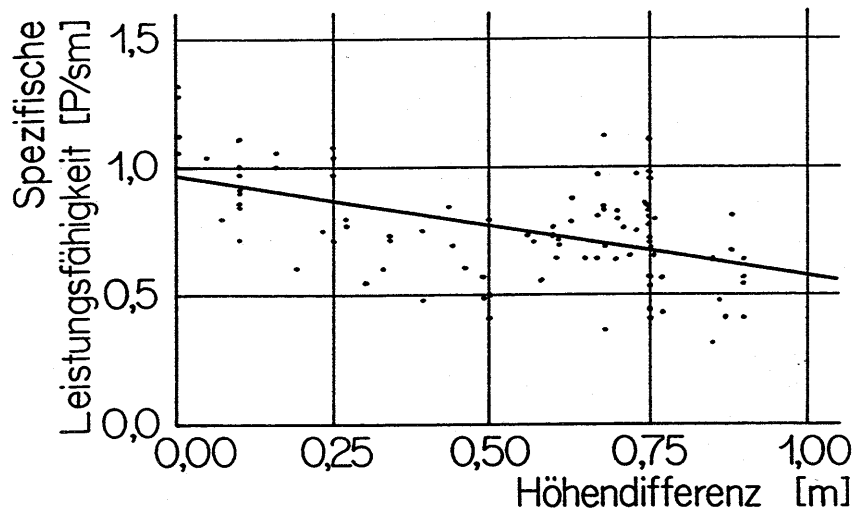


Abb. 6-15: Lineare Regression von 106 Einzelangaben zum Zusammenhang zwischen Höhendifferenz am Einstieg und spezifischer Leistungsfähigkeit.

Für die Regressionsgleichung (6 - 14) ist der Gültigkeitsbereich festzulegen, denn ohne Einschränkung würde die Türleistungsfähigkeit bei einer theoretischen Höhendifferenz von etwa 2.48 m auf Null zurückgehen. In Abschnitt 6.22.13 wurde festgestellt, dass bei einer starken Türbelastung die spezifische Leistungsfähigkeit sowohl eines ebenen Fahrzeugeinstieges wie eines Treppeneinstieges um denselben Prozentsatz unter jenem der entsprechenden Fussgängeranlagen liegt. Dies bedeutet für Treppeneinstiege eine spezifische Leistungsfähigkeit von 0.714 P/sm. Mittels der Regressionsgleichung lässt sich nun abschätzen, dass diese abgeminderte spezifische Leistungsfähigkeit bei einer Höhendifferenz von rund 0.64 m erreicht wird. Bei den üblichen Treppenverhältnissen von Fahrzeugen entspricht diese Höhendifferenz drei Trittstufen. Die Erfahrung zeigt, dass der Bewegungsablauf bei drei und mehr Trittstufen demjenigen auf Treppen entspricht. Das durch die obige Abschätzung erhaltene Resultat darf somit als plausibel gelten.

Zum Vergleich wurde mit demselben Datensatz eine quadratische Regression gerechnet:

$$(6 - 16) \quad L_s = 1.0276 - 0.9218 \cdot l_{T,v} + 0.6033 \cdot l_{T,v}^2$$

Diese Gleichung nimmt ihr Minimum bei jener Höhendifferenz ein, ab welcher die Leistungsfähigkeit normaler Treppen gilt. Mit einer Höhendifferenz des Einstieges von 0.76 m zeigt sich dafür im Rahmen der möglichen Genauigkeit etwa derselben Wert, wie er in der vorangehenden Überlegung gefunden worden war. Damit lässt sich festhalten, dass die Leistungsfähigkeit eines Fahrzeugeinstieges bei mehr als drei Treppenstufen derjenigen einer normalen Treppe entspricht.

6.23.33 Ergonomische Gestaltung

Die Untersuchung des Einflusses der ergonomischen Gestaltung nach Kriterien wie Stufenhöhe, Stufentiefe, Stufenverhältnis und Regelmässigkeit war aus Aufwandgründen nicht möglich und es fanden sich auch in der Literatur kaum zweckdienliche Angaben. Zwei Untersuchungen beziffern den Zeitmehrbedarf bei ungünstiger Treppengestaltung (unregelmässige Stufenfolge, steile Treppen) auf etwa 10 % und den Zeitminderbedarf bei optimaler Gestaltung auf denselben Betrag. Die eigenen Beobachtungen am Doppelstockwagen der NS in München hat überdies das widersprüchliche Resultat erbracht, dass die Fahrgastwechselzeiten unter vergleichbaren Bedingungen bei kleiner Einstiegshöhe grösser waren als bei grösserer zu überwindender Höhendifferenz. Die Erklärung dafür muss in den Details der Einstiegsgestaltung gesucht werden.

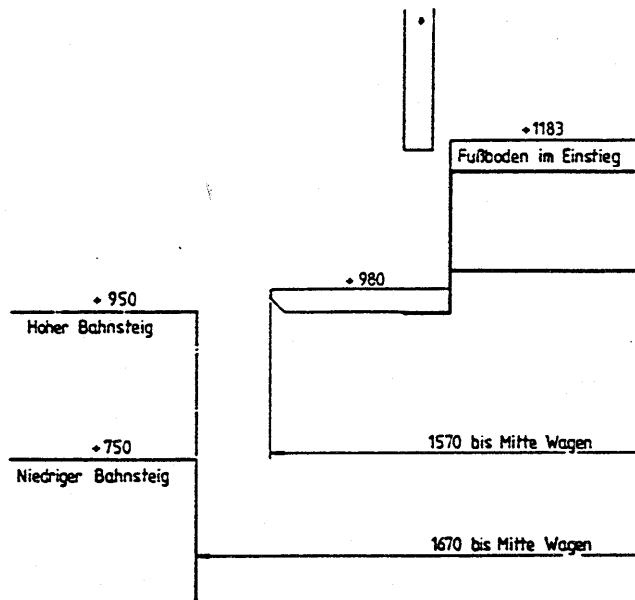


Abb. 6-16: Situation der Einstiegsverhältnisse und Trittanordnung beim Doppelstockwagen der NS mit Perron 750 mm und 950 mm [315].

Bei einer Trittbretthöhe von 980 mm und einer Perronhöhe von 950 mm entsteht eine Stolperkante von 30 mm. Der Bewegungsablauf wird durch diese Kante und die nachfolgende verbleibende Treppenstufe von 203 mm sehr unregelmässig. Demgegenüber ergeben sich beim Perron 750 mm zwei ähnlich grosse Trittschritte von 230 mm und 203 mm, was dem Bewegungsablauf eher entgegenkommt. Beim baugleichen Doppelstockwagen der Zürcher S-Bahn zeigt sich im Gegensatz dazu die erwartete Steigerung der Leistungsfähigkeit mit abnehmender Höhendifferenz. Die Verlängerung der Fahrgastwechselzeit infolge ungünstiger ergonomischer Verhältnisse betrug bei der S-Bahn München rund 11 %. Die genannte Grössenordnung aus der Literatur bestätigt sich und es kann als Richtwert ein Verlust an spezifischer Leistungsfähigkeit bei ergonomisch ungünstigen, das heisst dem Bewegungsablauf schlecht angepassten, Treppen von rund 10 % angesetzt werden.

6.23.34 Spaltbreite

Eine Verzögerung des Fahrgastwechsels infolge eines Spaltes zwischen Fahrzeug und Perron tritt ein, wenn der natürliche Bewegungsablauf gestört wird und/oder wenn sich bei den Fahrgästen Angstgefühle einstellen. Der Bewegungsablauf wird gestört, wenn die ein- oder aussteigen-

den Fahrgäste nicht ihre gewohnte Schrittweite beibehalten können. Unter etwa 50 bis 100 mm ist weder mit einer Verlangsamung des Fahrgastflusses zu rechnen, noch verzeichnen Gehbehinderte ernsthafte Schwierigkeiten. Überschreitet die Spaltbreite hingegen einen Wert von 200 mm, so ist mit einer Verlängerung der Fahrgastwechselzeit um 18 % und mehr zu rechnen. Besonders ungünstig wirkt es sich aus, wenn zusätzlich zur Distanz zwischen Perron und Wagenboden eine Höhendifferenz überwunden werden muss. Genauere Angaben sind aber nicht möglich.

6.24 Zusammenfassende Beziehung für die Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre

In den vorstehenden Abschnitten wurden die wichtigsten Einflussgrößen auf den Erwartungswert und die Standardabweichung der Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre quantifiziert:

- Türbelastung
- Türbreite
- Einstieghöhe
- Richtungsanteil
- Abstand der Türen

Diese quantitativen Abhängigkeiten lassen sich in einer Beziehung für die spezifische Türleistungsfähigkeit zusammenfassen. Für Türabstände von unter 10 m gilt:

$$(6-17) \quad L_s = \left(0.93 + 0.14 \cdot \frac{A}{F}\right) \cdot \left(\frac{0.9608 - 0.3878 \cdot I_{T,v}}{0.9608}\right) \cdot 0.781 \cdot \left(\frac{F}{I_{T,b}}\right)^{0.0450}$$

Richtungsanteil
Höhendifferenz
Türbelastung

Entsprechend lautet die Beziehung für Türabstände über 10 m:

$$(6-18) \quad L_s = \left(0.93 + 0.14 \cdot \frac{A}{F}\right) \cdot \left(\frac{0.9608 - 0.3878 \cdot I_{T,v}}{0.9608}\right) \cdot 0.488 \cdot \left(\frac{F}{I_{T,b}}\right)^{0.1651}$$

wobei	L_s	Spezifische Leistungsfähigkeit der Türe [P/sm]
	A	Anzahl der Aussteiger an der Türe [P]
	F	Fahrgastwechselzahl der Türe [P]
	$I_{T,v}$	Einstieghöhe [m]
	$I_{T,b}$	Türbreite [m]

Beide Ausdrücke lassen sich durch die Zusammenfassung von Faktoren etwas vereinfachen. Die Beziehung für die spezifische Türleistungsfähigkeit bei Türabständen unter 10 m wird zu:

$$(6-19) \quad L_s = \frac{(0.756 \cdot F + 0.114 \cdot A) \cdot (0.961 - 0.388 \cdot I_{T,v})}{F^{0.955} \cdot I_{T,b}^{0.045}}$$

Der analoge Ausdruck für Türabstände über 10 m ist:

$$(6-20) \quad L_s = \frac{(0.472 \cdot F + 0.071 \cdot A) \cdot (0.961 - 0.388 \cdot I_{T,v})}{F^{0.835} \cdot I_{T,b}^{0.165}}$$

Durch Umformen der Grundbeziehung (2-8) und Einsetzen von (6-19) beziehungsweise (6-20) erhält man die Beziehung für den Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre mit Türabständen unter 10 m und eine bestimmte Fahrgastwechselzahl F:

$$(6-21) \quad t_{h,f} = \frac{F^{1.955}}{I_{T,b}^{0.955} \cdot (0.756 \cdot F + 0.114 \cdot A) \cdot (0.961 - 0.388 \cdot I_{T,v})}$$

wobei $t_{h,f}$ Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit an der Türe bei einer Fahrgastwechselzahl F [s]

Der analoge Ausdruck bei Türabständen über 10 m lautet:

$$(6-22) \quad t_{h,f} = \frac{F^{1.835}}{I_{T,b}^{0.835} \cdot (0.472 \cdot F + 0.071 \cdot A) \cdot (0.961 - 0.388 \cdot I_{T,v})}$$

6.3 Leistungsfähigkeit des Türsystemes

6.31 Zweckmässige Kenngrössen

Zur quantitativen Beschreibung des Fahrgastwechsels eines ganzen Kurses eignen sich die zwei folgenden Kenngrössen:

- *Mittlere Fahrgastwechselzeit [s/P]:* Die mittlere Fahrgastwechselzeit eines Kurses gilt nur für ein bestimmtes Fahrzeug und strenggenommen sogar nur für eine bestimmte Fahrgastwechselzahl. Mit ihr lässt sich aber bei gegebener Fahrgastwechselzahl sehr einfach die Fahrgastwechselzeit des Kurses errechnen.
- *Effektive Türleistungsfähigkeit [P/s]:* Die effektive Türleistungsfähigkeit eines Kurses ist der Kehrwert der mittleren Fahrgastwechselzeit. Für diesen Kennwert gelten deshalb dieselben Einschränkungen der Anwendbarkeit. Es handelt sich bei ihr aber um die einsichtigere Bezugsgrösse.

Analog zur Einzeltüre werden die Untersuchungsergebnisse vorwiegend mittels der effektiven Türleistungsfähigkeit dargestellt.

6.32.12 Abhängigkeit von der Fahrgastwechselzahl bei den Messungen

Da die spezifische Leistungsfähigkeit der einzelnen Türen mit wachsender Türbelastung ansteigt und gleichzeitig der Einfluss der Ganzzahligkeit des Fahrgastwechsels weniger zu spüren ist, nimmt die Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse unterproportional zur Fahrgastwechselzahl zu. Zur Quantifizierung dieser Effekte wurden folgende Methoden eingesetzt:

- Auswertung der Literaturangaben.
- Statistische Auswertung der Fahrgastwechselzeiten der Niederflurtrams von TPG und SEMITAG sowie der Gelenkbusse.
- Nachrechnung der beobachteten Fahrzeuge mit ACoST.NeXT.

Die zwei nutzbaren Literaturangaben weisen beide eine starke Leistungssteigerung bei wachsender Fahrgastwechselzahl nach, indem sich die effektive Leistungsfähigkeit des Türsystems bei einer Erhöhung der Fahrgastwechselquote von 10 % auf 100 % des Fassungsvermögens verdoppelt und die mittlere Fahrgastwechselzeit halbiert.

Für Kurse mit drei und vier Türen können aus den eigenen Beobachtungen Folgerungen abgeleitet werden. Dazu wurden die Fahrgastwechselzeiten der Kurse einer nicht-linearen Regressionsrechnung unterzogen. Eine gute Korrelation ergab dabei der Ansatz $a \cdot x^b$:

Tab. 6-10: Korrelationsgleichungen der Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse in Abhängigkeit von der Fahrgastwechselzahl der nutzbaren Messfahrten.

TPG Genf, Niederflurtram Be 4/6	(6-23)	$t_{h,f} = 1.2054 \cdot F^{0.7598}$
SEMITAG Grenoble, Niederflurtram	(6-24)	$t_{h,f} = 0.6819 \cdot F^{0.8206}$
BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 911 ff.	(6-25)	$t_{h,f} = 1.2286 \cdot F^{0.7693}$
BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 921 f.	(6-26)	$t_{h,f} = 1.2860 \cdot F^{0.7852}$
MAN, Niederflur-Gelenkbus NG 272	(6-27)	$t_{h,f} = 1.3881 \cdot F^{0.7787}$
wobei	$t_{h,f}$	Fahrgastwechselzeit des Kurses [s]
	F	Fahrgastwechselzahl des Kurses [P]

Demnach nimmt die mittlere Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses mit wachsender Fahrgastwechselzahl ab und umgekehrt die effektive Türleistungsfähigkeit als deren Kehrwert zu. Die Beziehungen (6-23) bis (6-27) sind jedoch mit dem jeweiligen Fahrzeug verknüpft und damit nicht auf allgemeine Fälle übertragbar. Analog zum Fahrgastwechsel an der Einzeltüre eignet sich zur Be-

schreibung die spezifische Türbelastung besser als die Fahrgastwechselzahl. Das Resultat der entsprechenden Regressionsrechnungen ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

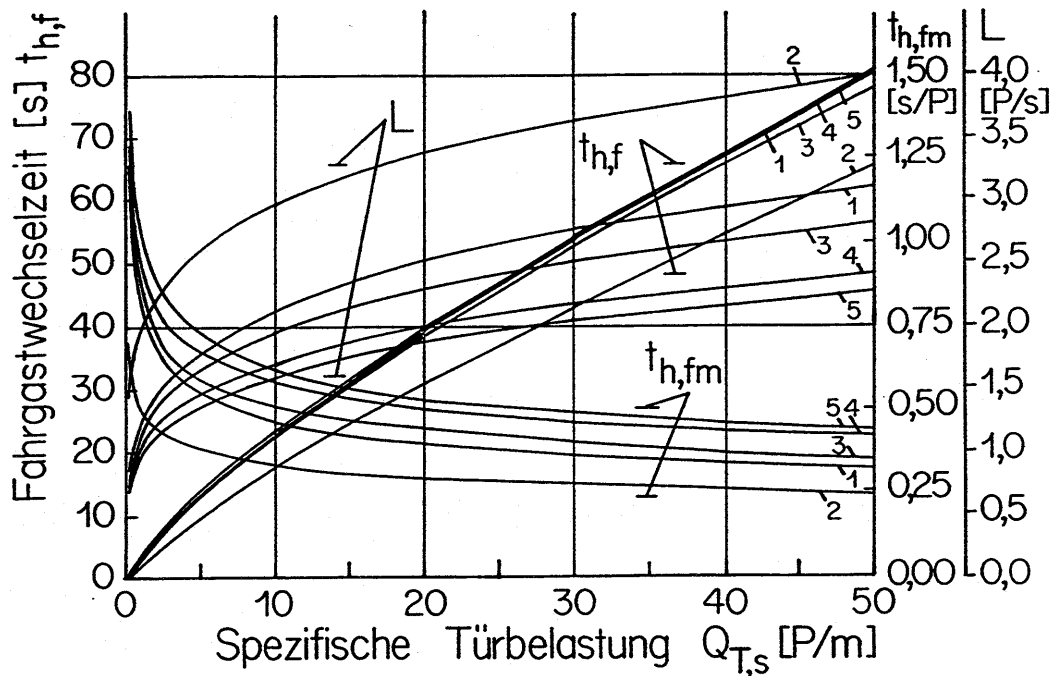


Abb. 6-17: Fahrgastwechselzeit, mittlere Fahrgastwechselzeit und effektive Türleistungsfähigkeit in Funktion der spezifischen Türbelastung. 1 = TPG Genf, Niederflurtram Be 4/6; 2 = SEMITAG Grenoble, Niederflurtram; 3 = BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 911 ff.; 4 = BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 921 f.; 5 = MAN, Niederflur-Gelenkbus NG 272.

Bei allen Fahrzeugen wurde die Berechnung bis zu einer spezifischen Türbelastung von 50 P/m' durchgeführt, welche etwa der obersten in der Praxis vorkommenden Grösse entspricht. Bemerkenswerterweise zeigen die vier Fahrzeuge mit Treppeneinstiegen bei gleicher spezifischer Türbelastung praktisch dieselbe Fahrgastwechselzeit, während sich das einzige echte Niederflurtram der SEMITAG deutlich abhebt. Im weiteren bestätigt sich die Vermutung, wonach die mittlere Fahrgastwechselzeit der Kurse und die effektive Türleistungsfähigkeit bei hoher spezifischer Türbelastung einem Grenzwert zustreben.

Die Ähnlichkeit des Kurvenverlaufes erlaubte es, die beiden Kenngrössen auf die Grenztürbelastung von 50 P/m' zu beziehen und daraus den Ausschöpfungsgrad der Türleistungsfähigkeit für beliebige Türbelastungen abzuleiten. Die fünf Messreihen wurden entsprechend umgeformt und einer gemeinsamen Regressionsrechnung unterzogen. Für den Ausschöpfungsgrad der effektiven Türleistungsfähigkeit in Funktion der spezifischen Türbelastung ergibt sich:

$$(6-28) \quad q_{K,L50} = 43,05 \cdot Q_{T,s}^{0,2146}$$

wobei $q_{K,L50}$ Ausschöpfungsgrad der Leistungsfähigkeit des Türsystems in [%] der Leistungsfähigkeit bei einer spezifischen Türbelastung von 50 P/m'
 $Q_{T,s}$ Spezifische Türbelastung [P/m']

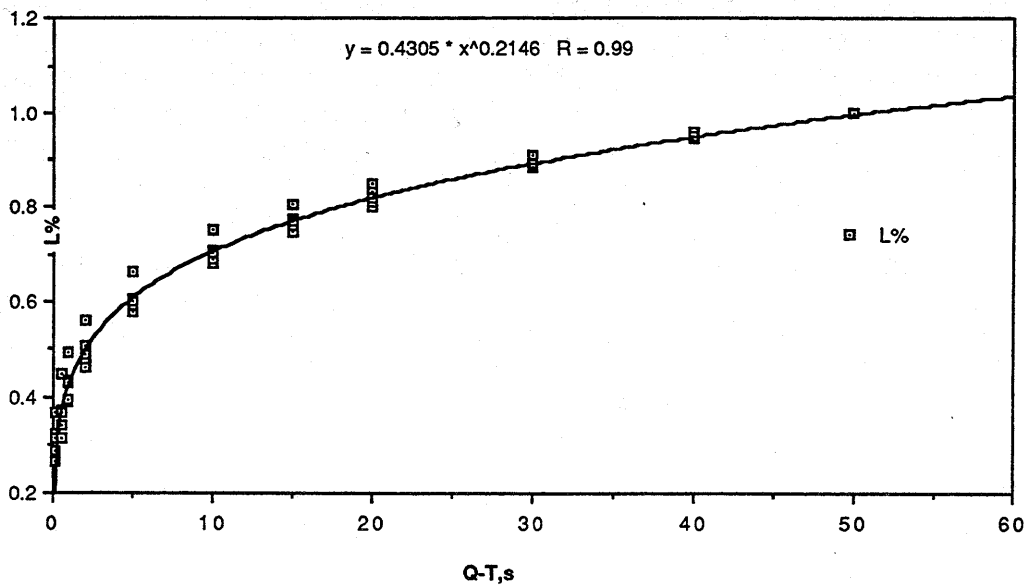


Abb. 6-18: Ausschöpfungsgrad des Türsystems der untersuchten Fahrzeuge in Funktion der spezifischen Türbelastung.

Dieselbe Regressionsrechnung lässt sich mit der mittleren Fahrgastwechselzeit bezogen auf den Minimalwert bei Grenzbelastung ausführen. Man erhält dadurch einen Zuschlagfaktor zu der mit Grenzleistungsfähigkeit errechneten Fahrgastwechselzeit eines Kurses in Funktion der Türbelastung:

$$(6-29) \quad k_{K,L50} = 2.3265 \cdot Q_{T,s}^{-0.2148}$$

wobei $k_{K,L50}$ Zuschlagfaktor zur mittleren Fahrgastwechselzeit bei $Q_{T,s} = 50 \text{ P/m}^2$ zur Berücksichtigung der unausgeschöpften Leistungsfähigkeit des Türsystems bei kleineren Türbelastungen [-]

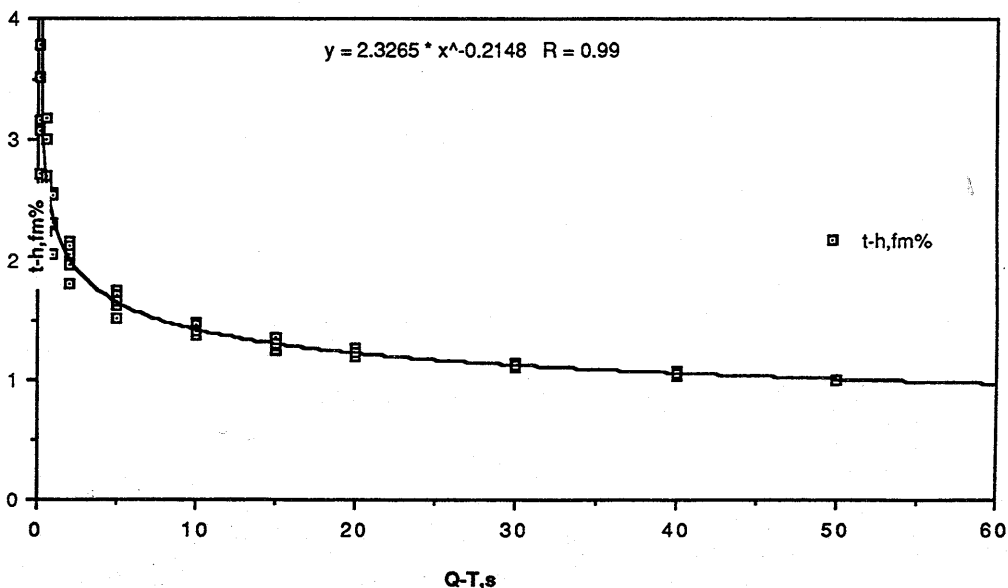


Abb. 6-19: Zuschlagfaktor zur mittleren Fahrgastwechselzeit bei $Q_{T,s} = 50 \text{ P/m}^2$ der untersuchten Fahrzeuge in Funktion der spezifischen Türbelastung.

6.32.13 Nachrechnung der Messwerte mit ACoST.NeXT

Die Messung der Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse erfasste bei den beiden Schienenfahrzeugen eine maximale spezifische Türbelastung $Q_{T,s}$ von 20 P/m' und bei den Autobussen von sogar nur 10 P/m'. Die dargestellten Werte für grössere Türbelastungen sind somit Extrapolationen und da die Krümmung der logarithmischen Regressionskurve sehr empfindlich auf die wenigen Messwerte mit höherer Türbelastung reagiert, ist die Zuverlässigkeit dieser Extrapolation fraglich.

Die aus den Messungen gewonnenen Abhängigkeiten der Fahrgastwechselzeit von der Fahrgastwechselzahl wurden deshalb zur Kontrolle im genannten Wertebereich mit dem Programm ACoST.NeXT nachgerechnet. Damit konnte zusätzlich die Übereinstimmung zwischen Modell und Realität geprüft werden. Der Berechnung wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- Die Fahrgastverteilung auf dem Perron ist gleichmässig.
- Die spezifische Türleistungsfähigkeit wird gemäss Formel (6-18) an die spezifische Türbelastung und die zu überwindende Höhendifferenz angepasst.
- Die Standardabweichung wird gemäss Formel (6-11) errechnet.

Basierend auf diesen Annahmen wurde mittels Stützwerten eine Näherungskurve errechnet. Vergleicht man diese Modellwerte mit den in der Realität beobachteten Fahrgastwechselzeiten, so stellt man eine gute Übereinstimmung im unteren, aber grössere Unterschiede im oberen Türbelastungsbereich fest:

Tab. 6-11: Vergleich der gemessenen und errechneten Fahrgastwechselzeiten ganzer Kurse für ausgewählte spezifische Türbelastungen.

Fahrzeugtyp		Spezifische Türbelastung $Q_{T,s}$ [p/m']					
		1.0	5.0	10.0	20.0	30.0	50.0
Be 4/6 TPG, solo	gemessen	4.09	13.91	23.55	39.57	53.99	79.51
	gerechnet	2.85	12.64	24.02	45.65	66.46	106.07
Tram SEMITAG	gemessen	2.55	9.88	17.45	30.82	42.99	65.38
	gerechnet	2.64	11.81	22.51	42.92	62.60	100.71
Bus BVB, Serie 911 ff.	gerechnet	3.57	13.26	22.61	38.54	52.34	77.73
	gemessen	3.10	13.36	25.07	47.02	67.95	108.03
Bus BVB, Serie 921 f.	gemessen	3.82	12.98	22.37	38.59	53.37	79.82
	gerechnet	3.23	13.94	26.18	49.17	71.09	113.11
Niederflurbus MAN	gemessen	4.09	13.18	23.10	39.21	53.96	80.20
	gerechnet	3.08	13.30	24.98	46.92	67.83	107.92

Die grossen Differenzen erklären sich weniger mit den Modellvereinfachungen, als vielmehr mit den erwähnten Ungenauigkeiten der Regressionsrechnung der Messwerte mangels genügender Angaben. Dafür spricht der generell steilere Verlauf einer versuchsweise ebenfalls ausgeführten quadratischen Regressionsrechnung. Insbesondere aber verflacht sich auch die Regressionskurve auf die Computerwerte deutlich, wenn die Regressionsrechnung auf die kleinen Belastungen beschränkt bleibt. Beträgt die durchschnittliche Abweichung der Computerwerte von den Messwerten bei $Q_{T,s} = 50 \text{ P/m'}$ im Fall von Tabelle 6-11 rund 41 %, so nähern sich die Resultate auf 23 % an, wenn man nur die Rechenwerte bis $Q_{T,s} = 10 \text{ P/m'}$ berücksichtigt.

Diese Abweichungen verlangen, dass allgemeine Fälle mit dem Computerprogramm berechnet werden, denn andernfalls würden für grössere Fahrgastwechselzahlen deutlich zu günstige Werte resultieren. Sowohl der Ausschöpfungsgrad, als auch der Zuschlagfaktor für die mittlere Fahrgastwechselzeit wurden deshalb für die Computerwerte über den gesamten Belastungsbereich neu ermittelt. Es ergibt sich für den Ausschöpfungsgrad der Leistungsfähigkeit des Türsystems, bezogen auf die Leistungsfähigkeit bei spezifischen Türbelastung von 50 P/m' :

$$(6-30) \quad q_{K,L50} = 72.36 \cdot Q_{T,s}^{0.0827}$$

wobei $q_{K,L50}$ Ausschöpfungsgrad der Leistungsfähigkeit des Türsystems in [%] der Leistungsfähigkeit bei einer spezifischen Türbelastung von 50 P/m'
 $Q_{T,s}$ Spezifische Türbelastung [P/m']

Für den Zuschlagfaktor zur mittleren Fahrgastwechselzeit gilt entsprechend:

$$(6-31) \quad k_{K,L50} = 1.3825 \cdot Q_{T,s}^{-0.0828}$$

wobei $k_{K,L50}$ Zuschlagfaktor zur mittleren Fahrgastwechselzeit bei $Q_{T,s} = 50 \text{ P/m'}$ zur Berücksichtigung der unausgeschöpften Leistungsfähigkeit des Türsystems bei kleineren Türbelastungen [-]

Demnach erreicht ein Türsystem noch bei einer spezifischen Türbelastung von 10 P/m' erst 88 % seiner maximalen Leistungsfähigkeit und bei $Q_{T,s} = 5 \text{ P/m'}$ sogar nur 83 %. Die Fahrgastwechselzeiten sind damit in diesen Fällen um 14 % beziehungsweise 20 % höher, als wenn mit dem unkorrigierten Leistungsgrenzwert gerechnet würde.

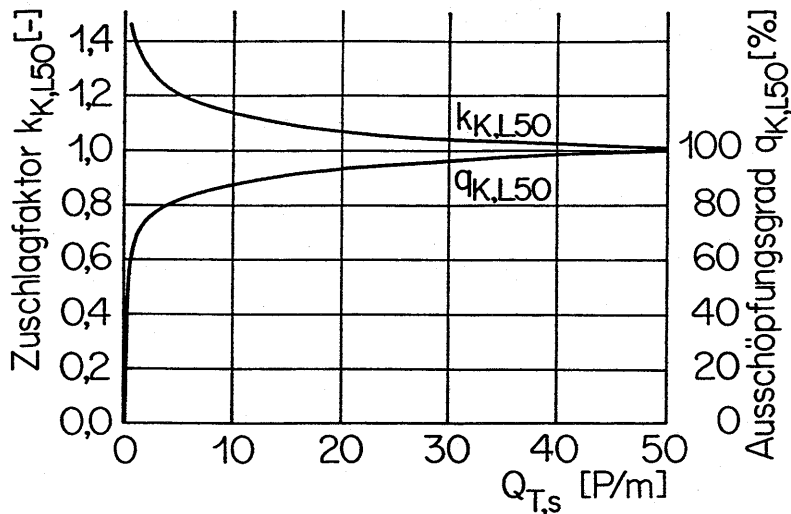


Abb. 6-20: Ausschöpfungsgrad der Leistungsfähigkeit des Türsystems $q_{K,L50}$ und Zuschlagfaktor zur mittleren Fahrgastwechselzeit $k_{K,L50}$, bezogen auf die Werte bei $Q_{T,s} = 50$ P/m'.

6.32.14 Standardisierte Kurve des Ausschöpfungsgrades

Die Beziehung zwischen spezifischer Belastung und Ausschöpfungsgrad beinhaltet neben anderen Einflüssen auch die Abhängigkeit zwischen der spezifischen Türbelastung und der spezifischen Leistungsfähigkeit an jeder einzelnen Türe. Sie gilt damit nur für Fahrzeuge mit kleinen Türabständen und birgt ausserdem eine Fehlerquelle in sich, indem in der Berechnung der Fahrgastwechselzeit für eine bestimmte Fahrgastwechselzahl einerseits die Türleistungsfähigkeiten bei $Q_{T,s} = 50$ P/m', andererseits aber der Ausschöpfungsgrad für $Q_{T,s}$ bei F_i eingesetzt werden müssen.

Mit einer standardisierten Kurve des Wirkungsgrades lässt sich dieser Einfluss der Einzelleistungsfähigkeiten umgehen. Dazu wird die effektive Leistungsfähigkeit des Türsystems auf jene bezogen, welche erreicht würde, wenn kein Einfluss der Ganzzahligkeit des Fahrgastwechsels spürbar wäre. Der Ausschöpfungsgrad des Türsystems bei einer bestimmten spezifischen Türbelastung, bezogen auf die bei gleicher Türbelastung maximal erreichbare Türleistungsfähigkeit, beträgt:

$$(6-32) \quad q_{K,L} = 0.8275 \cdot Q_{T,s}^{0.0484}$$

wobei $q_{K,L}$ Standardisierter Ausschöpfungsgrad der Leistungsfähigkeit des Türsystems, bezogen auf die Leistungsfähigkeit bei einer spezifischen Türbelastung von $Q_{T,s}$ [-]
 $Q_{T,s}$ Spezifische Türbelastung [P/m']

Die als Summe der Einzelleistungsfähigkeiten erhaltene Türleistungsfähigkeit bei bestimmter spezifischer Türbelastung kann nun zur Berücksichtigung der Ganzzahligkeit des Fahrgastwechsels mit dem zugehörigen Faktor $q_{K,L}$ multipliziert werden.

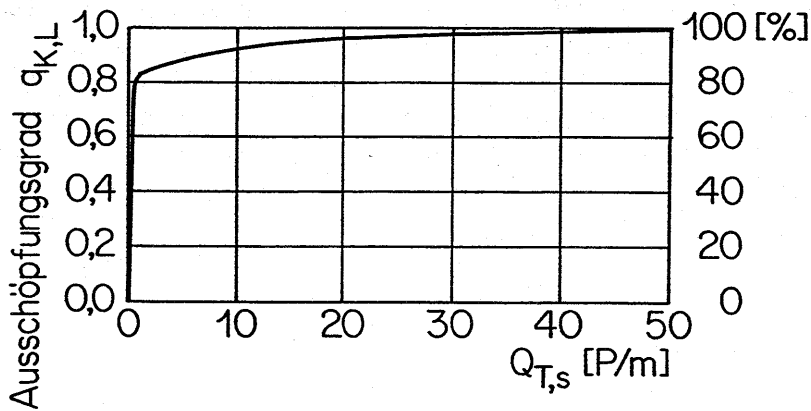


Abb. 6-21: Standardisierter Ausschöpfungsgrad der Türleistungsfähigkeit $q_{K,L}$, bezogen auf die Leistungsfähigkeit bei entsprechender Türbelastung $Q_{T,s}$.

6.33 Abhängigkeit von den Einflussfaktoren

6.33.1 Einfluss der Türzahl und der Streuung an der Einzeltüre

6.33.11 Zusammenhang zwischen Fahrgastwechselzeit, Türzahl und Streuung

Der Fahrgastwechsel eines Kurses ist abgeschlossen, wenn er an jeder einzelnen Türe beendet ist. Die wahrscheinlichkeitstheoretische Formulierung lautet, dass der Fahrgastwechsel sowohl an der Türe 1, als auch an den Türen 2, i und n abgeschlossen sein muss. Die Fahrgastwechselzeit an jeder einzelnen Türe unterliegt ihrerseits selbst für gleich grosse Fahrgastwechselzahlen den dargestellten Streuungen. Dies bewirkt bei gleicher Fahrgastwechselquote und damit identischer spezifischer Türbelastung ein ungünstigeres Verhalten langer als kurzer Züge: Je mehr Türen vorhanden sind, desto ungünstiger verhält sich das System und desto tiefer sinkt der Wirkungsgrad. Je grösser zudem die Streuung an den Einzeltüren des Kurses ist, desto ungünstiger ist aufgrund derselben statistischen Gesetzmässigkeiten bei gegebener Türzahl der Erwartungswert des Kurses. Die beiden Einflüsse müssen daher gemeinsam behandelt werden. Empirisch wurde dies mehrfach festgestellt, ohne dass allerdings eine allgemeine Beschreibung erfolgte.

6.33.12 Abhängigkeit von Türzahl und Streuung

Zur Quantifizierung des Zusammenhanges wurden die Fahrgastwechselzeiten von Kurses mit 1 bis 40 Türen mittels des Programmes ACoST.NeXT errechnet. Als Standardabweichungen wurden jene von Türen mit Breiten von 0.80 m, 1.00 m, 1.20 m, 1.40 m, 1.60 m und 1.90 m gemäss Formel (6-11) eingesetzt. Die Fahrgastwechselzeiten wurden einer Regressionsrechnung mit der Funktion $a \cdot x^{-b}$ unterzogen. Der Einfluss der Streuung auf die Fahrgastwechselzeit des Kurses erscheint hier im Exponenten. Aus den Exponenten der Regressionsgleichungen für die ausgewählten Türen wurde eine quadratische Funktion der Abhängigkeit zwischen der Standardabweichung und dem Exponenten des Ausschöpfungsgrades abgeleitet werden. Die Beziehung für den Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Türzahl und der Streuung der spezifischen Leistungsfähigkeit der einzelnen Türen lautet demnach:

$$(6-33) \quad q_{K,n\sigma} = \frac{(-0.4163 + 0.0398 \cdot \sigma_{L,s} - 0.0013 \cdot \sigma_{L,s}^2)}{n_{T,K}}$$

wobei $q_{K,n\sigma}$ Wirkungsgrad des Türsystems in Funktion der Türzahl und der Standardabweichung der spezifischen Leistungsfähigkeit der einzelnen Türen [-]
 $n_{T,K}$ Türzahl des Kurses [-]
 $\sigma_{L,s}$ Standardabweichung der spezifischen Leistungsfähigkeit der einzelnen Türen in [%] des Erwartungswertes

6.33.13 Abhängigkeit von Türzahl und Türbreite

Die Streuung der Fahrgastwechselzeit an den einzelnen Türen ist nach (6-11) eine Funktion der Türbreite. Damit kann der Wirkungsgrad des Türsystems direkt mit der Türzahl und der Türbreite, also den primären Kenngrößen des Türsystems, angegeben werden. Im Exponenten findet sich die quadratische Form von (6-11) und (6-33) wieder:

$$(6-34) \quad q_{K,nb} = \frac{(0.2407 - 0.5464 \cdot l_{T,b} + 0.0722 \cdot l_{T,b}^2)}{n_{T,K}}$$

wobei $q_{K,nb}$ Wirkungsgrad des Türsystems in Funktion der Türzahl und der Breite der einzelnen Türen [-]
 $l_{T,b}$ Breite der einzelnen Türen des Fahrzeuges [m]

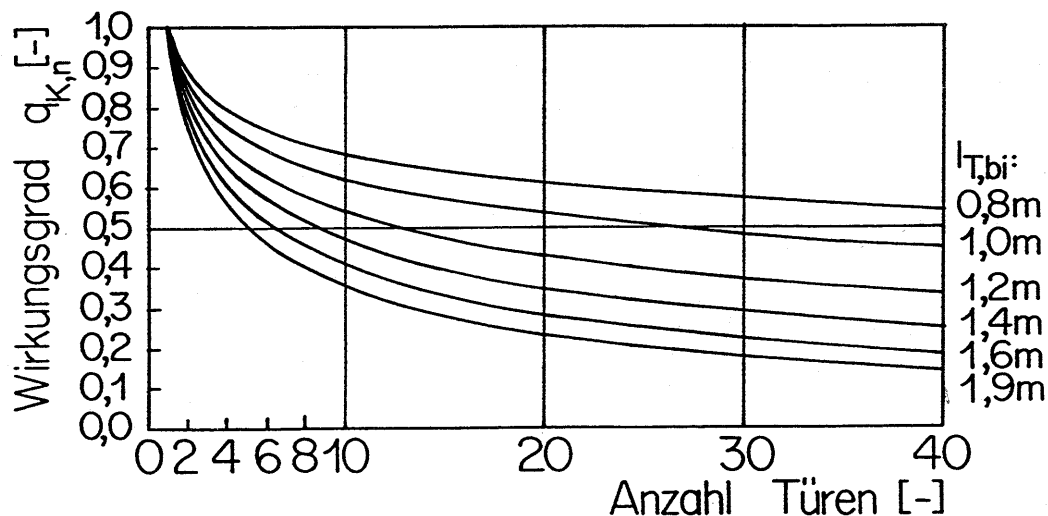


Abb. 6-22: Wirkungsgrad des Türsystems eines Kurses in Funktion der Türzahl und der Breite der einzelnen Türen.

Bei der Anwendung von (6-34) ist zu beachten, dass dieser Wirkungsgrad kurs- und nicht fahrzeugbezogen ist. Selbst wenn verschieden lange Züge aus denselben Fahrzeugen betrachtet werden, so muss der Wirkungsgrad dennoch für jede Zuglänge neu errechnet werden. Für einen einzelnen Fahrzeugtyp existieren demnach unterschiedliche Wirkungsgrade, je nachdem ob das

Fahrzeug allein oder im Zugverband mit anderen Fahrzeugen verkehrt. Ferner gelten die Formeln und die Graphik streng betrachtet nur für Kurse mit Türen identischer Einstiegsgestaltung. Diese Bedingung ist meist näherungsweise erfüllt. Störend wirken sich vorwiegend sehr unterschiedlich breite Türen aus, da der Wirkungsgrad empfindlich auf die Standardabweichung reagiert.

6.33.2 Einfluss der Ungleichförmigkeit der Türbelastung

6.33.21 Definition der ungleichförmigen Türauslastung

Die Belastung des Türsystems ist ungleichförmig, wenn sich der Fahrgastwechselstrom nicht proportional zur Türleistungsfähigkeit auf die einzelnen Durchgänge verteilt. Verursacht wird eine ungleichförmige Belastung des Türsystems durch folgende Einflussfaktoren:

- Türverteilung am Fahrzeug
- Auswahlkriterien für die Benützung der Türen
- Fahrgastverteilung auf dem Perron
- Fahrgastverteilung im Fahrzeug

Das Mass zur Bestimmung der Ungleichförmigkeit ist die relative Türbelastung $Q_{T,rel}$ als Fahrgastwechselzahl, bezogen auf die zur Verfügung stehende Türleistungsfähigkeit. Bei gleichmässiger Türbelastung des Kurses gilt:

$$(6-35) \quad Q_{T,rel} = \frac{F}{L} = \frac{F_i}{L_i} = Q_{T,rel_i}$$

wobei	$Q_{T,rel}$	Relative Türbelastung des Kurses [s]
	F	Fahrgastwechselzahl des Kurses [P]
	L	Leistungsfähigkeit des Türsystems des Kurses [P/s]
	F_i	Fahrgastwechselzahl an der Türe i [P]
	L_i	Leistungsfähigkeit der Türe i [P/s]
	Q_{T,rel_i}	Relative Türbelastung der Türe i [s]

Im Sonderfall von Kursen mit identischen Türen ist eine Ungleichförmigkeit leicht zu erkennen, indem dann auf die einzelnen Türen nicht die gleiche Fahrgastwechselzahl entfällt. Weist ein Kurs unterschiedliche Einstiegstypen auf, so ist die Ungleichförmigkeit schwerer festzustellen. Der Grad der Ungleichförmigkeit lässt sich mittels des Ungleichförmigkeitsmasses $q_{U,T}$ quantifizieren:

$$(6-36) \quad q_{U,T} = \frac{Q_{T,relmax}}{Q_{T,rel}}$$

wobei	$q_{U,T}$	Ungleichförmigkeitsmass der Türbelastung [-]
	$Q_{T,relmax}$	Maximal an einem Fahrzeug auftretende relative Türbelastung [s]

Bei ideal gleichförmiger Belastung ist $q_{U,T} = 1$ und die Fahrgastwechselzeit des Kurses ist minimal. Bei ungleichförmiger relativer Türbelastung sind die Erwartungswerte der einzelnen Türen nicht mehr identisch und die Fahrgastwechselzeit des Kurses erhöht sich.

6.33.22 Türverteilung am Fahrzeug

Liegen seitens der Fahrgäste keine besonderen Kriterien für die Wahl der Türen vor, so bildet die Mitte der beiden Türachsen die Grenze des Einzugsgebietes zweier Türen. Die Qualität der Türverteilung lässt sich dann auf einfache Weise bestimmen, indem das Verhältnis zwischen den Tür-einzugsgebieten und den jeweiligen Türleistungsfähigkeiten betrachtet wird.

Von Interesse ist das Ungleichförmigkeitsmass der Fahrzeuge vorwiegend bei den kurzen Einheiten des Nahverkehrs wie Autobussen und Strassenbahnen. Unter bestimmten Umständen können aber auch bei Vollbahnen grössere Ungleichförmigkeiten auftreten:

- *Vollbahnen:* Die langen Kurseinheiten von Vollbahnen werden in der Regel aus Fahrzeugen ähnlicher Bauart mit symmetrischem Kastengrundriss gebildet. Bei diesen Kursen ist die Türbelastung praktisch gleichförmig. Abweichungen von der Gleichförmigkeit treten auf, wenn in den Zug Fahrzeuge eingereiht werden, welche den Reisenden nicht zugänglich sind, zum Beispiel Lokomotiven oder Gepäckwagen, oder wenn einzelne Fahrzeuge über keine Aussentüren verfügen, zum Beispiel bestimmte Speisewagentypen.
- *Stadtbahnen und Strassenbahnen:* Ungleichförmigkeiten bei Stadtbahnen und Strassenbahnen werden vorwiegend durch das Fahrzeug- und Abfertigungskonzept bestimmt. Bei klassischen Hochflurfahrzeugen ohne Fahrausweisverkauf durch den Fahrer können die Türen gleichmässig angeordnet werden. Bei Niederflurfahrzeugen dagegen wird die Türanordnung und teilweise auch die Türzahl stark vom Fahrwerks- und Antriebskonzept sowie der Gelenkanordnung beeinflusst.
- *Autobusse:* Bei den Autobussen sind grössere Ungleichförmigkeitsmasse durch die Fahrwerke, die traditionelle und für den Fahrausweisverkauf erforderliche Einstiegs-türe beim Fahrer sowie in jüngerer Zeit durch die Randbedingungen der Niederflur-technik unvermeidlich.

Die Vielzahl der Freiheitsgrade in der Fahrzeuggestaltung verunmöglicht es, die Abhängigkeit des Ungleichförmigkeitsmasses von den Fahrzeugparametern geschlossen darzustellen.

6.33.23 Auswahlkriterien für die Benützung der Türen

Die Kriterien für die Wahl der Einstiegstüre und die Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron hängen miteinander zusammen, indem sich Fahrgäste eine günstige Stelle des Perrons auswählen, wenn sie eine bestimmte Türe des Kurses zu benützen wünschen. Bestimmend für ihr Verhalten ist die Systemkenntnis bezüglich des eingesetzten Rollmaterials und der Situation an der Zielhaltestelle. Je besser diese Systemkenntnis ist, desto klarer sind ihre Vorstellungen über die optimale Fahrzeugtüre und desto weniger lassen sie sich von den Verhältnissen an der Abgangshaltestelle leiten. Verfügen sie dagegen über keine Systemkenntnis, so ist ihr Verhalten zufällig orientiert und wird durch die Gestaltung der Starthaltestelle weitgehend beeinflusst. Stark ausgeprägt ist die Anpassung des Verhaltens an das System, wenn dieses grosse Dimensionen aufweist und wenn die Kurse inhomogen zusammengesetzt sind:

- *Systeme mit grossen Dimensionen:* Bei Systemen mit grossen Dimensionen wie Hauptbahnen, S-Bahnen oder U-Bahnen, deren Haltepunkte nur wenige definierte Zugänge aufweisen, nimmt das Zurücklegen der Fusswege im Haltestellenbereich

eine beträchtliche Zeit in Anspruch. Da der Fahrgast seine Reisezeit zu minimieren bestrebt ist, versucht er, auch den Zeitaufwand für diese Wege klein zu halten. Einen wesentlichen Zeitgewinn erzielt er durch das Benützen einer Einstiegstüre, welche dem Abgang der Zielhaltestelle nahe liegt. Das Ausmass dieses Zeitersparnis kann beträchtlich sein: Bei einem S-Bahn-Langzug der BR 420 der DB beispielsweise mit seiner Gesamtlänge von 200 m benötigt ein Fahrgast für den Fussweg von der Kursmitte bis zum Abgang am Perronende mehr als eine Minute. Die Beobachtungen zeigen deshalb, dass sich gegen zwei Drittel der Fahrgäste von S-Bahn-Systemen in dieser Weise verhalten, während nur 13 % eine Türe in der Nähe des Zuganges an der Abfahrtshaltestelle benützen.

- *Systeme mit inhomogen zusammengesetzten Kursen:* Inhomogene Kurszusammensetzungen finden sich im Fernverkehr und im Vorortsverkehr einzelner Städte mit der Unterscheidung von 1. und 2. Klasse sowie von Raucher- und Nichtraucherabteilen. Da das Durchqueren eines Fahrzeuges während der Fahrt oft unangenehm und bei einigen Fahrzeugtypen sogar unmöglich ist, besteigen die Fahrgäste in der Regel direkt das gewünschte Abteil.

Naturgemäss lassen sich diese Einflüsse nicht geschlossen darstellen, sondern es muss im Einzelfall geprüft werden, ob durch sie eine massgebliche Überlastung bestimmter Türen entstehen kann.

6.33.24 Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron

Lässt man die besonderen Auswahlkriterien beiseite, so sind es Zufälligkeiten und besondere Eigenschaften der Haltestelleneinrichtung, welche die Verteilung der Fahrgäste auf die Türen steuern. Im einfachsten Fall einer Haltestelle ohne definierte Zugänge und ohne besondere Einrichtungsgegenstände verteilen sich die Fahrgäste rein zufällig und damit gleichmässig auf der Perronfläche. Diese Situation trifft mit gewissen Einschränkungen im strassengebundenen Nahverkehr zu. Systematisch unausgewogen gruppieren sich die Fahrgäste auf der Perronfläche und auf die Türen, wenn die Zugangsanordnung des Perrons oder die Perroneinrichtung zu Fahrgastkonzentrationen führen. Es hat sich gezeigt, dass sich die Fahrgäste namentlich um die Zugänge zur Haltestellenfläche sammeln.

Die systematische Erforschung des Fahrgastverhaltens auf der Haltestelle liegt ausserhalb des Rahmens dieser Arbeit. Die auftretenden Fahrgastverteilungen lassen sich allerdings mit genügender Genauigkeit durch Standardverteilungen wie die Gleichverteilung sowie Dreiecks-, Sinus- und Exponentialverteilungen annähern, wobei schwierige Verteilungen durch die Überlagerung der Standardverteilungen abgebildet werden können. Aus der resultierenden Fahrgastlängsdichte und dem eingesetzten Kurstyp lässt sich die Belastung der einzelnen Türen mittels Integration über das Einzugsgebiet ermitteln. Ein Ungleichförmigkeitsmass der Fahrgastlängsverteilung auf der Haltestelle ohne Berücksichtigung des Kurses ist aufgrund der Definition des entscheidenden Ungleichförmigkeitsmasses $q_{U,T}$ ohne praktischen Wert, da sich dieses auf die resultierende Türbelastung bezieht.

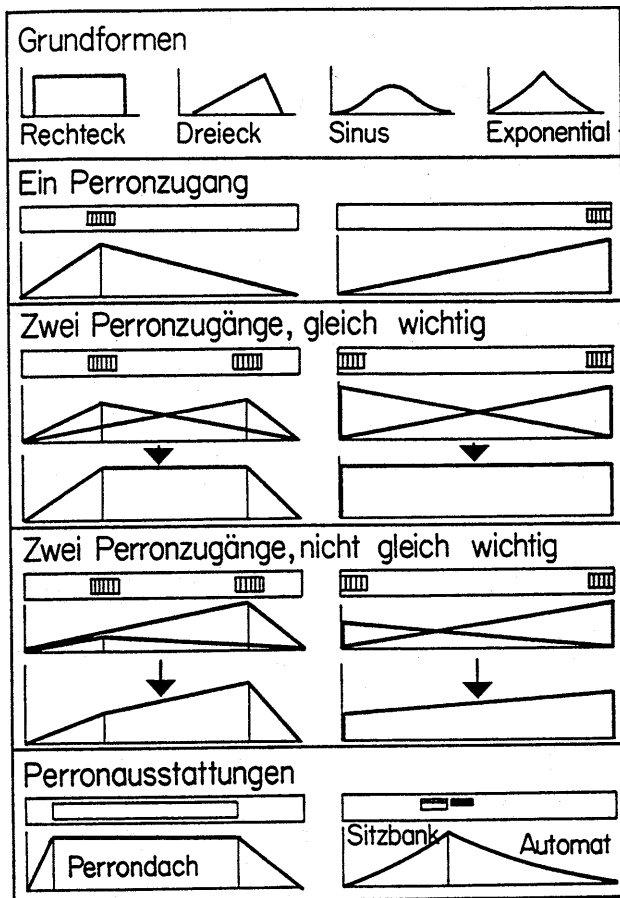


Abb. 6-23: Typische Standardfälle der Fahrgastlängsdichte und Überlagerungen.

Durch die Zählung der Fahrgäste an allen Türen während der gesamten Fahrt war es möglich, die durchschnittliche Benützungshäufigkeit der Türen im strassengebundenen Nahverkehr anhand der kurzen Kurse von Genf, Grenoble und Basel zu ermitteln:

Tab. 6-12: Gegenüberstellung von Einsteigeranteilen und Einzugsgebieten bei den Fahrzeugen von Genf, Grenoble und Basel. Annahme: Warteraum ist identisch mit Kurslänge.

Fahrzeugtyp	Kenngrosse	Türe			
		1	2	3	4
Be 4/6 TPG, Einzelfahrer 1)	Einzugsgebiet Einsteigeranteil	30 % 31 %	20 % 23 %	20 % 18 %	30 % 28 %
Be 4/6 TPG, Doppeltraktion 2)	Einzugsgebiet Einsteigeranteil	30 % 32 %	20 % 24 %	20 % 21 %	30 % 23 %
Tram SEMITAG	Einzugsgebiet Einsteigeranteil	31 % 30 %	19 % 22 %	19 % 21 %	31 % 27 %
Bus BVB, Serie 911 ff.	Einzugsgebiet Einsteigeranteil	20 % 9 %	30 % 38 %	29 % 26 %	21 % 27 %
Bus BVB, Serie 921 f.	Einzugsgebiet Einsteigeranteil	22 % 5 %	35 % 45 %	43 % 50 %	- -
Niederflurbus MAN	Einzugsgebiet Einsteigeranteil	18 % 4 %	34 % 43 %	48 % 53 %	- -

1) Messungen der Genfer Verkehrsbetriebe beim Einsatz des Prototyps im Jahre 1984

2) Messungen des IVT am Wagen 1 einer Doppeltraktion

Die beiden Schienenfahrzeuge zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen dem Einzugsgebiet und dem Einsteigeranteil. Die Annahme von gleichverteilten Fahrgästen ist damit im Nahverkehr grundsätzlich zulässig. Die stärkere Benützung der zwei vorderen Türen des Niederflurtrams SEMITAG erklärt sich durch die Lage der Haltestellen in Grenoble, deren wichtige Zugänge sich überwiegend in Fahrtrichtung vorne befinden. Grössere Abweichungen treten hingegen an den Autobussen auf, indem die vorderste Türe unterproportional, die hinterste dagegen überproportional stark beansprucht wird. Dies ist auf folgende Faktoren zurückzuführen:

- Die meisten Haltestellenbereiche der beobachteten Buslinie 33 sind mit dem Trottoir identisch. Der Warteraum ist somit unbegrenzt und damit wird der effektive Warteraum länger als der Kurs.
- Die Busfahrer ziehen ihr Fahrzeug tendenziell bis zum vordersten wartenden Fahrgast vor, sodass sich kaum je Fahrgäste vor, sehr wohl aber hinter dem haltenden Kurs befinden.
- Die Fahrgäste scheinen die Türe 1 als unangenehm zu empfinden. Insbesondere fürchten sie, den Chauffeur durch deren Benützung zu belästigen. Bis kurz vor den Messfahrten war zudem die Benützung der Türe 1 aus Witterungsgründen untersagt.

Dies alles erfordert eine Modellerweiterung. Da die Zuschreibung von Einzugsgebieten ein tauglicher Ansatz ist, soll er nicht verlassen, sondern lediglich mit einer Korrektur für die Türe am Kursende ergänzt werden. Diese Korrektur kann durch Einführung einer fiktiven Warteraumlänge erfolgen:

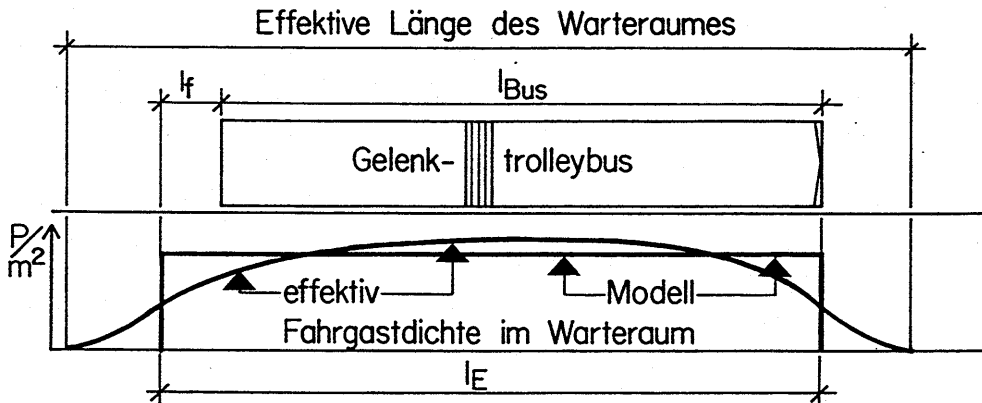


Abb. 6-24: Situation an einer Autobushaltestelle mit Warteraum, dessen Länge diejenige des Busses übertrifft.

Die effektive Warteraumlänge ergibt sich unter der Annahme gleicher Zahl wartender, aber gleichverteilter Fahrgäste. Damit und mit der Sollbenützung der Türen kann die fiktive Länge berechnet werden. Diese fiktive Länge des effektiven Einzugsgebietes beträgt beginnend bei der Fahrzeugspitze etwa 19.5 m und übertrifft die Fahrzeuglänge um rund 1.8 m. Die aufgrund dieses korrigierten Einzugsgebietes auf die Türe 1 entfallende Einsteigerzahl ist schliesslich zu rund zwei Dritteln auf die Türe 2 umzulagern.

Generell zeigt das Fallbeispiel, dass bei Haltestellen, welche länger als die Kurse sind, mit einer systematischen Überlastung der Türen am Kursende zu rechnen ist. Namentlich trifft dies bei Haltestellen zu, deren Warteflächen mit dem Trottoir identisch sind sowie bei kurzen Zügen von Eisenbahnen, Stadtbahnen und U-Bahnen mit Haltestellen, welche auf die maximale Kurslänge ausgerichtet werden müssen. Diesem Problem muss mit leistungsfähigen Türen am Kursende und mit markierten Haltepunkten für unterschiedliche Zuglängen begegnet werden.

6.33.25 Verteilung der Fahrgäste im Fahrzeug

Analog zum Perron ist auch im Fahrzeug davon auszugehen, dass die Fahrgäste die ihnen nächstliegende Türe zum Aussteigen wählen. Ist das Fahrzeug Fassungsvermögen schlecht auf die Türleistungsfähigkeit abgestimmt oder sind nicht alle Teile des Kurses frei zugänglich, zum Beispiel bei einer Unterscheidung von 1. und 2. Klasse oder bei Benützungseinschränkungen, so kommt zur Ungleichförmigkeit der Türbelastung. Eine unausgewogene Verteilung des Fassungsvermögens auf die Kurslänge wird durch folgende Umstände bewirkt:

- **Unterschiedlicher Flächenbedarf von Sitz- und Stehplätzen:** Sitzplätze benötigen eine grössere Grundfläche als Stehplätze. Während ein Stehplatzfahrgast mit etwa 0.17 m^2 Fläche auskommt, benötigt ein Sitzplatz bei Autobussen und Strassenbahnen etwa 0.35 m^2 , in U-Bahnen und Stadtbahnen etwa 0.45 m^2 und im Fernverkehr

etwa 0.55 m^2 . Entsprechend können auf einem Quadratmeter Grundfläche statt sechs Personen nur deren zwei bis drei befördert werden. Sind die Sitz- und Stehplatzbereiche den Türen ungleichmässig zugeschrieben, so führt dies zu einer un- ausgewogenen Türbelastung.

Unterschiedliche Attraktivität der Stehplatzflächen: Während die Sitzplätze, abgesehen vom Kurzstreckenverkehr, von den Fahrgästen sehr rasch angenommen werden und keine grosse Differenz in deren Attraktivität festzustellen ist, unterscheidet sich die Attraktivität der diversen Stehplatzbereiche massgeblich. Bis zu einer bestimmten Fahrzeugauslastung verbleiben die stehenden Fahrgäste in Türnähe und belegen diese Flächen. Die Fahrzeuggänge werden dagegen so lange als möglich gemieden, da es bei starker Fahrzeugauslastung unangenehm oder unmöglich ist, von dort aus die Türe zu erreichen. Die Fahrgäste verteilen sich damit nicht gleichmässig im Stehplatzraum und das Verhältnis der Fahrgastdichten im Fahrzeug verändert sich im Laufe einer Belastungsgeschichte.

Die Messungen gestatteten es, die Belegung der Türräume einerseits und diejenige der übrigen Gangflächen andererseits in Abhängigkeit von der Fahrzeugauslastung zu ermitteln, wobei die Gültigkeit der Ergebnisse mangels entsprechender Messungen auf Auslastungen von zwischen 0 % und 70 %, gerechnet mit einer geometrischen Grenzdichte von 6 P/m^2 , beschränkt bleibt. Demnach steigt der Stehplatzbelegungsgrad der Türräume mit der Fahrzeugauslastung quadratisch an:

$$(6-37) \quad D_{F,T} = 0.0012 \cdot q_K^2 - 0.0093 \cdot q_K + 0.093$$

wobei $D_{F,T}$ Fahrgastdichte im Türbereich [P/m^2]
 q_K Auslastungsgrad des Kurses, bezogen auf eine maximale Stehplatzdichte von 6 P/m^2 [%]

Die Gangbereiche werden dagegen unterhalb einer Fahrzeugauslastung von 35 bis 40 % nicht belegt und darüber steigt die Fahrgastdichte nur langsam an:

$$(6-38) \quad D_{F,G} = -0.000577 \cdot q_K^2 + 0.1235 \cdot q_K - 3.8855$$

wobei $D_{F,G}$ Fahrgastdichte in den Gangbereichen, ohne Sitzplätze, gültig für Fahrzeugauslastungen von über 38 % [P/m^2]

Die Fahrgastdichte beträgt bei einer Kursauslastung von beispielsweise 50 % in den Gangbereichen erst etwa 0.8 P/m^2 , während sie in den Türräumen bereits auf 2.6 P/m^2 angestiegen ist. Bei 70 % Kursauslastung lauten die beiden Werte sogar auf 1.9 P/m^2 beziehungsweise 5.3 P/m^2 . Bei den beobachteten dreitürigen Gelenkbussen wurde die Gangfläche zwischen der Türe 3 und dem Fahrzeugende überhaupt nicht benützt und beim NG 272 waren im Nachläufer öfters Sitzplätze frei, obschon gleichzeitig an anderer Stelle des Fahrzeuges viele Fahrgäste nur noch Stehplätze fanden.

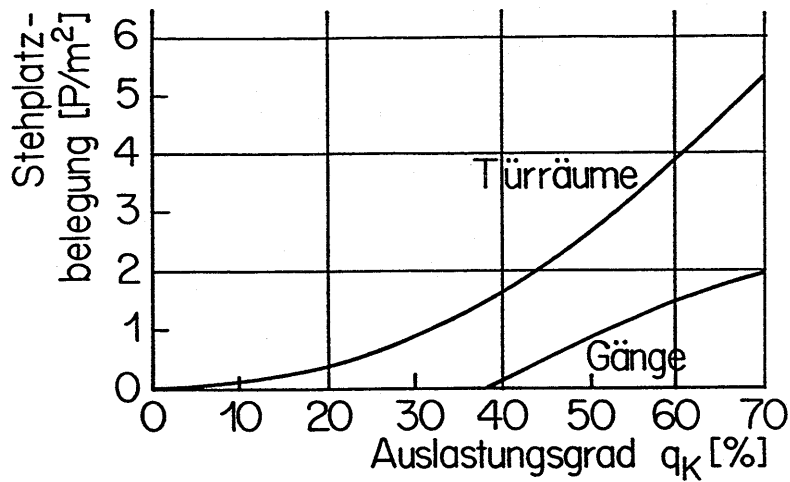


Abb. 6-25: Fahrgastdichte in den Türbereichen und auf den Gangflächen in Abhängigkeit von der Auslastung des Kurses, gültig bis zu einer Fahrzeugauslastung von 70 %.

Dass die Verschiebungen der Anteile der Türbenützung gegenüber dem Einsteigen klein bleiben und deshalb das Einzugsgebiet pro Türe auch für das Aussteigen einen guten Indikator darstellt, zeigt die Gegenüberstellung von Aussteigeranteilen und Einzugsgebieten:

Tab. 6-13: Gegenüberstellung von Aussteigeranteilen und Einzugsgebieten bei den Fahrzeugen von Genf, Grenoble und Basel. Annahme: Fassungsvermögen pro Kurslänge ist konstant.

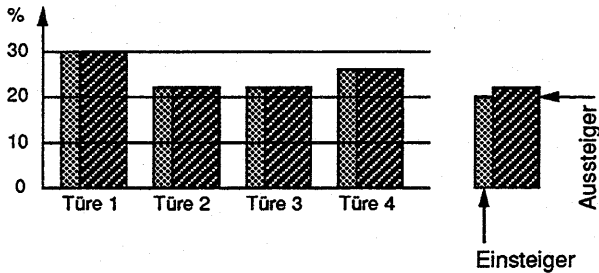
Fahrzeugtyp	Kenngrösse	Türe			
		1	2	3	4
Be 4/6 TPG, Einzelfahrer 1)	Einzugsgebiet	30 %	20 %	20 %	30 %
	Aussteigeranteil	27 %	25 %	22 %	26 %
Be 4/6 TPG, Doppeltraktion 2)	Einzugsgebiet	30 %	20 %	20 %	30 %
	Aussteigeranteil	31 %	26 %	21 %	22 %
Tram SEMITAG	Einzugsgebiet	31 %	19 %	19 %	31 %
	Aussteigeranteil	30 %	23 %	21 %	26 %
Bus BVB, Serie 911 ff.	Einzugsgebiet	20 %	30 %	29 %	21 %
	Aussteigeranteil	9 %	38 %	28 %	25 %
Bus BVB, Serie 921 f.	Einzugsgebiet	22 %	35 %	43 %	-
	Aussteigeranteil	6 %	47 %	47 %	-
Niederflurbus MAN	Einzugsgebiet	18 %	34 %	48 %	-
	Aussteigeranteil	4 %	44 %	52 %	-

1) Messungen der Genfer Verkehrsbetriebe beim Einsatz des Prototyps im Jahre 1984

2) Messungen des IVT am Wagen 1 einer Doppeltraktion

Zur Ähnlichkeit der Türbenützunganteile trägt zunächst bei, dass die Fahrgäste in der Nähe ihrer Einsteigtüre verbleiben, womit die Verteilung der Aussteiger auf die Türen von der Verteilung der Einsteiger abhängt. Offensichtlich erfolgt während der Fahrt aber auch kein starker Belastungsausgleich, denn sonst müsste die Verteilung der aussteigenden Fahrgäste auf die Türen gleichmässiger sein. Dies spricht gegen ein Fahrzeugfluss-System:

Niederflurtram Grenoble/SEMITAG



Niederflurtram Genf/TPG

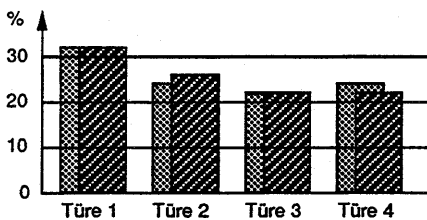


Abb. 6-26: Durchschnittliche Türbenützung über alle Haltestellen und alle Fahrten. Oben: Grenoble (Einzelfahrzeug); unten: Genf (vorderer Wagen der Doppeltraktion).

Als zusätzliche Information fiel bei den Messfahrten mit dem Doppelstockwagen der NS die Verteilung der Fahrgäste auf die beiden Geschosse an. Sie unterschied sich kaum voneinander und die leicht stärkere Auslastung des Obergeschosses kann auf den Neuigkeitswert des Fahrzeugtyps in München zurückgeführt werden. Bei dessen längerwährendem Einsatz ist eine völlige Angleichung zu erwarten.

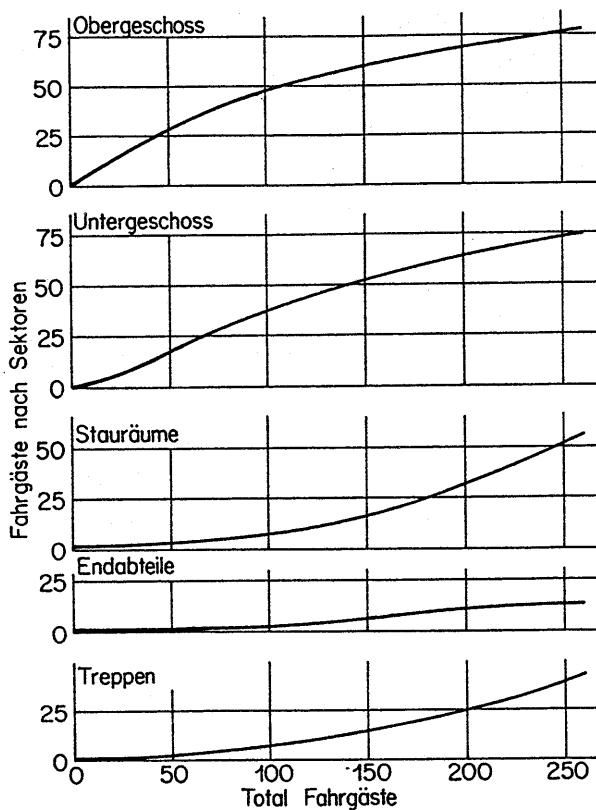


Abb. 6-27: Auslastung der Fahrzeugbereiche in Funktion der Gesamtfahrgastzahl beim Doppelstockwagen der NS im Einsatz auf der S-Bahn München.

Die Beziehung (6-37) lässt sich schliesslich mit (6-12) verbinden und damit die Verlangsamung des Fahrgastwechsels bei höheren Kursauslastungen direkt mit der Kursauslastung ausdrücken. Durch Einsetzen und Zusammenfassen erhält man für den Korrekturfaktor der Fahrgastwechselzeit. Bemerkenswert daran ist, dass die Kursauslastung q_K in der vierten Potenz erscheint:

$$(6-38) \quad k_D = 0.991 + 8.52 \cdot 10^{-4} \cdot q_K - 1.06 \cdot 10^{-4} \cdot q_K^2 - 8.4 \cdot 10^{-7} \cdot q_K^3 + 5.2 \cdot 10^{-7} \cdot q_K^4$$

6.33.26 Fahrgastwechselzeiten bei typischen Ungleichförmigkeiten

Die vielfältigen Ursachen einer ungleichmässigen Türausnutzung zeigen, dass allgemeingültige Regeln nicht aufstellbar sind. Erschwerend fällt ins Gewicht, dass kein Einfluss isoliert betrachtet werden darf, sondern dass die Einflussgrössen miteinander verknüpft sind. Hält beispielsweise ein Fahrzeug mit einer unausgewogenen Türverteilung an einer Station, wo die Fahrgäste zwar ebenfalls unausgewogen verteilt sind, dies aber in einer Weise, dass die Fahrgastkonzentration am Ort höchster Türleistungsfähigkeit zu liegen kommt, so kann aus diesen beiden unausgewogenen Verteilungen eine gleichmässige Türauslastung resultieren.

Für die Berechnung der Fahrgastwechselzeit ist ohnehin weniger die Ursache der Ungleichförmigkeit wesentlich, als vielmehr deren Ausmass. Es genügt deshalb, wenn deren Verlängerung infolge unterschiedlicher Unausgewogenheiten allgemein dargestellt wird. Zu diesem Zweck wurde

mittels des Computerprogrammes ACoST.NeXT eine Anzahl Fälle durchgerechnet. Als sinnvolles Belastungsszenario des Kurses wurde eine trapezförmige Fahrgastdichte auf dem Perron angesetzt, deren Extreme durch die Rechtecks- und die Dreiecksverteilung gegeben sind. Die Türen des Fahrzeuges wurden als gleichverteilt mit identischem Einzugsgebiet angenommen, wobei Türzahlen von fünf, zehn und fünfzehn gewählt wurden. Die folgende Beziehung für den Zuschlagfaktor infolge Ungleichmässigkeit kann somit allgemein verwendet werden:

$$(6-40) \quad k_{U,T} = 1.0438 - 0.3259 \cdot q_{U,T} + 0.2705 \cdot q_{U,T}^2$$

wobei $k_{U,T}$ Zuschlagfaktor bei ungleichförmiger Belastung des Türsystems [-]

Die Beziehung besagt beispielsweise, dass bei einer Dreiecksverteilung der Fahrgäste auf die Türen mit einem Ungleichförmigkeitsmass von etwa 1.9 eine um rund 40 % verlängerte Fahrgastwechselzeit erwartet werden muss als bei idealer Gleichverteilung. Sie zeigt weiter, dass die Zahl der Türen keinen Einfluss auf die Verlängerung der Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse infolge ungleichförmiger Belastung hat.

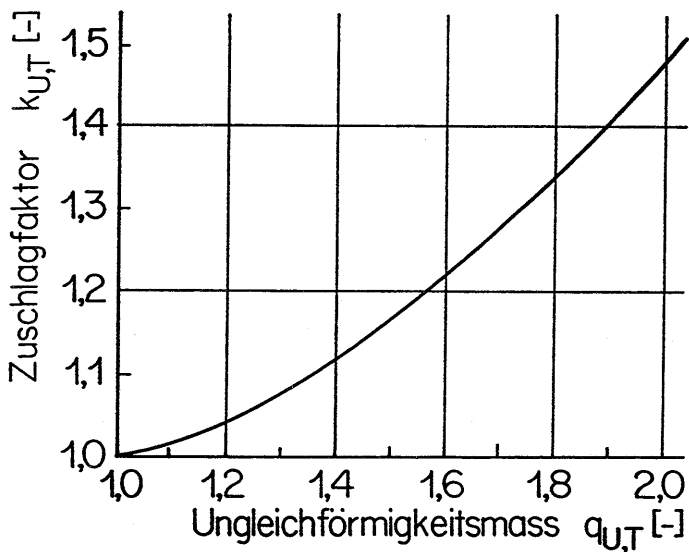


Abb. 6-28: Zuschlagfaktor zur Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses in Funktion der Ungleichförmigkeit der Türbelastung.

6.34 Streuungen

6.34.1 Verteilungsfunktionen

Analog zur Streuung der Fahrgastwechselzeiten an den einzelnen Türen ist auch deren Überlagerung, die Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse, ein Zufallsprozess. Als Verteilungsfunktionen der Fahrgastwechselzeit werden sowohl die Standardverteilung, als auch die Erlang-k-Verteilung angegeben.

Die eigenen Messungen, ausgeführt an den beiden Niederflurstrassenbahnen von Genf und Grenoble sowie an den drei Gelenkbustypen, zeigen eindeutig eine schiefe Dichte der mittleren Fahrgastwechselzeiten der Kurse sowie eine nahezu symmetrische Dichte der effektiven Leistungsfähigkeiten des Türsystems.

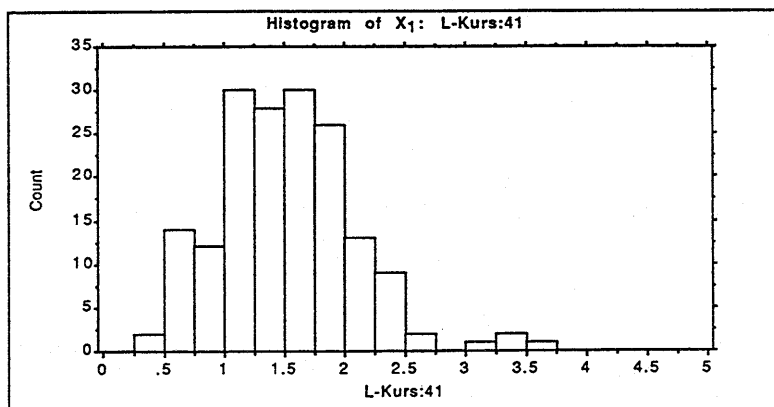
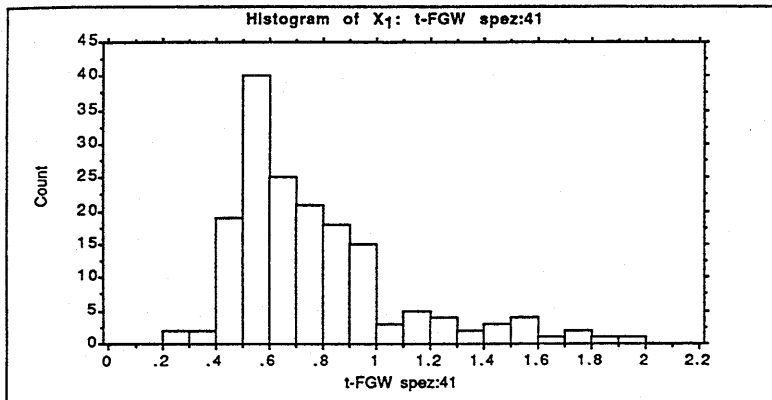


Abb. 6-29: Beispiel für die Dichte der mittleren Fahrgastwechselzeit der Kurse (oben) und der effektiven Leistungsfähigkeit des Türsystems (unten), dargestellt anhand des Be 4/6 der TPG Genf.

6.34.2 Streuungsparameter

Die spärlichen Literaturangaben zur Grösse der Standardabweichung, welche sich zudem auf eine bestimmte Haltestelle beziehen und damit die Streuungen beim Fahrgastaufkommen ebenfalls erfassen, zeigen Abweichungen von rund 40 % des Erwartungswertes. Einen ähnlichen Wert, nämlich 36 %, erhält man für die Standardabweichung des gesamten Haltevorganges, welcher zusätzlich die festen Haltezeitanteile umfasst. Bei den eigenen Messungen liessen sich die Standardabweichungen der mittleren Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse und der effektiven Türleistungsfähigkeit folgendermassen bestimmen:

Tab. 6-14: Standardabweichungen von mittlerer Fahrgastwechselzeit $t_{h,fm}$ und Türleistungsfähigkeit $L'_{T,K}$ ganzer Kurse bei den Messungen.

Betrieb Fahrzeugtyp	$\sigma_{h,fm}$ [s/P]	$\sigma_{h,fm}$ [%]	$\sigma_{L'}$ [P/s]	$\sigma_{L'}$ [%]
TPG Genf, Niederflurtram Be 4/6	0.36	45.7	0.56	37.3
SEMITAG Grenoble, Niederflurtram	0.24	50.2	1.13	44.1
BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 911 ff.	0.45	51.7	0.50	36.8
BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 921 f.	0.47	47.2	0.44	37.2
MAN, Niederflurgelenkbus NG 272	0.48	45.6	0.43	37.9

Im Durchschnitt der Messungen streuten damit die mittleren Fahrgastwechselzeiten ganzer Kurse um rund 48 % und die effektiven Türleistungsfähigkeiten um 39 % des Erwartungswertes. Die Streuung der Fahrgastwechselzeit liegt etwas über den Literaturwerten. Ausserdem übertrifft sie die Standardabweichung der einzelnen Türen deutlich. Die Messwerte ergeben für die Verteilung der Fahrgastwechselzeiten einen k-Faktor nach Erlang von 4.3 oder rund 4 und für die Verteilung der Türleistungsfähigkeiten einen solchen von 6.6 oder rund 7.

6.34.3 Verhältnis zur Streuung an der Einzeltüre

Die Streuung der Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses lässt sich derjenigen an den einzelnen Türen gegenüberstellen:

Tab. 6-15: Standardabweichungen von mittlerer Fahrgastwechselzeit $t_{h,fm}$ und Türleistungsfähigkeit $L'_{T,K}$ ganzer Kurse und Vergleich mit zugehörigen Werten an den einzelnen Türen.

Betrieb Fahrzeugtyp	Kurs $\sigma_{h,fm}$ [%]	Türe $\sigma_{h,fm}$ [%]	Kurs $\sigma_{L'}$ [%]	Türe $\sigma_{L'}$ [%]	Kurs/ Türe $\sigma_{h,fm}$	Kurs/ Türe $\sigma_{L'}$
TPG Genf, Niederflurtram Be 4/6	45.7	29.9	37.3	30.9	1.53	1.21
SEMITAG Grenoble, Niederflurtram	50.2	39.6	44.1	35.0	1.27	1.26
BVB, Gelenktrolleybus Serie 911 ff.	51.7	27.8	36.8	28.2	1.86	1.30
BVB, Gelenktrolleybus Serie 921 f.	47.2	27.2	37.2	28.1	1.74	1.32
MAN, Niederflurgelenkbus NG 272	45.6	24.3	37.9	23.5	1.88	1.61

Im Mittel übersteigt demnach die Standardabweichung der mittleren Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses jene der Einzeltüre um rund 62 %, jene der Leistungsfähigkeit um rund 33 %. Mit diesen Richtwerten kann nun von der Türbreite über die zugehörigen Standardabweichungen der Kennwerte der Einzeltüren auf diejenige des ganzen Kurses geschlossen werden.

6.35 Zusammenfassende Beziehung für die Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse

Die Berechnung der Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses hat zusammenfassend folgende Einflussfaktoren zu berücksichtigen:

- Fahrgastwechselzahl und Türbelastung
- Türzahl
- Streuung an der Einzeltüre beziehungsweise Türbreite
- Ungleichförmigkeit der Türbelastung

Die Fahrgastwechselzeit wird durch die Gegenüberstellung der Fahrgastwechselzahl und der Leistungsfähigkeit des Türsystems als Summe der Einzelleistungsfähigkeiten berechnet, korrigiert durch Faktoren für die genannten ungünstigen Einflüsse:

$$(6-41) \quad t_{h,f} = \frac{F}{\sum I_{T,bi} \cdot L_{s,i}} \cdot \frac{k_{U,T}}{q_{K,L} \cdot q_{K,nb}}$$

wobei	$t_{h,f}$	Fahrgastwechselzeit des Kurses [s]
	F	Fahrgastwechselzahl des Kurses [P]
	$I_{T,bi}$	Lichte Breite der Türe i [m]
	$L_{s,i}$	Spezifische Leistungsfähigkeit der Türe i unter Berücksichtigung aller Einzeleinflüsse [P/sm]
	$k_{U,T}$	Zuschlagfaktor bei ungleichförmiger Belastung des Türsystems des Kurses [-]
	$q_{K,L}$	Standardisierter Ausschöpfungsgrad der Leistungsfähigkeit des Türsystems bezogen auf die Leistungsfähigkeit bei einer spezifischen Türbelastung von $Q_{T,s}$ [-]
	$q_{K,nb}$	Wirkungsgrad des Türsystems in Funktion der Türzahl und der Breite der einzelnen Türen [-]

Zur Erinnerung werden die Korrekturfaktoren an dieser Stelle wiederholt:

$$(6-40) \quad k_{U,T} = 1.0438 - 0.3259 \cdot q_{U,T} + 0.2705 \cdot q_{U,T}^2$$

$$(6-32) \quad q_{K,L} = 0.8275 \cdot Q_{T,s}^{0.0484}$$

$$(6-34) \quad q_{K,nb} = \frac{(0.2407 - 0.5464 \cdot I_{T,b} + 0.0722 \cdot I_{T,b}^2)}{n_{T,K}}$$

Zu beachten ist dabei, dass $L_{s,i}$ bereits sämtliche Einflüsse an der Einzeltüre berücksichtigen muss, insbesondere den Einfluss der Türbelastung auf die spezifische Leistungsfähigkeit.

6.4 Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt

6.4.1 Berechnung der Fahrgastwechselzeit einer Fahrt

6.4.1.1 Bedeutung der Fahrgastwechselzeit einer Fahrt und Berechnung

Die Fahrgastwechselzeit einer ganzen Kursfahrt macht einen massgeblichen Teil der Umlaufzeit eines Kurses aus und bestimmt damit sowohl die Reisegeschwindigkeit der Fahrgäste als auch die Effizienz des Einsatzes der Produktionsmittel mit. Ihre Bedeutung ist mit einem Anteil von 10 bis 12 % der Beförderungszeit vergleichbar mit den festen Haltezeitanteilen oder den Signalverlustzeiten im strassengebundenen öffentlichen Personenverkehr.

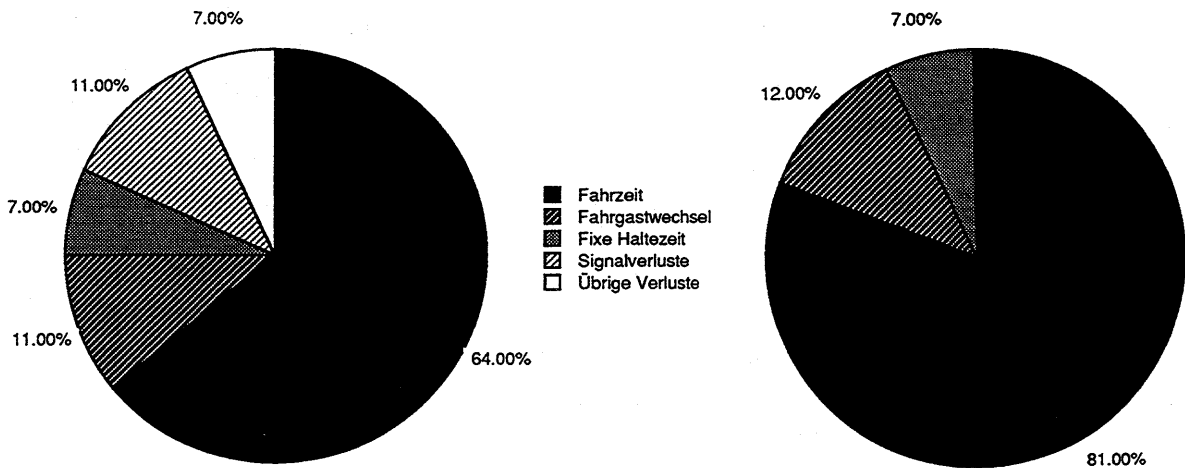


Abb. 6-30: Relative Bedeutung der Zeitanteile an der Beförderungszeit, Mittelwerte. Links strassengebundener Nahverkehr, rechts S-Bahnen.

Sind alle Fahrgastwechselzahlen einer Kursfahrt bekannt, so lässt sich aufgrund der dargestellten Gesetzmässigkeiten die zugehörige effektive Türleistungsfähigkeit bestimmen und damit die jeweilige Fahrgastwechselzeit errechnen. Die Fahrgastwechselzeit der ganzen Fahrt ist gegeben durch die Summe der einzelnen Fahrgastwechselzeiten.

6.4.1.2 Möglichkeiten zur Ermittlung der Fahrgastwechselzahlen

Die vorangehenden Abschnitte haben gezeigt, dass die Leistungsfähigkeit des Türsystems eines Fahrzeuges in hohem Mass von der relativen Türbelastung und damit von der Fahrgastwechselzahl bei jedem einzelnen Halt abhängig ist. Die Summe der Fahrgastzahlen pro Fahrt genügt daher als Grundlage nicht, sondern es sind Informationen über die Grösse der Fahrgastwechselzahlen an den einzelnen Haltestellen erforderlich. Dazu können folgende Quellen genutzt werden:

- Zählungen und Schätzungen der Ein- und Aussteiger pro Haltestelle
- Verkehrsmodelle
- Häufigkeitsverteilung der Fahrgastwechselzahlen
- Automatisches Fahrgastzählsystem

Bei öffentlichen Verkehrssystemen, welche bereits in Betrieb stehen, ist die Stichprobenerhebung der Fahrgastwechselzahlen durch Zählungen oder in neuer Zeit die Erfassung und statistische Aufbereitung mittels automatischen Fahrgastzählsystemen die zweckmässigste Methode.

Sie versagt aber bei neuen Linien, zu deren Dimensionierung eine überschlägige Schätzung nicht zu umgehen ist. Diesem Zweck kann die standardisierte Häufigkeitsverteilung der Fahrgastwechselzahlen dienen.

6.42 Standardisierte Häufigkeitsverteilung der Fahrgastwechselzahlen

6.42.1 Prinzip der standardisierten Häufigkeitsverteilung

Die Methode der standardisierten Häufigkeitsverteilung beruht auf der Grundidee, dass zwischen der maximalen Auslastung eines Kurses und der Fahrgastwechselzahl an den einzelnen Haltestellen während derselben Linienfahrt ein statistischer Zusammenhang in Form einer Häufigkeitsverteilung besteht. Bezieht man die Verteilungsfunktion auf die grösste Kursauslastung, so ist deren Form vom Absolutwert der grössten Kursauslastung unabhängig. Sie wird deshalb als standardisierte Häufigkeitsverteilung bezeichnet. Bezugsgrösse dieser standardisierten Häufigkeitsverteilung ist definitionsgemäss die relative Fahrgastwechselzahl $q_{F,rel}$ der einzelnen Haltestellen:

$$(6-42) \quad q_{F,rel} = \frac{F_i}{Q_{K,Qmax}}$$

wobei $q_{F,rel}$ Relative Fahrgastwechselzahl an der Haltestelle i [-]
 F_i Fahrgastwechselzahl an der Haltestelle i [P]
 $Q_{K,Qmax}$ Maximale Auslastung des Kurses während einer bestimmten Kursfahrt

Aus der Häufigkeitsverteilung dieser relativen Fahrgastwechselzahlen lässt sich deren Summenkurve gewinnen. Sie gibt den Prozentsatz der Halte an, in welchem eine bestimmte relative Fahrgastwechselzahl unterschritten wird. Soll die Standardkurve auf eine Linie mit n_H Haltestellen angewandt, so wird die Ordinate in 100 % / n_H Abschnitte unterteilt. Die Werte für die $q_{F,rel}$ der Summenkurve in der Mitte der n_H Intervalle entsprechen den Erwartungswerten in Prozenten der Maximalbelastung. Den Absolutwert der einzelnen Fahrgastwechselzahlen erhält man als Produkte der relativen Fahrgastwechselzahlen mit der maximalen Auslastung des Kurses während der Kursfahrt:

$$(6-43) \quad F_i = q_{F,rel} \cdot Q_{K,Qmax}$$

Die Summe der Fahrgastwechselzahlen F_i ergibt schliesslich die zu erwartende Gesamtfahrgastwechselzahl der Fahrt. Die maximale Auslastung des Kurses muss unter Berücksichtigung des eingesetzten Fahrzeugtyps, des angestrebten Komfortniveaus und der Qualität des Betriebsablaufes festgelegt werden. Sie kann das nominelle Fassungsvermögen der eingesetzten Fahrzeuge nicht überschreiten.

6.42.2 Relative Fahrgastwechselzahlen bei den Messfahrten

Zur Bestimmung der Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzahlen pro Fahrt in Funktion der maximalen Kursauslastung konnten 11 Messfahrten in Genf, 19 Messfahrten in Grenoble und 52 Messfahrten in Basel genutzt werden. Es fehlen leider Beispiele aus dem Mittel- und Langstreckenverkehr.

Die Annahme, wonach kleine Fahrgastwechselzahlen häufig, grosse dagegen selten sind, bestätigte sich bei allen Fahrten:

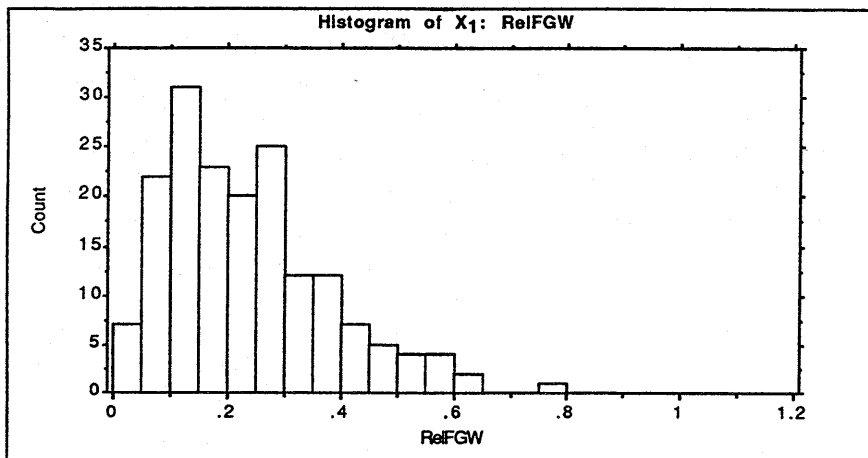


Abb. 6-31: Beispiel der Häufigkeitsverteilung der relativen Fahrgastwechselzahlen bei den einzelnen Halten; Messfahrten auf der Linie 33 der BVB Basel mit dem Gelenktrolleybus der Serie 921 f.

Die Summenkurve nimmt daher nicht einen linearen, sondern einen gekrümmten Verlauf:

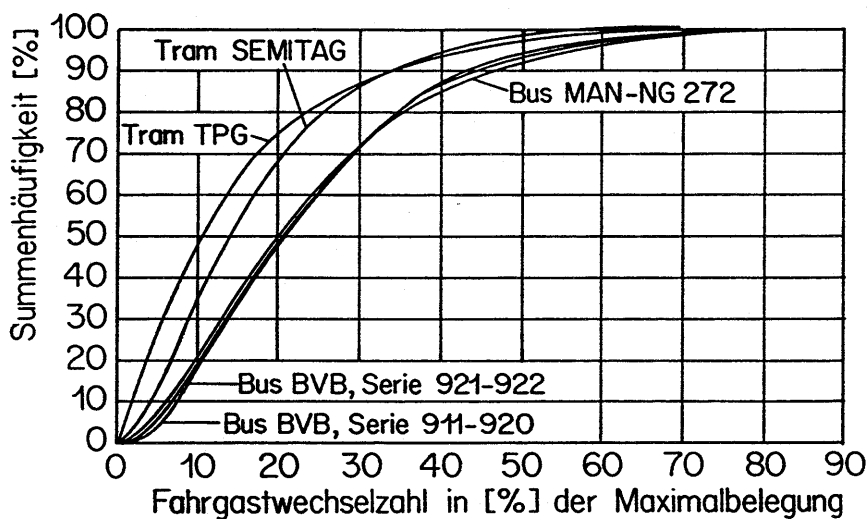


Abb. 6-32: Summenkurve der relativen Fahrgastwechselzahlen bei den Messfahrten in Genf, Grenoble und Basel.

Die Kurvenverläufe aller fünf Fahrzeuge sind ähnlich. Die Abweichung zwischen den drei Messfahrten mit Autobussen einerseits und mit den Schienenfahrzeugen andererseits hängt mit folgenden zwei Faktoren zusammen:

- Kleine Auslastung der Autobusse:* Bei vielen Messfahrten war die Auslastung der Autobusse so bescheiden, dass die Ganzzahligkeit des Fahrgastwechsels das Resultat namentlich im Bereich kleinster Fahrgastwechselzahlen verfälschte. Sehr kleine relative Fahrgastwechselzahlen waren hier rein rechnerisch gar nicht möglich.

Unterschiedliche Verkehrsfunktion der Linien: Der flachere Kurvenverlauf der Trolleybuslinie 33 der BVB deutet auf eine anders gelagerte Verkehrsfunktion der Linie hin. In der Tat ist sie eine Tangentiallinie, welche eine grössere Anzahl von Radiallinien miteinander verbindet. Bei jedem Umsteigepunkt treten grössere Fahrgastwechselzahlen auf. Die beiden Tramlinien von Genf und Grenoble sind hingegen klassische Durchmesserlinien, welche auf ihren Aussenästen der Erschliessung der durchfahrenen Gebiete dienen. Umsteigerströme von anderen Linien an mehreren Knoten fehlen dagegen.

Die Stichprobe ist mit nur drei Linien nicht ausreichend, um generelle Folgerungen bezüglich des Zusammenhangs zwischen dem Verlauf der Summenkurve und der Verkehrsfunktion einer Linie abzuleiten. Die Auswertung von Leitstellendaten bei Systemen mit automatischer Fahrgastzählung eröffnet indessen die Möglichkeit, dieser Hypothese später nachzugehen. Gemeinsam ist immerhin allen Messreihen, dass die grösste relative Fahrgastwechselzahl bei etwa 85 % der maximalen Kursauslastung liegt. In sehr seltenen Fällen steigt sie auf etwa 100 % an.

6.42.3 Standardisierte Verteilung aufgrund der Messungen

Unbesehen der Abweichungen wurde mittels einer Regressionsrechnung aus den fünf Messreihen eine standardisierte Summenkurve abgeleitet. Eine gute Korrelation zeigte bis zu einer relativen Fahrgastwechselzahl von etwa 80 % eine kubischen Gleichung:

$$(6 - 44) \quad P_{q, \text{reli}} = -6.3118 + 4.1673 \cdot q_{F, \text{reli}} - 0.0542 \cdot q_{F, \text{reli}}^2 + 0.000233 \cdot q_{F, \text{reli}}^3$$

wobei $P_{q, \text{reli}}$ Summenhäufigkeit der relativen Fahrgastwechselzahlen [%]

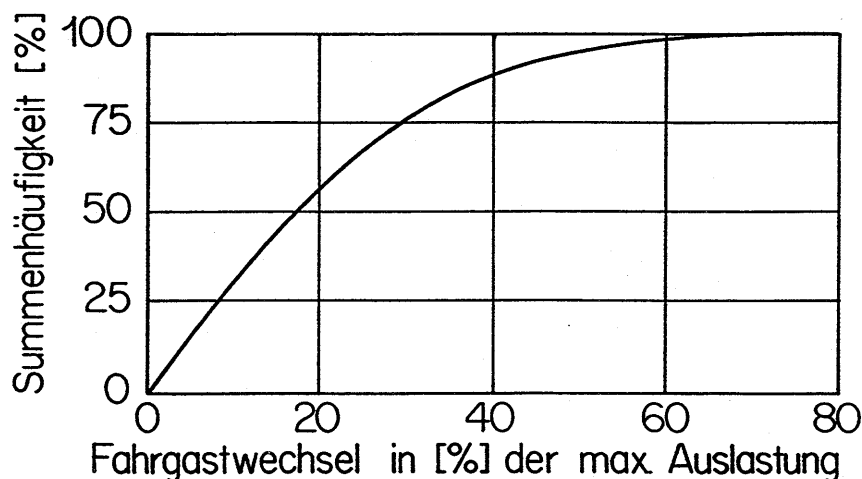


Abb. 6-33: Standardisierte Summenkurve der relativen Fahrgastwechselzahlen, gültig bis zu einer Fahrgastwechselzahl von 80 % der maximalen Kursauslastung.

6.43 Zusammenfassung der Berechnung der Fahrgastwechsel- und Haltezeit einer ganzen Kursfahrt

Abschliessend kann nunmehr auf der Basis der vorangehenden Abschnitte das Vorgehen bei der Berechnung der Fahrgast- und Haltezeit einer ganzen Fahrt in sechs Schritten zusammengefasst werden:

1. *Fahrgastwechselzahlen an den einzelnen Haltestellen:* Zur Bestimmung der an den einzelnen Haltestellen zu erwartenden Fahrgastwechselzahlen ist als erstes die massgebende Maximalbelastung festzulegen. Vorausgesetzt wird dabei, dass die während einer bestimmten Zeit zu befördernde Fahrgastzahl der Strecke aus verkehrsplannerischen Berechnungen bekannt ist. Die massgebende Maximalbelastung orientiert sich am theoretischen Fassungsvermögen des Fahrzeuges und dem aus Komfort- und Betriebsgründen zulässigen Stehplatzbelegungsgrad. Aus der Standardverteilung der relativen Fahrgastwechselzahlen und der Zahl der Haltestellen leiten sich die Haltestellenfaktoren ab. Das Produkt der einzelnen Haltestellenfaktoren mit der massgebenden Maximalbelastung ergibt die einzelnen Fahrgastwechselzahlen. Es ist an dieser Stelle nochmals darauf hinzuweisen, dass mit dieser Schätzmethode nur die zu erwartende Grösse der Fahrgastwechselzahlen errechnet werden kann, nicht aber der Ort ihres Auftretens.
2. *Türleistungsfähigkeit jeder Türe des Kurses für jeden Fahrgastwechselfvorgang:* Als Grundlage zur Berechnung der Leistungsfähigkeit des Türsystems sind in einem zweiten Schritt für jede einzelne Türe und für jede Grösse des auftretenden Fahrgastwechsels die jeweilige Türleistungsfähigkeiten und Standardabweichungen zu bestimmen. Aus der Fahrgastwechselzahl und der Türbreite ergibt sich dabei die spezifische Türbelastung. Zusammen mit der zu überwindenden Höhendifferenz und den weiteren Einflüssen errechnet sich aus dieser wiederum die spezifische Türleistungsfähigkeit. Das Produkt der Türbreite mit dieser spezifischen Türleistungsfähigkeit ist die gesuchte Leistungsfähigkeit jeder Türe.
3. *Effektive Leistungsfähigkeit des Türsystems:* Mit der Summe der Leistungsfähigkeiten der einzelnen Türen ist die theoretische Leistungsfähigkeit des Türsystems für einen bestimmten Fahrgastwechsel gegeben, die aber noch über der effektiven Leistungsfähigkeit liegt. Reduziert wird sie zunächst durch die Ungleichförmigkeit der Türbelastung, welche durch eine unregelmässige Türverteilung, eine unausgewogene Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron und im Fahrzeug sowie durch Sonderfaktoren bewirkt werden kann. Die Zahl der Türen sowie die Streuung von deren spezifischen Leistungsfähigkeiten führen aufgrund der statistischen Gesetzmässigkeiten zu einer weiteren Verminderung der Leistungsfähigkeit. Schliesslich kann die theoretische Leistungsfähigkeit im wichtigen Bereich kleiner Fahrgastwechselzahlen infolge der Ganzzahligkeit des Fahrgastwechsels nicht ausgeschöpft werden.
4. *Fahrgastwechselzeit für jeden einzelnen Fahrgastwechselfvorgang:* Durch die Schritte 1 und 3 sind die Fahrgastwechselzahlen aller Halte und die zugehörigen Fahrgastwechselzeiten gegeben. Daraus ergibt sich im vierten Schritt des Berechnungsganges die Fahrgastwechselzeit jedes Haltes. Die Summe dieser einzelnen Fahrgastwechselzeiten bildet die Gesamtfahrgastwechselzeit der Kursfahrt.

5. ***Berücksichtigung der festen Haltezeitanteile:*** Einen wesentlichen Bestandteil der Haltezeit stellen die festen Haltezeitanteile dar, welche sich aus den Reaktionszeiten, den Bewegungszeiten der Türen und dem Zeitbedarf für die Abfertigung zusammensetzen. Ihre Grösse hängt vom Türsystem, der Fahrzeugsteuerung und der Abfertigungsmethode ab. Im Nahverkehr mit Abfertigung durch den Fahrer und automatischen Fahrzeugtüren lässt sich ein globaler Wert von 8 s pro Halt annehmen. Davon entfallen 2 s auf die Latenzzeit I für den Zeitverlust zwischen dem Anhalteruck und dem Beginn des Fahrgastwechsels sowie 6 s auf die Latenzzeit II für die Zeitdauer zwischen dem Abschluss des Fahrgastwechsels und dem Anfahrdruck.

6. ***Gesamthaltezeit der Kursfahrt:*** Aus der Summe aller einzelnen Fahrgastwechselzeiten gemäss Schritt 4 und den festen Haltezeitanteilen gemäss Schritt 5 ergibt sich schliesslich die gesuchte Gesamthaltezeit der Kursfahrt.

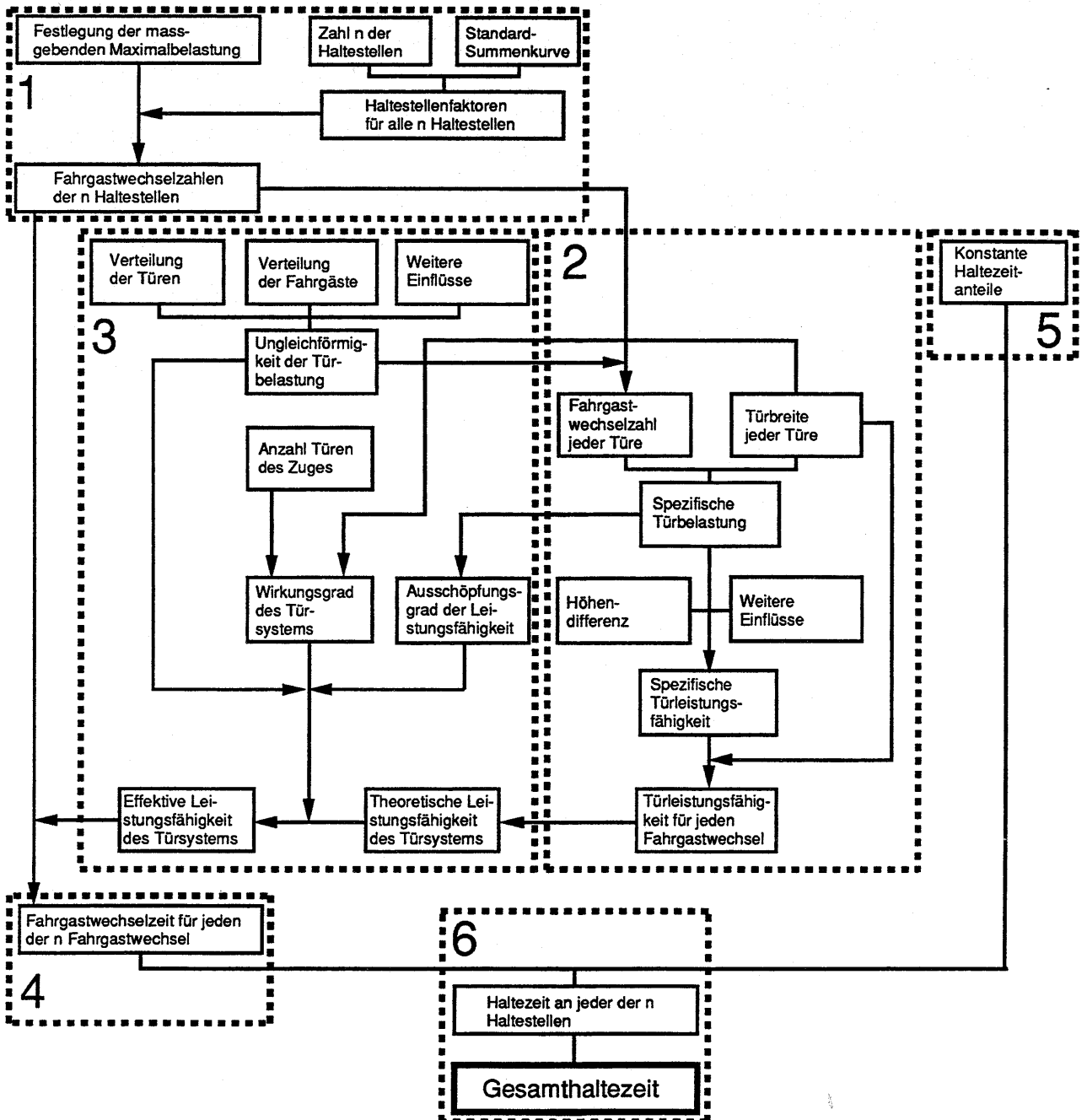


Abb. 6-34: Vereinfachte Darstellung des Berechnungsganges bei der Bestimmung der Gesamthaltezeit einer Kursfahrt.

Die reine Fahrzeit errechnet sich mit den Gesetzen der Fahrdynamik aus den Traktionseigenschaften des Kurses und dem Geschwindigkeitsband der Strecke. Die Verluste durch Strassenverkehrssignale und andere Störquellen sind linienspezifisch zu ermitteln. Zusammen mit der oben hergeleiteten Gesamthaltezeit können nunmehr sämtliche Beförderungszeitkomponenten einer Kursfahrt mit hoher Genauigkeit vorausberechnet werden, selbst wenn sich die Linie noch im Projektstadium befindet.

6.5 Folgerungen für die beteiligten Systemkomponenten

6.5.1 Fahrgast

6.5.1.1 Beeinflussung des Fahrgastverhaltens

Die Einflussmöglichkeiten auf die Systemkomponente Fahrgast sind beschränkt, da die einzelnen Fahrgäste mit ihren Eigenschaften und die Zusammensetzung der Fahrgastgruppen als gegeben zu betrachten sind. Die Untersuchung hat aber gezeigt, dass die vom Fahrzeug zur Verfügung gestellte Türleistungsfähigkeit namentlich bei kleinen Fahrgastwechselzahlen nicht ausgenutzt wird, da sich nicht genügend Fahrgäste in Türnähe befinden. Besonders ausgeprägt ist dies bei Kurzen, welche zwei Wagenklassen anbieten oder bei solchen, welchen unzugängliche Fahrzeuge wie Lokomotiven, Gepäckwagen, Güterwagen zwischen den Reisezugwagen aufweisen. Durch das Zurücklegen der Wege zur Türe erhält die Zuströmfunktion eine flache Form und die Fahrgastwechselzeit verlängert sich.

Daraus leitet sich ab, dass sich die Fahrgastwechselzeit vor allem bei kleinen Fahrgastwechselzahlen durch eine steile Zuströmfunktion, deren Stärke während einer gewissen Zeitdauer die Türleistungsfähigkeit übersteigt, massgeblich senken lässt. Alle Bewegungen auf dem Perron oder im Fahrzeug, welche vor der Einfahrt des Kurses abgeschlossen sein können, müssen abgeschlossen sein und die Fahrgäste müssen sich bereits vor dem Beginn des Fahrgastwechsels in der Nähe der Türen befinden. In Kauf genommen werden muss allerdings vor dem Einstieg ein kleiner Rückstau. Dazu sind folgende Massnahmen möglich:

- *Einsteigen:* Der Standort der Türen sowie allfälliger Sonderabteile wie 1. Klasse oder Servicewagen eines einfahrenden Fernverkehrszuges ist möglichst genau anzugeben. Ein wesentlicher Schritt wurde diesbezüglich mit der Sektoreneinteilung auf den Bahnhöfen und den klassischen Wagenstandszeigern getan. Durch eine dynamische Anzeige des nächstfolgenden Kurses an einer Haltestelle mit mehreren Linien im Nahverkehr erreicht man, dass sich die einsteigewilligen Fahrgäste schon vor der Einfahrt des Kurses bereitstellen. Verändert sich die Kurslänge im Verlaufe der Betriebszeit infolge von Verstärkungen oder Schwächungen wesentlich, so ist zusätzlich die Angabe der Kurslänge und des optimalen Warteraumes erforderlich, wie dies bereits heute bei S-Bahn-Systemen mit der Unterscheidung in Kurz-, Voll- und Langzüge praktiziert wird.
- *Aussteigen:* Um das Aussteigen zu beschleunigen, ist ein Nahverkehrsverhalten der Fahrgäste zu erzeugen, bei welchem sich die Fahrgäste bereits vor dem Halt des Kurses zum Aussteigen bereithalten. Voraussetzung dafür ist, dass die Fahrgäste zum geeigneten Zeitpunkt über den nächsten Halt informiert werden. Die optimale Dauer bemisst sich nach der Zeit, welche die Fahrgäste zum Aufstehen und zum Erreichen der Türe benötigen sowie nach der maximal akzeptierten Dauer, welche die Fahrgäste stehend verbringen. Diese Dauer wird im Nahverkehr kleiner sein als im Fernverkehr. Eine klare Information im Zug trägt somit nicht nur zur Verbesserung des Reisekomforts bei, sondern auch zur Verflüssigung des Betriebsablaufes.

Es ist in diesem Zusammenhang darauf hinzuweisen, dass bei der Informationsaufnahme mit den älteren Fahrgästen gerade jenes Kundensegment die grössten Schwierigkeiten hat, welches nicht mehr über das volle Reaktions- und Bewegungsvermögen verfügt. Eine Verbesserung des

Betriebsablaufes ist aber ganz besonders durch die Beeinflussung gerade dieser Fahrgastgruppe zu erzielen. Daraus leiten sich hohe Anforderungen an die On-line-Informationssysteme ab und in vielen Fällen wird auf eine zweikanalige Informationsübertragung mittels akustischer und optischer Mittel nicht zu verzichten sein. Dies ist sowohl im Nahverkehr von Bedeutung, wo eine rasche Reaktion gefordert ist, als auch im Fernverkehr, wo ein Fehlverhalten besonders gravierende Folgen zeitigt und die Fahrgäste zu hoher Vorsicht mit entsprechend grösserem Zeitbedarf veranlasst.

6.51.2 Qualitative Auswirkungen der Einstiegsgestaltung

6.51.21 Massnahmen zur erleichterten Benützung des öffentlichen Verkehrs

Nebst einer flüssigeren Betriebsabwicklung erwartet man von günstigen Einstiegsverhältnissen - namentlich von der Niederflurtechnik - eine Erleichterung der Benützbarkeit öffentlicher Verkehrsmittel. Im Vordergrund stehen die 45.2 % der Fahrgäste mit eingeschränkter Beweglichkeit beziehungsweise die 16.9 % der Mobilitätsbehinderten. In der Berechnung der Fahrgastwechselzeit kommen die betrieblichen Auswirkungen unterschiedlicher Einstiegsgestaltungen hinreichend zum Ausdruck, nicht aber die qualitativen, auf welche deshalb ausführlicher eingegangen werden soll. Eine qualitative Verbesserung der Einstiegsgestaltung zugunsten von Mobilitätsbehinderten führt ebenfalls zu kürzeren Fahrgastwechselzeiten, auch wenn der zahlenmässige Nachweis derzeit nicht möglich ist.

Will man einer mobilitätsbehinderten Person die Fahrt mit dem öffentlichen Verkehrsmittel ermöglichen, so bieten sich zwei grundsätzliche Handlungsstrategien an:

1. *Sondertransportdienst*: Durch einen Sondertransportdienst werden die baulichen Hindernisse zwischen Anfangspunkt und Endpunkt umgangen.
2. *Behindertengerechter Ausbau des Systems*: Der behindertengerechte Ausbau des öffentlichen Verkehrssystems beruht auf der Beseitigung aller Hindernisse der Wegkette.

Der behindertengerechte Ausbau des öffentlichen Verkehrssystems verlangt nach Massnahmen an der Schnittstelle Anlage-Fahrzeug. Dafür kommen in Betracht:

- Sondermassnahmen für Behinderte an den Haltestellen: Hochpodest für Rollstühle
- Bauliche Anpassung der gesamten Haltestelle: Hochbahnsteig
- Sondermassnahmen für Behinderte am Fahrzeug: Behindertenlift, Rampe
- Bauliche Anpassung der Fahrzeugflotte: Niederflurtechnik

Zur Bewertung der Massnahmen sind die Auswirkungen einer Behinderung auf die Fähigkeit zur Benützung öffentlicher Verkehrsmittel von Belang. Die Behinderungsgrade können deshalb mit Hilfe einfacher Kriterien abgegrenzt werden:

- 0 *Keine spürbare Behinderung*: Diese Fahrgäste sind in der Lage, ohne Handgriff einen konventionellen Fahrzeugeinstieg zu bewältigen.
- 1 *Leichte Behinderung*: Zum Besteigen eines konventionellen Fahrzeuges müssen sich diese Fahrgäste eines Handgriffes bedienen, legen die Einstiegstreppe aber nahezu gleichschnell zurück wie Unbehinderte.
- 2 *Mittlere Behinderung*: Ein Handgriff ist für diese Fahrgastgruppe unerlässlich und es ist ein deutlicher Geschwindigkeitsverlust zu beobachten.

- 3 **Starke Behinderung:** Zum Besteigen eines Fahrzeuges benötigen diese Fahrgäste zwei Handgriffe. Der Vorgang erfordert viel Zeit.
- 4 **Schwerste Behinderung:** Ohne Hilfspersonen sind diese Fahrgäste nicht in der Lage, ein Fahrzeug des öffentlichen Verkehrs zu besteigen oder zu verlassen.

Die Häufigkeit der auftretenden Behinderungen ist etwa umgekehrt proportional zu deren Schweregrad.

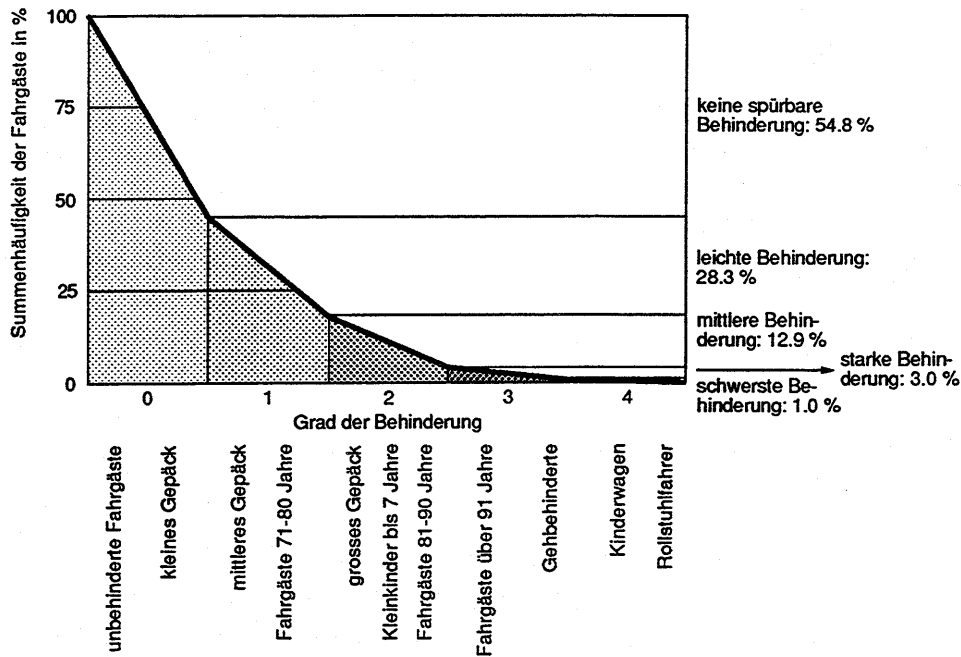


Abb. 6-35: Behinderungsgrade mit deren Schwere und Häufigkeit.

6.51.22 Nutzen der Massnahmen und Strategie

Die Sondermassnahmen für Behinderte an der Haltestelle wie an den Fahrzeugen vermögen die Reisefähigkeit nur einer sehr kleinen Gruppe von Mobilitätsbehinderten und insbesondere nicht jene der Altersbehinderten zu heben. Durch einen ebenen Einstieg hingegen lässt sich die Beeinträchtigung aller behinderten Fahrgäste um etwa einen Schweregrad abmindern, sodass Fahrgäste mit leichten oder mittleren Behinderungen bei einem ebenerdigen Einstieg ohne Einstiegs-hilfe auskommen. Fahrgäste mit starker Behinderung benötigen nur noch einen statt zwei Handläufe und Schwerstbehinderte bewältigen den Einstieg ins Fahrzeug ohne fremde Hilfe. Hochbahnsteige und Niederflurtechnik sind in ihrer Wirkung ähnlich, doch weist letztere - bei gewissen durch komplizierte Fahrwerkskonzepte bedingten Nachteilen - drei Vorteile auf:

1. Die Niederflurtechnik tritt im Stadtbild nicht in Erscheinung.
2. Die Niederflurtechnik verlangt keine aufwendigen Zugangsanlagen wie Rampen und Treppen, welche gerade für Mobilitätsbehinderte wieder zum Hindernis werden können.
3. Die Niederflurtechnik lässt sich rasch auf dem ganzen Netz einsetzen, auch wenn zunächst ein Mischbetrieb mit konventionellen Fahrzeugen geduldet werden muss.

Der Nutzen der Niederflurtechnik ist bei Rollstuhlfahrern am auffälligsten, da sie ihnen die Benützung öffentlicher Verkehrsmittel überhaupt erst ermöglicht. Insgesamt bietet sie aber 45.2 % der Fahrgäste einen deutlichen Vorteil. In erster Linie kommt sie den Reise- und Altersbehinderten entgegen, denn diese Kategorien überwiegen die Behinderten im engeren Sinn bei weitem. Daraus folgt, dass Niederflurfahrzeuge möglichst nur Tiefeinstiege und möglichst wenige Treppen im Fahrzeuginnern aufweisen sollen, da sich sonst zu viele Fahrgäste auf die günstigen Einstiege konzentrieren. Begleitet werden muss die Niederflurtechnik von der Ausrüstung aller Haltestellen mit Bahnsteigen von etwa 200 mm Höhe, um die Resthöhendifferenz zum Wagenboden im geforderten Rahmen von 30 bis 120 mm zu halten.

Da die meisten Netze bereits existieren, muss noch lange mit den vorhandenen festen Anlagen gearbeitet werden. Die beschränkten Mittel sowie die Langlebigkeit der Infrastruktur und der Fahrzeuge verlangen nach einer pragmatischen und stufenweisen Strategie mit Priorität bei besonders wichtigen und schnell zu sanierenden Verkehrsbeziehungen. Ein behindertenfreundlicher Einstieg allein genügt nicht. Behindertengerechten Gebäuden und öffentlichen Anlagen kommt eine ebenso zentrale Bedeutung zu. In den weitaus meisten Fällen werden die Rollstuhlfahrer die Wege zu und von den Haltestellen aber noch während längerer Zeit nur mit einer Hilfsperson zurücklegen können, denn die erforderlichen Realisierungszeiten werden zum schrittweisen Vorgehen zwingen:

- *Stufe 1:* Niederflurfahrzeuge werden eingesetzt, aber die Fussgängeranlagen sind noch nicht behindertengerecht ausgebaut.
=> Begleitperson ist auf ganzer Fahrt nötig.
- *Stufe 2:* Niederflurfahrzeuge werden eingesetzt und genau definierte Fussgängerzonen/Innenstadtbereiche sowie öffentliche Gebäude sind behindertengerecht ausgebaut. Der jeweilige Ausbaustand muss den Interessierten laufend mittels eines Behindertenstadtplanes bekanntgegeben werden.
=> Begleitperson nur an einem Ende der Fahrt nötig.
- *Stufe 3 = Anzustrebender Zustand:* Niederflurfahrzeuge werden eingesetzt und sämtliche Wege sowie die Gebäude sind behindertengerecht ausgebaut
=> keine Begleitperson mehr nötig.

Auf diese Weise wird die Niederflurtechnik von einer fahrzeugtechnischen Angelegenheit zum Baustein eines Niederflur-Verkehrssystems. Durch dieses können die Sondertransportdienste schrittweise von den ineffizienten Kurzstreckenfahrten im Stadtzentrum entlastet und die gebundenen Kapazitäten für jene Fahrten freigemacht werden, wo Sondertransporte unersetzlich bleiben. Den Rollstuhlfahrern wird eine neue Selbständigkeit durch die Bewegungsfreiheit im Stadtzentrum verschafft und es wird ihnen ermöglicht, dass sie sich bereits in einer frühen Realisierungsphase des Programms am einen Ende der Fahrt frei bewegen können. Ihre Integration wird wirksam gefördert.

6.51.23 Sondermassnahmen im Niederflur-Verkehrssystem

Mit der Einführung der Niederflurtechnik entfällt die Notwendigkeit von Hochpodesten oder Hochperrons an den Haltestellen. Dagegen stellt sich die Frage, ob Hublifte in Niederflurfahrzeuge eingebaut werden sollen. Bei einem Nutzerpotential von 0.5 % der Fahrgäste verzeichnete das System von Berlin im Jahr 1990 allerdings nur einen Rollstuhlanteil von 0.02 % [234].

Mit Hublifts in Niederflurfahrzeugen kann lediglich eine Resthöhendifferenz beseitigt werden, welche meist von einer Hilfsperson zu überwinden wäre. Im Extremfall des fehlenden Perrons beträgt der Höhenunterschied etwa 250 bis 280 mm. Die Einbaukosten sind bei Niederflurfahrzeugen auf 30'000 bis 40'000 DM zu veranschlagen [173], [234], [465]. Hinzu kommen ein Unterhaltsaufwand von jährlich 2000 bis 3000 DM und eine beträchtliche Störungsempfindlichkeit: Die 2642 Busse in New York verzeichnen jährlich 1300 Fahrzeugausfälle infolge Defekts des Behindertenlifts, bei den 1900 Bussen von Los Angeles sind es etwa 1500 Ausfälle [173].

Gross sind aber insbesondere die betrieblichen Nachteile. Ein Hauptcharakteristikum des Nahverkehrs ist der fahrplanunabhängige Fahrgastzustrom bei Kursfolgezeiten bis 10 Minuten und die daraus folgende Aufschaukelung einer Störung. Als Beispiel wird eine Kursfolgezeit von 6 Minuten, eine reine Fahrgastwechselzeit von 15 s und eine Belade- beziehungsweise Entladedauer von 150 s betrachtet [171], [264], [500]. Der Rollstuhlfahrer besteige den Kurs elf Haltestellen vor der Endstelle und verlasse ihn nach fünf Haltestellen wieder. Der Kurs trifft dadurch mit einer Verspätung von rund 7 Minuten an der Endstelle ein. Davon werden 2 Minuten durch die Störungsaufschaukelung verursacht. Verkehrt die Linie im 4-Minuten-Betrieb, so beträgt die Endverspätung mehr als 8 Minuten, wovon über 3 Minuten auf die Störungsaufschaukelung entfallen. Verspätungen in dieser Grössenordnung wurden im praktischen Betrieb tatsächlich beobachtet [500].

Der nur etappenweise zu realisierende Aufbau eines behindertengerechten Niederflur-Verkehrsystems und die Beförderung Behinderter, welche den öffentlichen Verkehr trotz aller Verbesserungen nicht benützen können, machen Sondertransportdienste auch in Zukunft unumgänglich. So hat das Telebus-Projekt Berlin gezeigt, dass 57 % der berechtigten Personen ohnehin Hilfe benötigen, zum Beispiel zum Ankleiden, und dass in sogar 74 % der Fälle eine Unterstützung beim Verlassen des Hauses nötig ist [171]. Dass das Sonderfahrangebot zwar so gross wie nötig, aber auch so klein wie möglich zu halten ist, zeigen die Betriebskosten: Pro Beförderungsfall ist mit Aufwendungen von 40 bis über 80 DM zu rechnen, mithin etwa das Zwanzigfache der Produktionskosten für eine Fahrt im Linienverkehr [482], [591].

6.52 Feste Anlagen

6.52.1 Überblick

Die Eigenschaften der festen Anlagen bestimmen die Fahrgastwechselzeit an den einzelnen Haltestellen in zweierlei Weise:

- *Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron:* Die Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron beeinflusst die Benützung der Einstiege des Kurses, da die Fahrgäste in der Regel die nächstliegende Türe benützen. Ziel ist eine möglichst gleichmässige Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron.
- *Höhendifferenz:* Die Perronhöhe bestimmt zusammen mit der Wagenbodenhöhe die zu überwindende Höhendifferenz und damit die spezifische Türleistungsfähigkeit. Durch eine optimale Abstimmung der Perronhöhe auf die Wagenbodenhöhe muss die Höhendifferenz minimiert werden.

Die Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron wird einerseits gesteuert durch die Lage der Zugänge und die Ausstattung der Perronfläche mit Sitzgelegenheiten, Informationseinrichtungen und

Fahrscheinautomaten, andererseits durch die Abgänge an der Zielstation. Die Kriterien kommen bei den verschiedenen Systemen des öffentlichen Verkehrs nicht in gleicher Weise zum Tragen:

- *Strassengebundener Nahverkehr:* Im strassengebundenen Nahverkehr mit Stadtbahnen, Strassenbahnen und Autobussen ist der Zu- und Abgang zur Haltestelle meist nicht genau definiert und die Dimensionen des Systems sind so klein, dass der Fahrgast keinen wesentlichen Reisezeitvorteil erzielt, wenn er sich nach den örtlichen Gegebenheiten an der Zielhaltestelle ausrichtet. Wesentlich ist für ihn die Ausstattung der Ausgangshaltestelle.
- *Mittelstrecken- und Fernverkehr:* Im Gegensatz zum strassengebundenen Nahverkehr verfügen die Haltepunkte des Mittelstrecken- und Fernverkehrs nur über wenige definierte Zu- und Abgänge. Die Fahrgäste sind über die Verhältnisse am Zielort meist besser im Bild als im Nahverkehr und richten sich stark darauf aus.

Die Unmöglichkeit der quantitativen Erfassung der Vorgänge auf dem Perron hat zur Folge, dass in diesem Abschnitt einige allgemeine Hinweisen genügen müssen.

6.52.2 Anordnung der Zu- und Abgänge

Um eine gleichmässige Türbenützung und Fahrzeugauslastung zu erzielen, müssen wenn immer möglich zwei oder mehr Perronzugänge vorgesehen werden. Eine gleichmässige Zugsauslastung ist nicht nur zur optimalen Ausschöpfung der Systemkapazität und für ein gleichmässiges Komfortniveau wesentlich, sondern auch für eine ausgewogene Türbenützung durch die aussteigenden Fahrgäste. Wenn möglich ist zur Vermeidung von Fahrgastkonzentrationen auf Zugänge bei den Stirnseiten des Perrons zu verzichten. Zweckmässiger sind Zugänge in den Viertelspunkten.

Kann aus bestimmten Gründen an einer bestimmten Haltestelle nur ein einziger Zugang angeordnet werden oder ist ein stirnseitiger Zugang unvermeidlich, so muss eine gleichmässige Verteilung mittels der Einrichtungen wie Biletautomaten, Sitzgelegenheiten, Wetterschutz, Informationsstellen etc. geschaffen werden. Ausserdem muss in diesem Fall die einseitige Zugangssituation an anderen Haltestellen kompensiert werden, indem man dort eine andere Erschliessung der Perronfläche vorsieht.

Da sich die Mehrzahl der Fahrgäste des Mittelstrecken- und Fernverkehrs bezüglich ihres Aufenthaltsortes nach den Verhältnissen am Fahrtziel richten, ist die Konzipierung der Hauptstationen von besonderer Bedeutung. Namentlich in U- und S-Bahn-Systemen müssen die wichtigsten Haltepunkte mit mehreren gut verteilten Zu- und Abgängen versehen werden, da dadurch indirekt die Fahrgastverteilung auf dem gesamten Netz gesteuert wird.

6.52.3 Perronausstattung

Mit Hilfe der Perronausstattung kann die Fahrgastverteilung vor allem im strassengebundenen Nahverkehr gelenkt werden, da hier andere Wahlkriterien kaum zum Tragen kommen. In einem beschränkten Mass kann eine ungunstige Zugangssituation bei Mittelstrecken- und Fernverkehrssystemen durch eine entsprechende Ausstattung des Perrons ausgeglichen werden. Beispielsweise lassen sich die Fahrgäste durch dezentrale Wetterschutzeinrichtungen verteilen, wenn nur eine zentrale Unterführung vorhanden ist.

6.52.4 Perronhöhen

Der Anlagenbauer ist bestrebt, die Perronhöhen aus wirtschaftlichen und öfters auch betrieblichen Gründen, zum Beispiel zugunsten von Karrenüberfahrten, möglichst niedrig zu halten. Er gerät damit in Konflikt mit dem Fahrzeugkonstrukteur. Am wenigsten Schwierigkeiten entstehen für diesen bei hohem Wagenboden, welcher beim Personentriebwagen RBe 4/4 der SBB nicht weniger als 1280 mm erreicht und beim Gelenktram Be 8/8 der SVB Bern rund 1000 mm. Die meisten konventionellen Fahrzeuge liegen bei immerhin 850 und 1050 mm.

Hochperrons sind deshalb im Ausland selten und in der Schweiz noch unbekannt. Jahrzehntelang galten hierzulande sogar nur 250 mm als Standardmass. Bei Strassenbahnen sind auch heute noch 130 mm die Norm und nach wie vor existieren Haltestellen ohne jedes Perron. Allzulange wurde gleichzeitig eine Einstiegshöhe von rund einem Meter als tragbar und von einem halben Meter als unvermeidlich erachtet. Da die Wagenbodenhöhen und die Perronhöhen zudem vorwiegend sektoriell optimiert wurden, ist man heute mit einer Vielzahl von Kombinationen Wagenbodenhöhe-Perronhöhe konfrontiert.

Tab. 6-16: Einstiegssituationen in Abhängigkeit von Perronhöhe und Wagenbodenhöhe (typische Werte und Beispiele).

	Hochperron ca. 900 mm	Mittelperron ca. 500 mm	Tiefperron ca. 200 mm
Hochflur 1000 mm	ebener Einstieg S-Bahnen BRD U-Bahn-Systeme	Treppeneinstieg aufwärts Hauptbahnen S-Bahn Zürich (teilweise)	Treppeneinstieg aufwärts konventionelle Trams und Busse Vorortsbahnen S-Bahn Zürich (selten) Nebenbahnen Hauptbahnen
Mittelflur 600 mm	Treppeneinstieg abwärts (selten)	ebener Einstieg (selten)	Treppeneinstieg aufwärts Strassenbahn Genf Autobusse
Niederflur 300 mm	Treppeneinstieg abwärts (selten)	Treppeneinstieg abwärts Doppelstockwagen DR	ebener Einstieg Stadtbahn Grenoble Strassenbahn Kassel Doppelstockwagen DR Vorortswagen FS

Die Festlegung der Perronhöhe ist ein Optimierungsprozess, der nicht losgelöst von den Fahrzeugkonzepten betrachtet werden kann. Aufgrund der Ergebnisse der Untersuchung lassen sich aus der Sicht des Fahrgastwechsels lediglich folgende Kriterien formulieren:

- *Ebene oder quasi-ebene Einstiegsverhältnisse:* Aus Gründen kurzer Fahrgastwechselzeiten und im Hinblick auf die bewegungsbehinderten Fahrgäste ist ein ebenerdiger Einstieg generell anzustreben. Wenn technisch und finanziell machbar ist eine genaue Höhenangleichung von Perron und Wagenboden wünschbar, zum Beispiel mittels Luftfederung. Wenn dies nicht machbar ist, so ist die Höhendifferenz in einer Bandbreite von zwischen +30 bis +80 mm zu halten. Dieser quasi-ebene Einstieg ist von Sehbehinderten als Inhomogenität des Bodens erkennbar, wirkt sich nicht als Stolperkante aus, ermöglicht auch Bewegungsbehinderten den Einstieg ohne Erschwernisse und senkt gleichzeitig die Türleistungsfähigkeit nicht spürbar.
- *Ergonomisch günstige Treppenmasse:* Kann kein ebenerdiger Einstieg erreicht werden, so ist zumindest auf ein nach den Regeln der Ergonomie ausgebildetes und regelmässiges Stufenmass zu achten. Als ungünstig sowohl bezüglich Benützungsgüte als auch bezüglich der Türleistungsfähigkeit haben sich stark unterschiedliche Treppenstufen erwiesen. Die häufig aufgestellte Forderung, dass ein Fahrgast nicht in ein Fahrzeug hinuntersteigen dürfe, lässt sich dagegen aufgrund der vorliegenden Informationen nicht belegen.

Ob die Kriterien durch eine Anhebung des Perrons, durch eine Absenkung des Wagenbodens oder durch eine Kombination beider Massnahmen erreicht wird, ist eine Optimierungsfrage, in welcher die Wirtschaftlichkeit, die übrigen Anforderungen von Bau und Betrieb der Verkehrsanlage sowie die städtebauliche Integration den Ausschlag geben.

6.53 Fahrzeug

6.53.1 Gestaltung der Einstiege

6.53.11 Einstiegsbreite

Mit der Einstiegsbreite eng verknüpft ist die Grösse der Streuung der spezifischen Türleistungsfähigkeit. Je grösser die Streuung an den einzelnen Türen ist, desto grösser ist wie erläutert auch der Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses. Gleichzeitig hängt der Ausschöpfungsgrad des Türsystems von der Zahl der Türen ab, wobei der Ausschöpfungsgrad umso grösser ist, je weniger Türen ein Kurs aufweist. Diese beiden Einflüsse wirken demnach gegenläufig: Enge Türen weisen zwar eine kleine Streuung auf, doch muss eine grosse Zahl von Türen vorgesehen werden, soll eine bestimmte Summe der Türbreiten erreicht werden. Diese grosse Türzahl wirkt sich ihrerseits wiederum ungünstig aus. Gerade entgegengesetzt verhält es sich bei breiten Türen.

Um einen Anhaltspunkt in dieser Optimierungsfrage zu erhalten wurde mit dem Programm ACoST.NeXT eine Berechnung der Fahrgastwechselzeit des Kurses für eine gesamte Türbreite von 5 und 10 m pro Kurs unter folgenden Annahmen durchgeführt:

- Spezifische Türbelastung: 50 P/m'
- Höhendifferenz: 0.00 m
- Kurslänge: 50 und 100 m
- Fahrgastverteilung: gleichmässig
- Türverteilung: gleichmässig

Die Berechnungen zeigen, dass aus Sicht eines kurzen Fahrgastwechsels möglichst viele schmale Türen zweckmässig sind. Das Optimum liegt bei etwa 0.65 m. Unterhalb von einer Türbreite von etwa 1.00 m ist allerdings kein entscheidender Rückgang der Fahrgastwechselzeit des Kurs mehr zu erwarten. Über etwa 1.25 m steigt sie dagegen so rasch an, dass breitere Türen rein wirtschaftlich begründet sein müssen. Unbesehen allfälliger Ungenauigkeiten in der Abhängigkeit zwischen Türbreite und Standardabweichung lässt sich somit festhalten, dass wenige breite Türen bezüglich der Fahrgastwechselzeit des Kurses vielen schmalen Türen gleicher gesamter Türbreite keineswegs gleichwertig sind.

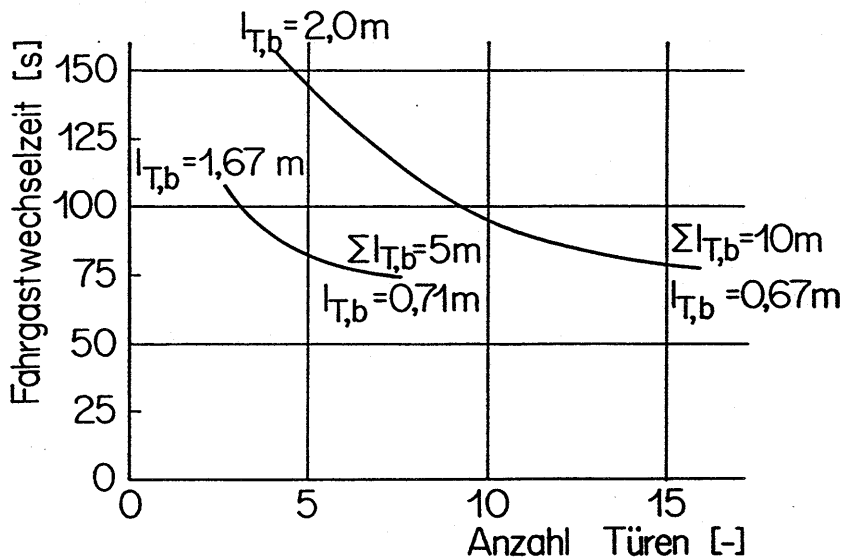


Abb. 6-36: Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse in Funktion von der Türbreite und der Türzahl für eine spezifische Türbelastung von 50 P/m' und eine Höhendifferenz von 0.00 m, bei konstanter gesamter Türbreite von 5 und 10 m.

6.53.12 Einstiegshöhe und Ergonomie

Zur Frage der Einstiegshöhe und der Ergonomie wird auf den Abschnitt über die Perronhöhe verwiesen.

6.53.13 Türverteilung

Eine grosse Bedeutung für die Fahrgastwechselzeit eines Kurses kommt der Ungleichförmigkeit der Türbelastung zu. Da die Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron und im Fahrzeug von vielfältigen Faktoren abhängig ist und nicht bis ins letzte gesteuert werden kann, ist es unmöglich, durch die Gestaltung der Anlagen und der Fahrzeuge die Ungleichförmigkeit der Türbenützung vollständig zum Verschwinden zu bringen. Durch eine gleichmässige Abstimmung von Türleistungsfähigkeit und Einzugsgebiet lässt sich aber die Fahrgastwechselzeit des Kurses immerhin günstig beeinflussen. Zu vermeiden sind Ungleichförmigkeiten des Türsystems von über 140 %, denn bereits bei diesem Wert erhöht sich die Fahrgastwechselzeit eines Kurses um rund 10 %.

6.53.2 Fahrgastwechselzeiten verschiedener Türkonzepte

6.53.21 Vorbemerkung und Annahmen

Um den Einfluss der Türzahl und der Türbreite zu verdeutlichen und um Hinweise für den praktischen Betrieb zu geben, wurden ausgewählte Vollbahnzüge, Stadt- und Strassenbahnwagen sowie Autobusse auf ihre Fahrgastwechseleigenschaften hin untersucht. Die Vielfalt der im Betrieb stehenden Fahrzeuge macht eine gewisse Willkür unvermeidlich, die getroffene Auswahl soll aber zumindest die Spannweite realisierter Lösungen abdecken.

Die Fahrgastwechselzeiten der Kurse werden für Fahrgastwechselquoten von 50 % und 100 % des Fassungsvermögens errechnet, wobei bei den Vollbahnfahrzeugen lediglich Sitzplätze, bei den Stadtbahnwagen und Autobussen dagegen eine theoretische Stehplatzbelegung von 6 P/m² berücksichtigt wurde. Die Zwischenwerte werden interpoliert. Es wird ein Einsteiger-Aussteiger-Verhältnis von je 50 % angenommen. Diese Vereinfachungen sind zulässig, da weniger die Absolutwerte, als vielmehr die Unterschiede zwischen den Fahrzeugtypen interessieren.

6.53.22 Türzahl und -anordnung bei Vollbahnzügen

Um die Vergleichbarkeit der Vollbahnzüge sicherzustellen wurde ein Fassungsvermögen der Komposition von rund 600 Personen festgesetzt. Unabhängig von der Praxis wurden nur Wagen 2. Klasse eingereicht. Ebenfalls unbesehen von den realen Verhältnissen wurde die Perronhöhe bei jedem Fahrzeug zu 550 mm angenommen.

Tab. 6-17: Ausgewählte Vollbahnfahrzeuge und Anzahl der Fahrzeuge für ein Fassungsvermögen von etwa 600 Personen.

Fahrzeugtyp	Nr.	Abb.	Türzahl	Plätze/ Wagen	Anzahl Wagen	Plätze/ Kurs	Kurs- länge
Miteileinstiegswagen SBB, 1953	1	3-48	1	80	8	640	181.6
Einheitswagen IV SBB, 1983	2	5-2	2	86	7	602	184.8
Nahverkehrswagen DB, Bnp 719	3	6-37	2	78	8	624	211.2
S-Bahn-Wagen DB, Bx 794	4	6-38	3	80	8	640	212.0
S-Bahn-Triebzug BR 420	5	3-53	4	65	9	582	202.2
Abteilwagen C4 Sa 13	6	6-39	9	74	8	592	147.0
Doppelstock-Standardwagen DR	7	3-57	2	110	6	660	160.8
Doppelstockwagen SBB	8	5-4	2	136	5	680	134.0
Doppelstockwagen DByg 546	9	6-40	3	96	6	576	134.4

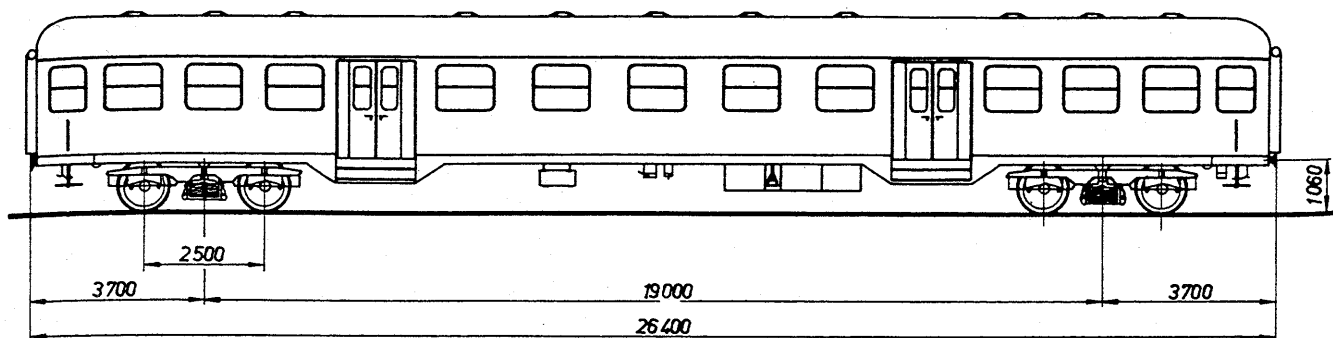


Abb. 6-37: Nahverkehrswagen 2. Klasse der DB, Bauart Bnb 719 (Abbildung: Wagner/Wagner/Deppmeyer, Eisenbahn-Fahrzeug-Archiv).

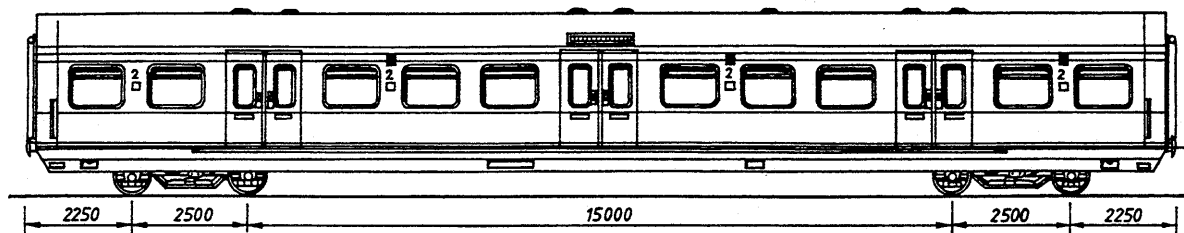


Abb. 6-38: S-Bahn-Wagen 2. Klasse der DB, Bauart Bx 794 (Abbildung: Wagner/Wagner/Deppmeyer, Eisenbahn-Fahrzeug-Archiv).

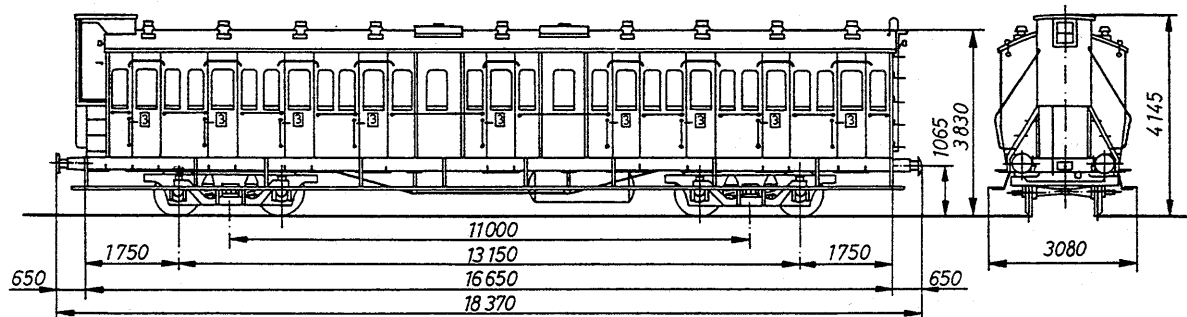


Abb. 6-39: Vierachsiger Sitzwagen 3. Klasse der Königlich Sächsischen Staatseisenbahnen, Baujahr 1914, Gattung C4 Sa 13 (Abbildung: Wagner/Wagner/Deppmeyer, Eisenbahn-Fahrzeug-Archiv).

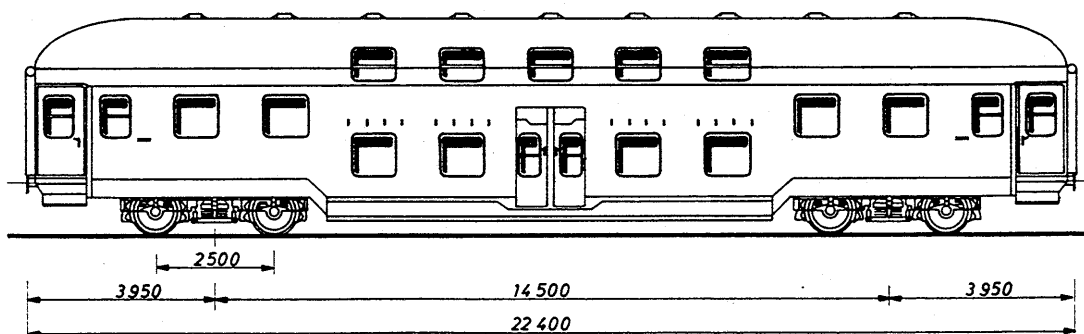


Abb. 6-40: Vierachsiger Doppelstockszitzwagen 2./3. Klasse der DB, Bauart DByg 547 (Abbildung: Wagner/Wagner/Deppmeyer, Eisenbahn-Fahrzeug-Archiv).

Die Berechnung der Fahrgastwechselzeiten mit dem Programm ACoST.NeXT ergab die auf der folgenden Abbildung dargestellten Werte:

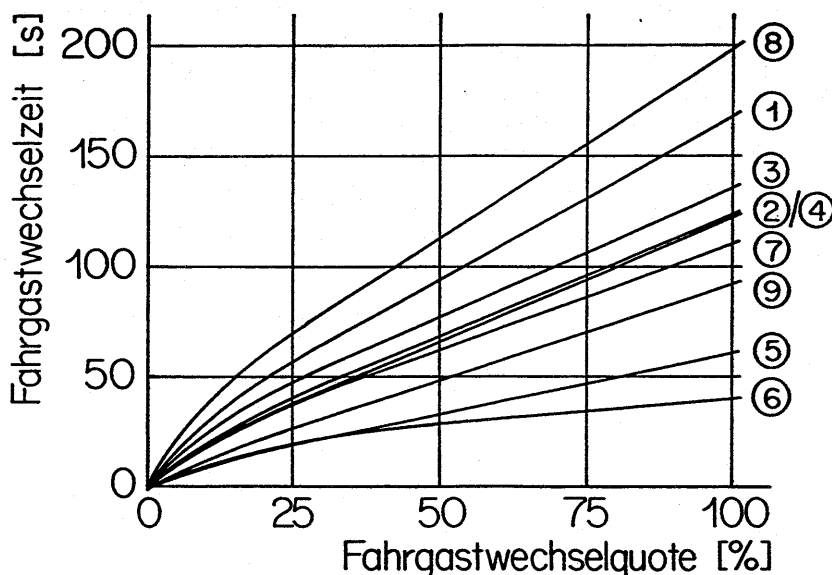


Abb. 6-41: Fahrgastwechselzeiten der ausgewählten Züge mit je etwa 600 Fahrgästen, dargestellt in Funktion der Fahrgastwechselquote, bezogen auf die Zahl der Sitzplätze.

Die Zugkompositionen zeigen die bereits theoretisch postulierte starke Abhängigkeit der Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse von den Streuungen der Leistungsfähigkeit der einzelnen Türen. Generell schneiden daher die Fahrzeuge mit breiten Türen schlecht ab. Einschränkend ist festzuhalten, dass die aufgrund nur weniger Messungen bestimmte Abhängigkeit der Standardabweichung von der Türbreite möglicherweise für breite Türen zu ungünstig ist. Diesbezüglich ist eine genauere Bestimmung notwendig. Unberührt von dieser Relativierung bleibt die Feststellung, dass die Haltezeit durch eine günstige Türkonzeption in einer grossen Bandbreite beeinflusst werden kann.

6.53.23 Türzahl und -anordnung bei Stadtbahnfahrzeugen

In gleicher Weise wie die Vollbahnzüge wurden die Fahrgastwechselzeiten einiger typischer Vertreter von Strassen- und Stadtbahnfahrzeugen berechnet. Dabei handelt es sich um zwei Hochflur-, ein Mittelflur- und drei Niederflurfahrzeuge. Als Perronhöhe wurde generell 0.15 m eingesetzt.

Tab. 6-18: Ausgewählte Strassen- und Stadtbahnfahrzeuge.

Fahrzeugtyp	Nr.	Abb.	Türzahl	Plätze/ Wagen	Anzahl Wagen	Plätze/ Kurs	Kurs- länge
Tatra T4D + T4D + B4D	11	3-74	3	119	3	356	45.3
Tram VBZ, Serie 2001 ff.	12	6-42	4	157	2	314	42.8
Mittelflurtram TPG, Typ Be 4/6	13	4-22	4	170	2	340	43.8
Niederflurtram SVB, Typ Be 4/8	14	3-83	6	1	260	31.0	
Niederflurtram Kassel	15	3-84	5	230	1	230	28.8
Niederflurtram Bremen	16	6-43	4	222	1	222	26.5

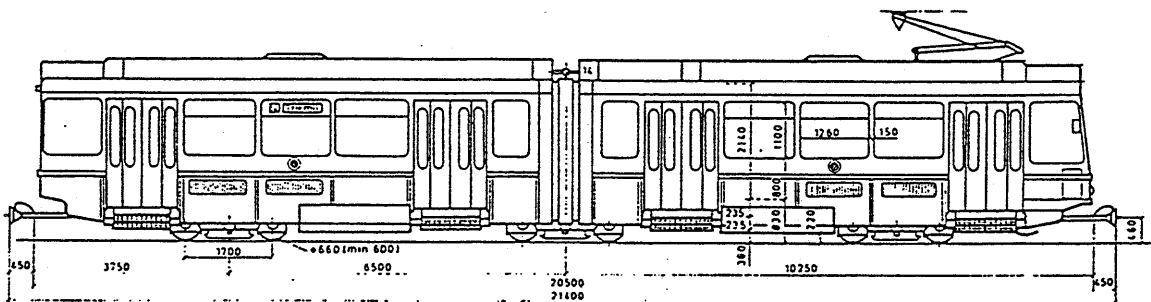


Abb. 6-42: Strassenbahn-Triebwagen Typ Be 4/6 2001 ff. der VBZ Zürich (Abbildung: VBZ).



Abb. 6-43: Niederflur-Strassenbahn Typ Bremen (Abbildung: MAN).

Das Resultat der Berechnung ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

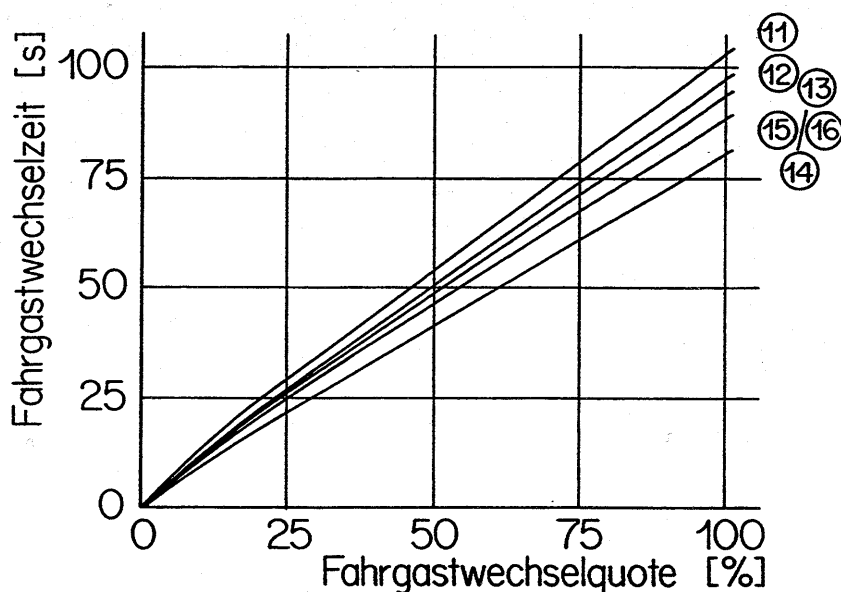


Abb. 6-44: Fahrgastwechselzeiten der ausgewählten Strassen- und Stadtbahnfahrzeuge, dargestellt in Funktion der Fahrgastwechselquote, bezogen auf die Zahl der Sitz- und Stehplätze.

Generell sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrzeugen kleiner als bei den Vollbahnzügen und auch als bei den im nächsten Abschnitt betrachteten Autobussen. Relativ ungünstige Fahrgastwechselzeiten zeigen immerhin die konventionellen Kompositionen. Der Grund für das mässige Abschneiden der Niederflurfahrzeuge von Kassel und Bremen liegt in ihrer vergleichsweise kleinen Türzahl und der ungleichmässigen Türverteilung. Immerhin beträgt die Fahrgastwechselzeit eines Tatra-Zuges des Typs T4D gegen 30 % mehr als jene des Niederflurtrams Be 4/8 der SVB als Niederflurfahrzeug mit den günstigsten Werten.

6.53.24 Türzahl und -anordnung bei Autobussen

Als drittes Fallbeispiel wurde eine Anzahl unterschiedlicher Autobusse unter Berücksichtigung von Hoch- und Niederflurfahrzeugen sowie von Standard- und Gelenkbussen ausgewählt:

Tab. 6-19: Ausgewählte Autobusse.

Fahrzeugtyp	Nr.	Abb.	Türzahl	Plätze/ Wagen	Anzahl Wagen	Plätze/ Kurs	Kurs- länge
Stadtlinienbus I	21	3-87	2	95	1	95	11.0
Autobus Saurer SH 560-25	22	3-88	3	98	1	98	11.5
Gelenkbus Mercedes O 405 G	23	3-91	3	134	1	134	17.4
Niederflurbus NEOPLAN, 2 T.	24	3-93	2	95	1	95	12.0
Niederflurbus NEOPLAN, 3 T.	25	3-94	3	98	1	98	12.0
Niederflurgelenkbus NEOPLAN	26	3-95	3	134	1	134	17.6
Niederflur-Gelenktrolleybus BVB	27	3-96	4	151	1	151	17.8

Die Berechnung ergab folgende Fahrgastwechselzeiten:

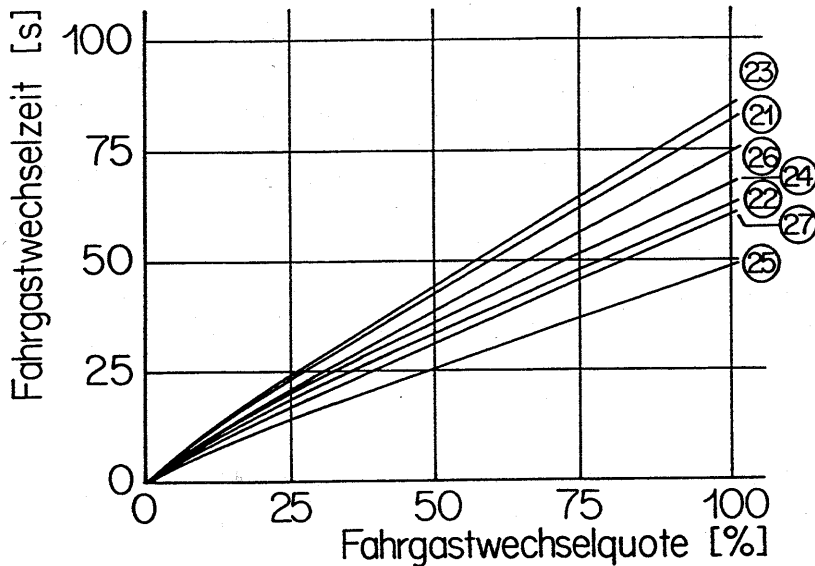


Abb. 6-45: Fahrgastwechselzeiten der ausgewählten Autobusse, dargestellt in Funktion der Fahrgastwechselquote, bezogen auf die Zahl der Sitz- und Stehplätze.

Eindeutig nachweisen lässt sich der Vorteil der dritten Türe bei Standardbussen, indem die Fahrgastwechselzeit eines zweitürigen Autobusses um rund ein Viertel über jener eines vergleichbaren dreitürigen Fahrzeuges liegt. Sogar um rund 70 % übertrifft die Fahrgastwechselzeit des zweitürigen Standardbusses jene eines dreitürigen Niederflurbusses, was ein beträchtliches Rationalisierungspotential erkennen lässt. Ähnliches gilt, wenn auch weniger ausgeprägt, für den Vergleich zwischen dem dreitürigen Hochflurgelenkbus und dem viertürigen Gelenktrolleybus der BVB mit einem Mehrbedarf des ersteren von rund 40 %.

6.53.3 Innenraumgestaltung

6.53.31 Gangbreiten

Der Fahrzeugeinstieg ist ein System aus Durchgängen und Speichern. Nicht in jedem Fall muss die Einstiegsquerschnitt des Fahrzeuges für die Leistungsfähigkeit des Einstiegssystems leistungsbegrenzend wirken, sondern je nach den Gegebenheiten können es die Abflussverhältnisse im Fahrzeug sein. Soll der Ein- und Aussteigevorgang reibungslos vonstatten gehen, so müssen die Türleistungsfähigkeit und die Summe der Abflussmöglichkeiten an jedem einzelnen Einstieg aufeinander abgestimmt sein. Die Verbindungswege im Fahrzeug - seien es nun Gänge oder Treppen in ein anderes Fahrzeuggeschoss - können als Fussgängeranlagen modelliert werden. Deren spezifische Leistungsfähigkeit in Funktion der Fussgängerdichte und -geschwindigkeit kann mithin den Fundamentaldiagrammen gemäss den Abbildung 3-33 und 3-35 entnommen werden.

Auch für die Fahrgastbewegung im Fahrzeug gilt, dass eine hohe Personendichte unangenehm ist und eine höhere Dichte des Fahrgaststromes als LOS F nach Möglichkeit vermieden wird. Daraus leiten sich für Gänge und Treppen im Fahrzeug die folgenden spezifischen Leistungsfähigkeiten ab:

- Fahrzeuggänge $D_F = 1.00 \text{ P/m}^2$ $L_S = 1.06 \text{ P/sm}$
- Treppen im Fahrzeug $D_F = 1.65 \text{ P/m}^2$ $L_S = 0.86 \text{ P/sm}$

Aus diesen Leistungswerten sowie der spezifischen Leistungsfähigkeit von Fahrzeugeinstiegen in Abhängigkeit von der Einstiegshöhe lässt sich nunmehr der erforderliche Gang- und Treppenquerschnitt im Fahrzeug errechnen. Für Fahrzeuge, deren Verbindung zwischen Fahrgastraum und Einstieg ausschliesslich mittels Gängen oder Treppen erfolgt, lässt sich dieser direkt der folgenden Abbildung entnehmen. Bei kombinierten Systemen ist eine detaillierte Berechnung unumgänglich.

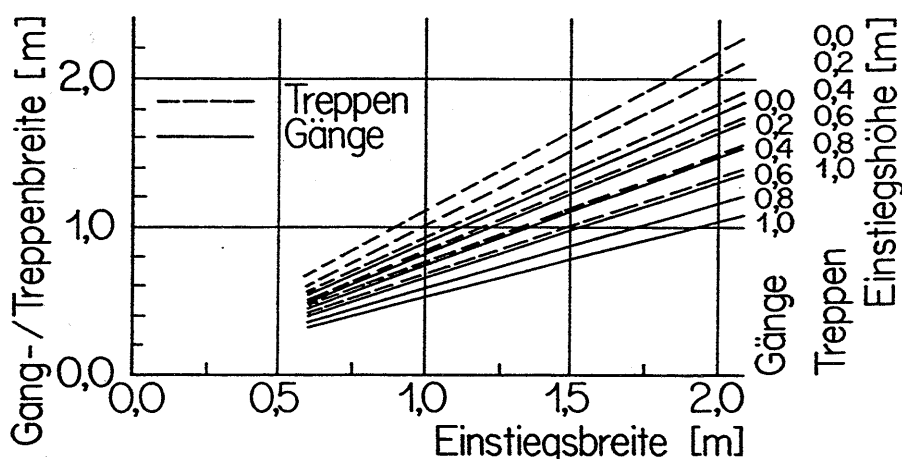


Abb. 6-46: Erforderliche lichte Breiten von Gängen und Treppen in Fahrzeugen in Abhängigkeit von der Einstiegshöhe und der Türbreite.

Die aus Sicht des Fahrgastwechsels wünschbaren Gang- und Treppenquerschnitte, die zur Verfügung stehende lichte Breite des Wagenkastens und die Sitzbreiten können nun einander gegenübergestellt werden. Es zeigt sich, dass für einen optimalen Fahrgastfluss im Fahrzeug bei gleichzeitiger Maximierung der Sitzplatzzahl meist ein beidseitiger Abfluss zum Fahrgastraumraum notwendig ist.

Lässt sich die optimale Gang- oder Treppenbreite aus konstruktiven oder wirtschaftlichen Gründen nicht realisieren, so ist der Türraum im Fahrzeug als Stauraum auszubilden. Dessen Grösse bemisst sich nach folgenden Kriterien:

- **Grösse des Fahrgastwechsels:** Aufgrund des Fassungsvermögens des Fahrzeuges und von Erfahrungen bezüglich der Fahrgastwechselquote ist die maximal zu erwartende Einsteigerzahl zu schätzen.

- *Zulässige Fahrgastdichte:* Da sich der Fahrgastwechsel bei steigender Fahrgastdichte im Fahrzeug verzögert, ist durch eine ausreichende Fläche des Stauraumes der Türe dafür zu sorgen, dass ein bestimmter Wert nicht überschritten wird. Aufgrund von Abschnitt 6.23.24 kann eine Fahrgastdichte von etwa 3 P/m^2 als tolerierbar betrachtet werden.

Die Stauraumfläche ist so gross zu dimensionieren, dass die Fahrgastdichte nach Abschluss des Fahrgastwechsels und unter Berücksichtigung der Abflussmöglichkeiten ins Fahrzeug den genannten Grenzwert nicht übersteigt.

6.53.32 Drängelräume

Die lineare Abhängigkeit zwischen dem nutzbaren Querschnitt und der Leistungsfähigkeit der Türe führt dazu, dass sich die Fahrgastwechselzeit deutlich verlängert, wenn ein Teil des Türquerschnittes mangels Drängelraumes seitlich der Türe durch stehende Fahrgäste versperrt wird. Verengt sich ein Durchgang von 1.30 m baulicher Breite um 0.20 m auf 1.10 m lichter Breite, so steigt die Fahrgastwechselzeit und rund 18 % an. Dieser Nachteil kommt gerade dann zum Tragen, wenn sich die Haltestellenaufenthalte infolge grossen Fahrgastandranges ohnehin verlängern.

6.54 Betrieb

6.54.1 Ungestörter Betrieb

6.54.11 Einfluss der Einstiegsgestaltung auf die Beförderungszeit im strassengebundenen Nahverkehr

Im Zusammenhang mit der Einführung von Niederflurfahrzeugen im Linienverkehr stellte sich in jüngster Zeit häufig die Frage nach der Bedeutung dieser Technologie für die Verkürzung der Umlaufzeit der Kurse und damit für die Rationalisierung des Betriebes. Im Sinne einer groben Abschätzung der Grössenordnung wurde der Einfluss einer reduzierten Einstiegshöhe auf die Beförderungszeit von Strassenbahn- und Autobuslinien unterschiedlicher Reisegeschwindigkeit untersucht. Der Abschätzung wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- *Bedeutung des Fahrgastwechsels:* Der Zeitanteil des Fahrgastwechsels an der Beförderungszeit beträgt bei einem konventionellen Fahrzeug mit einer Einstiegshöhe von 0.80 m rund 11 %.
- *Einfluss der Einstiegshöhe:* Die Zahl und Breite der Fahrzeugtüren bleibt für alle betrachteten Einstiegshöhen unverändert. Die Fahrgastwechselzeit verändert sich somit proportional zum Einfluss der Höhendifferenz auf die Fahrgastwechselzeit gemäss Abschnitt 6.23.32.
- *Betrachtete Einstiegshöhen:* Für konventionelle Fahrzeuge wurde eine Einstiegshöhe von 0.80 m eingesetzt. Die Einsparung an Fahrgastwechselzeit wurde für Einstiegshöhen von 0.40 m und 0.00 m berechnet, wobei letzteres eine Grenzwertbetrachtung bedeutet.

Die Abschätzung zeigt, dass der Einfluss des Tiefeinstieges vor allem bei langen und langsamen Linien zum Tragen kommt. Die eingesparte Fahrgastwechselzeit eines Umlaufes erreicht allerdings erst bei einer Linienlänge von über etwa 8 bis 10 km eine Grössenordnung, dass sich die

Möglichkeit zur Einsparung eines Kurses bei gleichem Fahrplan eröffnet. Allerdings handelt es sich bei der Kurszahl auf einer Linie um eine Sprungfunktion, welche vom Verhältnis zwischen der Umlaufzeit und der Kursfolgezeit abhängt und nur ganzzahlige Werte annehmen kann. Unter bestimmten Umständen kann daher schon ein kleiner Beförderungszeitgewinn zu einer Kurseinsparung führen, während in einem anderen Fall auch grössere derartige Zeitgewinne nicht genutzt werden können. Immerhin liegt der mit Niederflurfahrzeugen erzielte Zeitvorteil einer günstigen Einstiegsgestaltung in einer Grössenordnung, welche auch von wirtschaftlichem Interesse sein kann.

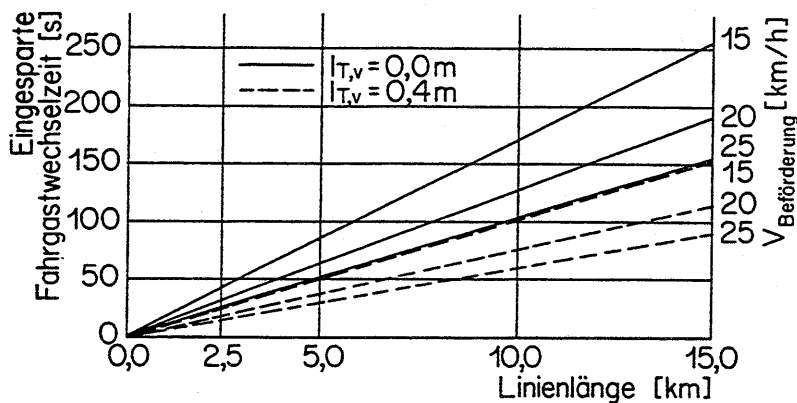
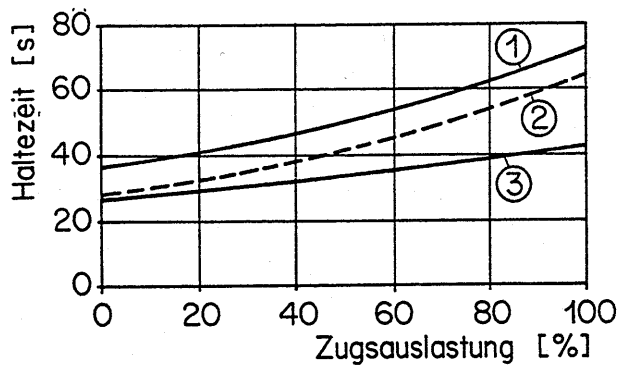


Abb. 6-47: Eingesparte Fahrgastwechselzeiten durch tiefgelegte Fahrzeugeinstiege in Funktion von der Einstiegshöhe, der Reisegeschwindigkeit und der Linienlänge.

6.54.12 Einfluss der Einstiegsgestaltung auf die Beförderungszeit im S-Bahn-Verkehr

Dass die Auswirkungen der Einstiegsgestaltung auf die Fahrgastwechselzeit unter Umständen auch für den S-Bahn-Betrieb wesentlich werden können, lässt sich am Beispiel der Doppelstock-Versuchsfahrten in München zeigen. Die Probefahrten von 1989 wurden nebst der Messung der Fahrgastwechselzeiten zusätzlich genutzt, um das Verspätungsverhalten des Versuchszuges zu beobachten. Durch das ungünstigere Verhältnis zwischen Türleistungsfähigkeit und Fahrgastwechselzahl des Doppelstockzuges wies dieser normalerweise eine um die Hälfte und bei Vollaustlastung sogar eine um zwei Drittel längere Haltezeit auf als die BR 420. Bringt man die rund 8 s Anfahrverzögerung der BR 120 in Abzug, welche durch die Steuerelektronik verursacht wurde, so verblieb im Kernbereich der Münchner S-Bahn mit spanischen Perrons bei Vollaustlastung noch immer eine Haltezeitverlängerung um mindestens die Hälfte.



- ① Haltezeit Doppelstock-Versuchszug
- ② dito ohne Anfahrverzögerung BR 120
- ③ Haltezeit Triebwagenzug BR 420

Abb. 6-48: Haltezeiten an den Stationen Hauptbahnhof, Karlsplatz und Marienplatz in Abhängigkeit von der Auslastung [566].

Auf den Aussenstrecken betrug die Haltezeit des Doppelstockzuges im Mittel 37.9 s, jene der BR 420 im Mittel 23.8 s oder 59 % weniger. Bei Beseitigung der Anfahrverzögerung verblieb beim Doppelstockzug noch eine Haltezeit von 30.0 s oder 26 % mehr als bei der BR 420. Die verlängerten Haltezeiten führten trotz Ausgleichzeiten zur Verspätung nahezu aller Doppelstock-Versuchsfahrten um bis zu 9 Minuten. Der Doppelstock-Versuchszug war selbst bei geringer Auslastung kaum in der Lage, dem Fahrplan der BR 420 zu folgen. Die Beseitigung der Anfahrverzögerung, welche sich zu einem Zeitmehrbedarf von 4 Minuten summierte, hätte die Fahrplaneinhalten bis zu einer maximalen Auslastung von etwa 80 % gestattet, allerdings unter Ausschöpfung der heute vorgesehenen Ausgleichzeiten im Zulauf zur Kernstrecke.

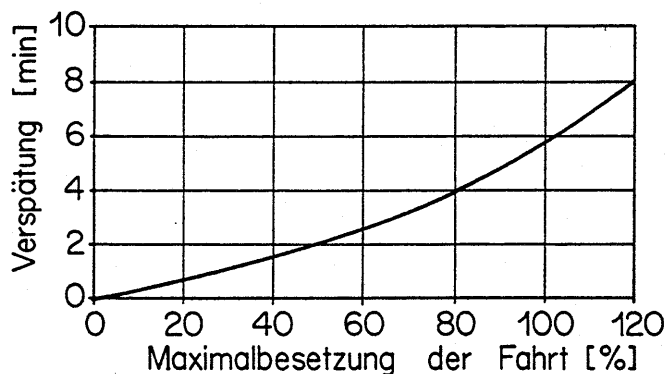


Abb. 6-49: Korrelation der beobachteten maximalen Verspätungen mit der Maximalauslastung anlässlich der Versuchsfahrten zwischen dem 12. und 14. Juni 1989.

6.54.13 Einfluss der Fahrgastwechselzeit auf die Räumzeit hochbelasteter Strecken

Die theoretische Streckenleistungsfähigkeit, gemessen in beförderten Personen pro Zeiteinheit und Richtung, ist gegeben durch den einfachen Quotienten aus Fassungsvermögen pro Zug und minimaler Zugfolgezeit. Diese Beziehung besagt, dass die Streckenkapazität gross ist unter folgenden Voraussetzungen:

- **Hohes Fassungsvermögen des Zuges:** Das maximale Fassungsvermögen eines Zuges errechnet sich mittels des Produktes aus Bahnsteiglänge und Personen pro Zuglänge.
- **Minimale Zugfolgezeit:** Die Zugfolgezeit entspricht etwa der Betriebsbremszeit zum vorlaufenden Zug.

Verlangt wird eine grösstmögliche Perronlänge sowie ein hohes spezifisches Fassungsvermögen des Zuges, unter Berücksichtigung allfälliger Verluste an Nutzlänge durch Lokomotiven, Wagenübergänge und Gepäckabteile. Das erhöhte Fassungsvermögen eines Zuges trägt aber nichts zur Leistungssteigerung der Strecke bei, wenn beim gewählten Fahrzeugkonzept die Zugfolgezeit aus irgendwelchen Gründen im Verhältnis wie das Fassungsvermögen ansteigt. Die Leistungsfähigkeit einer Strecke ist in vielfältiger Weise von den Eigenschaften des Systems abhängig:

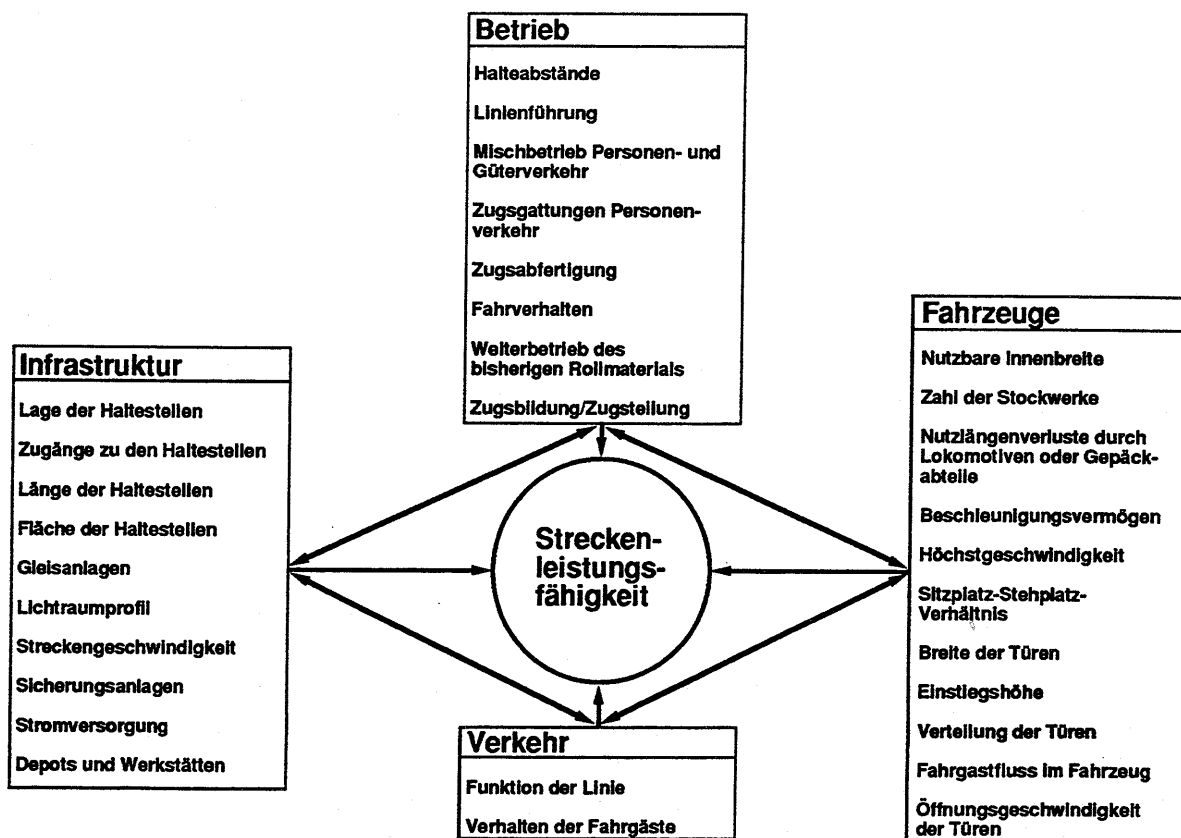


Abb. 6-50: Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit einer Strecke.

Diese Systemeigenschaften bestimmen die minimale Zugfolgezeit auf der Strecke, wobei in der Regel der Haltestellenabschnitt massgebend ist. Die Aufenthaltsdauer eines Zuges setzt sich hier zusammen aus:

- der reinen Fahrzeit für die gegebene Blocklänge und die Auflösedistanz
- den Reaktionszeiten der Sicherungsanlagen
- den Fahrzeitreserven
- den festen Haltezeitanteilen
- dem variablen Haltezeitanteil = Fahrgastwechselzeit

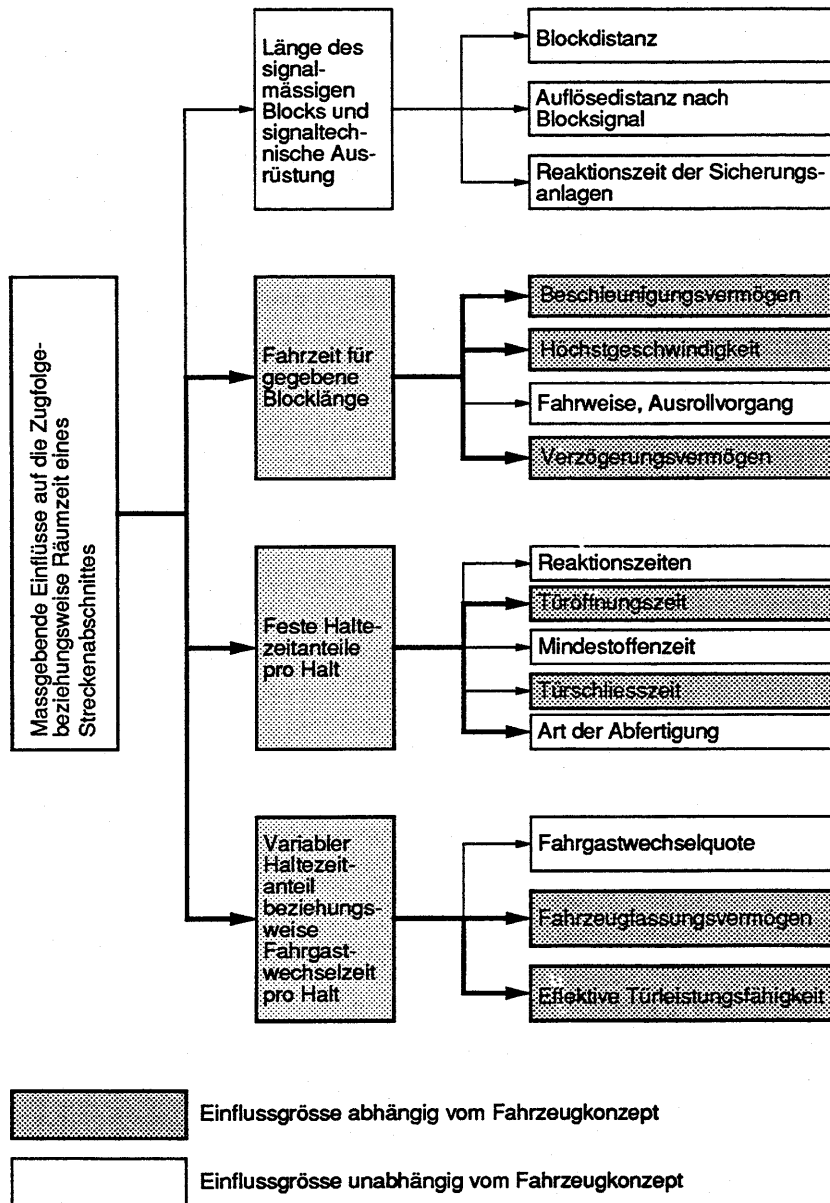


Abb. 6-51: Einflüsse auf die Zugfolgezeit in einem Haltestellenabschnitt.

Der Einflüsse der Fahrgastwechselzeiten auf die Streckenleistungsfähigkeit lässt sich anhand einer Abschätzung am Beispiel der S-Bahn München mittels folgender Zugskonzepte ähnlicher Länge aufzeigen:

- Bestehende BR 420 in Dreifachtraktion (kurz BR 420), neun nutzbare Fahrzeuge mit 36 Türen zu je 1 m.
- Doppelstocktriebwagenzug, bestehend aus neun Fahrzeugen (kurz DTW), neun nutzbare Fahrzeuge mit 18 Türen zu je 1.9 m.

- Personentriebwagen mit zwei Doppelstockwagen in Dreifachtraktion (kurz TW + DW), neun nutzbare Fahrzeuge mit 18 Türen zu je 1.9 m.
- Lokomotive mit drei Doppelstockwagen in Zweifachtraktion (kurz L + DW), sechs nutzbare Fahrzeuge mit 12 Türen zu je 1.9 m.

Als nutzbare Perronlänge werden 210 m angenommen. Bei den drei Doppelstockvarianten werden Wagenbodenhöhen von 1183 mm (wie Doppelstockwagen der NS) und 1030 mm (wie BR 420 der DB) unterschieden. Die reinen Fahrzeiten zwischen den Haltepunkten seien für alle Züge gleich, ebenso die konstanten Haltezeitanteile.

Der Berechnung des spezifischen Fassungsvermögens werden als Referenzfahrzeuge die Doppelstockwagen der NS und die BR 420 der DB mit betrieblich praktikablen Stehplatzauslastungen von 4 P/m^2 in den Türräumen sowie von 2 P/m^2 in den Gängen und Nebenräumen zugrundegelegt:

- Eingeschossige Fahrzeuge: $6.7 \text{ P/m}_{\text{Zug}} = 100 \%$
- Zweigeschossige Fahrzeuge: $9.2 \text{ P/m}_{\text{Zug}} = 137 \%$

Das Fassungsvermögen der vier Zugstypen beträgt demnach:

- BR 420 1359 P = 100 %
- DTW 1932 P = 142 %
- TW + DW 1754 P = 129 %
- L + DW 1479 P = 109 %

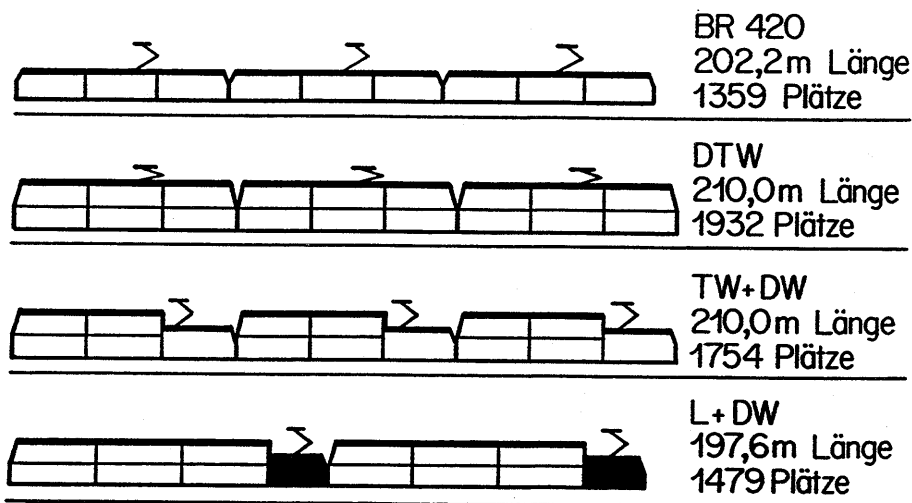


Abb. 6-52: Untersuchte Zugkompositionen im Fallbeispiel der Kapazitätsschätzung der S-Bahn München.

Als Referenzwert wird für die BR 420 der Planungswert der Fahrgastwechselzeit von 20 s eingesetzt. Dieser wird im Verhältnis zu den relativen Türbelastungen für die anderen Fahrzeugkonzepte hochgerechnet. Mit der minimalen Zugfolgezeit von 126 s und der Bedingung, dass die Streckenauslastung aus Gründen der Betriebsstabilität unter 90 % bleiben soll, können schliesslich die Zugszahlen und die Streckenkapazität ermittelt werden:

Tab. 6-20: Zugfolgezeiten, Zugszahlen und Streckenkapazität der S-Bahn München anhand einiger beispielhafter Zugkompositionen.

Zugstyp	Zugfolgezeit [s]		Zugszahlen [-]		Streckenkapazität [P/h]	
	Hoch-einstieg	Tief-einstieg	Hoch-einstieg	Tief-einstieg	Hoch-einstieg	Tief-einstieg
BR 420	-	126	-	25.7	-	34'926
DTW	151	140	21.5	23.1	41'538	44'629
TW+DW	151	140	21.5	23.1	37'711	40'517
L+DW	157	145	20.6	22.3	30'467	32'982

Die rechnerischen zusätzlichen Haltezeiten stimmen gut mit dem experimentellen Befund anlässlich der Messfahrten des IVT überein. Unter Ausschöpfung sämtlicher Möglichkeiten - DTW mit tiefem Wagenboden - kann maximal eine Leistungssteigerung um etwa 28 % erwartet werden. Bei Berücksichtigung der grösseren fixen Haltezeitanteile infolge grösserer Türen und der traktions-technischen Nachteile ist dagegen eine Leistungssteigerung um rund 15 % realistisch. Das um etwa 37 % höhere Fassungsvermögen der Doppelstockwagen kann somit infolge der längeren Fahrgastwechselzeiten nur teilweise in eine höhere Streckenkapazität umgesetzt werden.

6.54.14 Einfluss der Fahrgastwechselzeit bei Knotenpunktsystemen

Im Abschnitt 2.12.24 wurde darauf hingewiesen, dass der Grösse der Haltezeit und namentlich der Fahrgastwechselzeit bei jenen Vollbahnsystemen eine besondere Bedeutung zukommt, welche nach dem Knotenpunktprinzip betrieben werden. Die gesamte Betriebsplanung wird hier durch die Kantenzeiten bestimmt, welche einen definierten Wert, in der Regel 60 oder 30 Minuten, nicht überschreiten dürfen und die sich aus den Fahr- und Haltezeiten zusammensetzen.

Stellvertretend für diese Form der Angebots- und Betriebskonzepte steht das Projekt Bahn 2000 der SBB. Darin beabsichtigen die SBB den Einsatz von Doppelstockwagen in Intercity-Zügen. In die Evaluation wurden auch Fahrzeuge mit nur einem Einstieg einbezogen. Das Knotenpunkt-konzept verlangt, dass die Doppelstockzüge trotz grösserer Fahrgastzahl pro Wagen keine längeren Fahrgastwechselzeiten aufweisen dürfen, als die bestehenden Intercity-Züge des Typs Einheitswagen IV. Der von SWP projektierte Doppelstockwagen gemäss Variante 15 sieht eine Länge über Puffer von 26'800 mm, Aussentüren mit einer lichten Breite von 1400 mm und eine Wagenbodenhöhe im Einstiegsbereich von 500 mm über SOK vor.

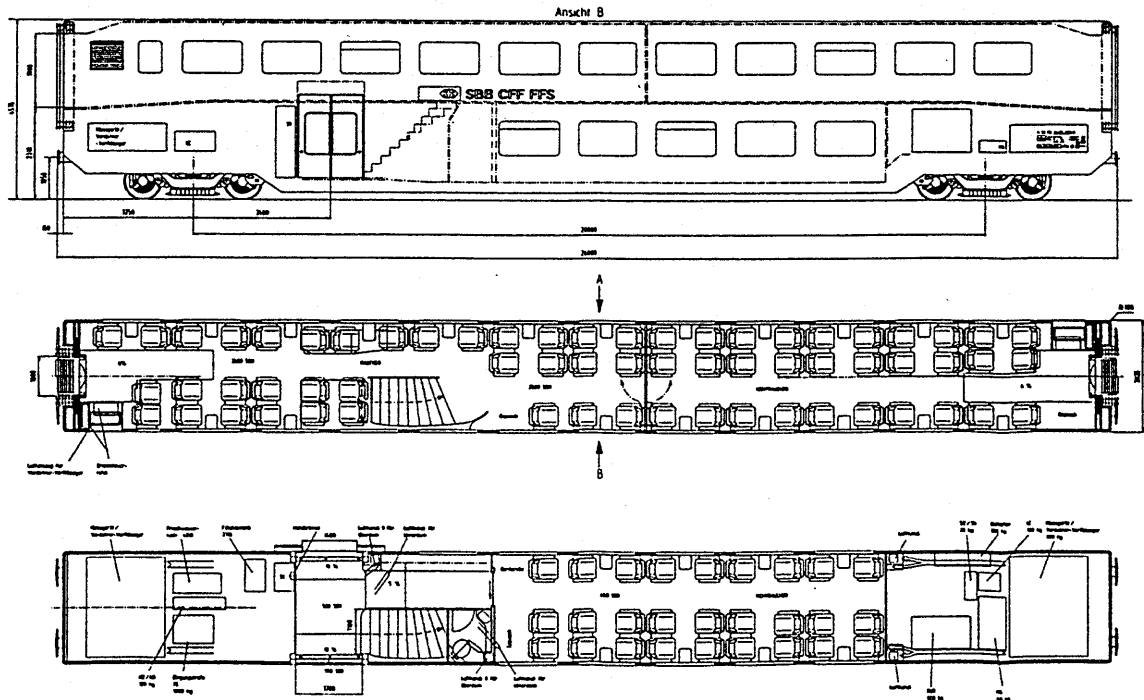


Abb. 6-53: Typenskizze des Doppelstockwagens SWP 1. Klasse, Untervariante 15-M [442].

Die in einem entsprechenden Vergleich einander gegenübergestellten Züge leiten sich aus der Zielsetzung des Einsatzes von Doppelstockwagen ab, welche einen Kapazitätsgewinn verlangen. Es werden daher nicht Züge gleichen Fassungsvermögens, sondern Züge identischer Zuglänge betrachtet. In einer ersten Phase ab 1997 steht nicht die endgültige Zahl von Wagen zur Verfügung, sodass nur verkürzte Züge gebildet werden können. In einer zweiten Phase werden diese verlängert und als Extremalannahme kann davon ausgegangen werden, dass dannzumal die gesamte Perronlänge ausgeschöpft wird. Aus diesem Überlegungen ergeben sich folgende Zugskompositionen:

- Phase 1

DOSTO	Re 460 + 1AD + 1A + 4B + Bt	[P1DS]
EW IV	Re 460 + 1D + 2A + 5B	[P1EW4]

- Phase 2

DOSTO	Re 460 + 1AD + 5A + 8B + Bt	[P2DS]
EW IV	Re 460 + 1D + 5A + 9B	[P2EW4]

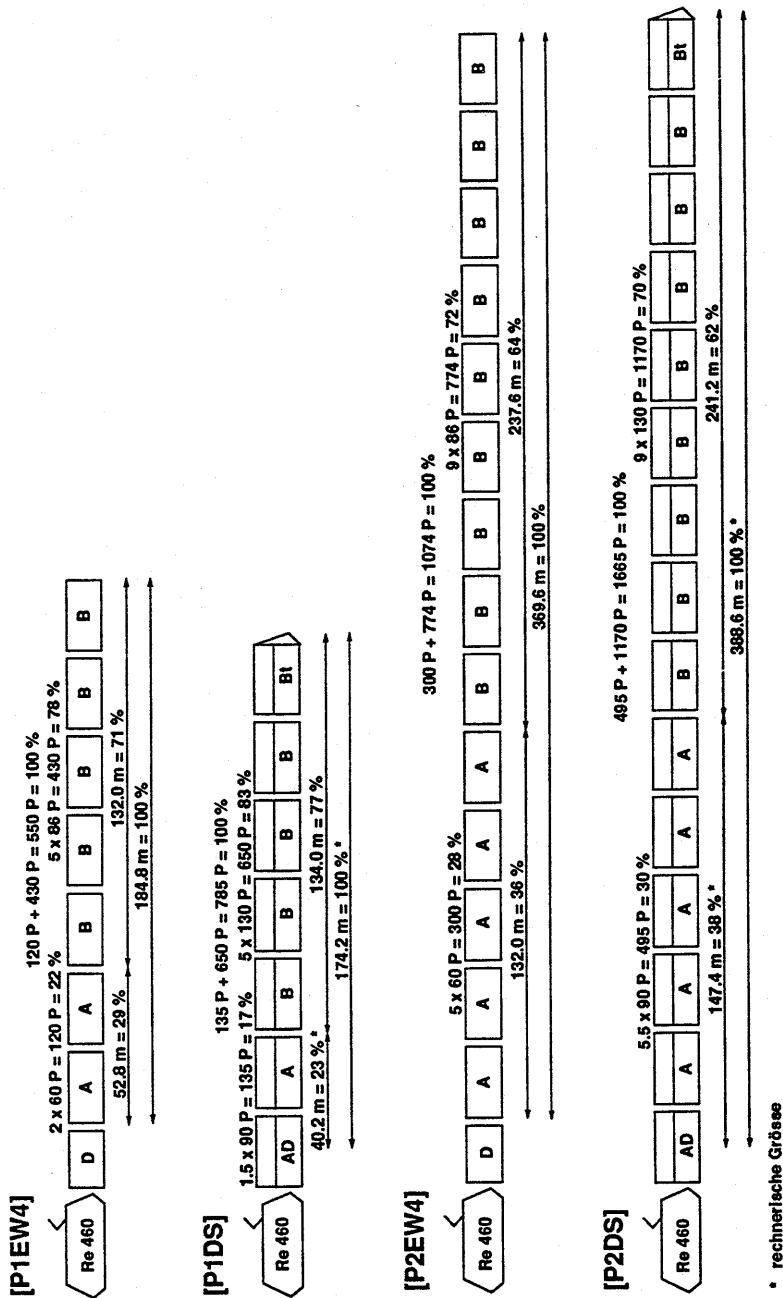


Abb. 6-54: Zugkompositionen im Variantenvergleich mit den wichtigsten Kenngrössen.

Bezüglich der Fahrgastwechselzahlen werden zwei typische Situationen mit folgenden Fahrgastwechselquoten betrachtet:

1. *Fahrgastwechselquote 100 % des Fassungsvermögens: Mittlere Bahnhöfe im Spitzenverkehr oder grosse Bahnhöfe im Hauptverkehr*
2. *Fahrgastwechselquote 150 % des Fassungsvermögens: Grosse Bahnhöfe im Spitzenverkehr*

Die Fahrgäste werden als gleichverteilt im Verhältnis des Fassungsvermögens der Wagen in 1. und 2. Klasse angenommen, wobei die Länge des Bereiches auf dem Perron, wo Fahrgäste auf den Zug warten, mit der Zuglänge übereinstimmen soll. Dies führt zu folgenden Parameterkombinationen:

1. Kurze beziehungsweise lange Zugkompositionen für die Ausbauphasen 1 und 2 (Varianten [P1EW4] / [P1DS] beziehungsweise [P2EW4] / [P2DS]).
2. Fahrgastwechselquoten von 100 % beziehungsweise 150 %.
3. Perronhöhen von 300 mm beziehungsweise 550 mm (P30/P55).

Die Berechnung ergibt, dass sich die Fahrgastwechselzeiten der Intercity-Züge des Typs EW IV von den kurzen Doppelstockzügen nicht einhalten lassen. Letztere benötigen selbst unter optimalen Voraussetzungen etwa 15 % mehr Zeit für den Fahrgastwechsel. Unter realistischen Verhältnissen muss mit etwa 35 % Zeitmehrbedarf gerechnet werden. Bei einer Fahrgastwechselquote von 100 % bedeutet dies einen absoluten Zeitmehrbedarf von etwa 17 bis 41 s. Steigt der Fahrgastwechsel auf eine Quote von 150 %, so wächst der Zeitmehrbedarf der Doppelstockzüge auf 24 bis 58 s. In der Phase 2 mit ihren längeren Zügen stellt man im optimalen Fall und bei einer Fahrgastwechselquote von 100 % eine um 24 bis 62 %, bei einer Fahrgastwechselquote von 150 % eine um 26 bis 62 % höhere Fahrgastwechselzeit fest. Die guten Wirkungsgrade der EW IV-Züge und die schlechten der Doppelstockzüge sind Ausdruck der starken Abhängigkeit der Fahrgastwechselzeit eines ganzen Zuges von den Streuungen an den einzelnen Türen.

Zusätzlich wurde geprüft, ob das formulierte Ziel durch Einfügen einer zweiten Türe erreicht werden kann. Gemäss den entsprechenden Berechnungen sind die kurzen Doppelstockzüge mit zwei Einstiegen pro Fahrzeug immer, die langen Doppelstockzüge meist in der Lage, die Fahrgastwechselzeiten der Züge aus EW IV zu unterbieten. Der Minderbedarf der kurzen Züge kann mit etwa einer halben Minute angegeben werden. Etwas verlängerte Fahrgastwechselzeiten können bei langen Doppelstockzügen an Perrons P55 auftreten, wobei der Zeitmehrbedarf auf maximal eine Viertelminute zu schätzen ist.

Der mit der zweiten Fahrzeugtüre einhergehende Sitzplatzverlust veranlasste die SWG aber zu einem Vorschlag mit einer einzigen dreispurigen Türe von 1.90 m lichter Breite und zwei Treppen ins Obergeschoss. Durch die breitere Türe und die zweite Treppe ins Obergeschoss gehen gegenüber der Variante 15 zwar Sitzplätze verloren, das Fassungsvermögen liegt mit 88 Plätzen in erster und 125 Plätzen in zweiter Klasse aber immer noch über jenem der zweitürigen Ausführung. Die Fahrgastwechselzeiten der Doppelstockzüge dieser Variante 6A bewegen sich um den Zielwert des EW IV. Unter günstigen Voraussetzungen werden die Fahrgastwechselzeiten des EW IV um bis zu rund 35 s unterschritten, es muss auch mit Überschreitungen um bis zu 40 s oder 25 % gerechnet werden.

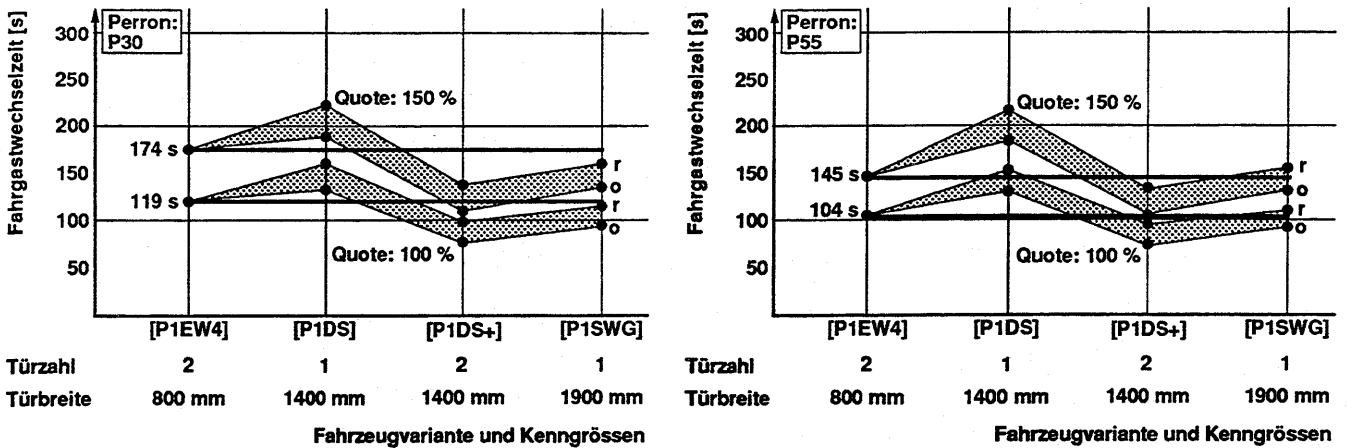


Abb. 6-55: Fahrgastwechselzeiten in der Ausbauphase 1. Links Perronhöhe 300 mm, rechts Perronhöhe 550 mm. Vergleich der Fahrzeugtypen Einheitswagen IV [P1EW4], Doppelstockwagen 15M eintürig [P1DS], Doppelstockwagen 15M zweitürig [P1DS+] und Doppelstockwagen 6A eintürig [P1SWG]. o = optimale Verhältnisse, r = realistische Verhältnisse.

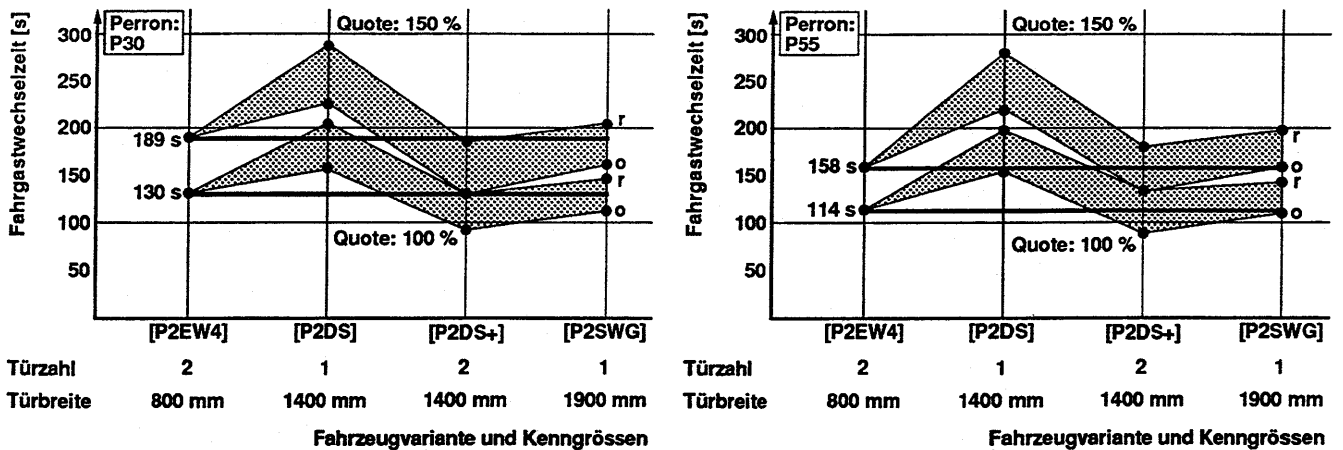


Abb. 6-56: Fahrgastwechselzeiten in der Ausbauphase 2. Links Perronhöhe 300 mm, rechts Perronhöhe 550 mm. Vergleich der Fahrzeugtypen Einheitswagen IV [P1EW4], Doppelstockwagen 15M eintürig [P1DS], Doppelstockwagen 15M zweitürig [P1DS+] und Doppelstockwagen 6A eintürig [P1SWG]. o = optimale Verhältnisse, r = realistische Verhältnisse.

6.54.2 Gestörter Betrieb

6.54.21 Verfeinerung des Modells der Störungsaufschaukelung

In der Beziehung für die Störungsaufschaukelung gemäss Abschnitt 3.34.22 wurde der Kursfolgezeit die Fahrgastwechselzeit gegenübergestellt. Die Verlängerung der Fahrgastwechselzeit wurde als proportional zur Fahrplanlage des Kurses - Verspätung oder Verfrühung - angenommen. Dies ist indessen unpräzise, da die Annahme einer linearen Abhängigkeit zwischen Fahrgastwechselzeit und Fahrgastwechselzahl in zweierlei Hinsicht stark vereinfachend ist:

1. **Einfluss der Fahrgastwechselzahl:** Die Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses an einer Haltestelle ist nicht nur eine Funktion der theoretischen Türleistungsfähigkeit und allfälliger Ungleichmässigkeiten in der Türverteilung, sondern in grossem Ausmass auch der Fahrgastwechselzahl. Vernachlässigt man dies, so ergibt die Aufschaukelungsformel zu ungünstige Werte. Effektiv verkürzen sich die spezifischen Fahrgastwechselzeiten des verspäteten Kurses mit wachsender Verspätung und im Gegenzug verlängern sie sich beim Folgekurs infolge sinkender Fahrgastwechselzahl. Die Paketbildung erfolgt nach dieser Überlegung später, als dies aufgrund des linearen Ansatzes zu erwarten wäre.

2. **Rückstauerscheinungen:** Bei der Verspätungsaufschaukelung nimmt der Besetzungsgrad des verspäteten Fahrzeuges von Haltestelle zu Haltestelle zu. Schon zu Beginn der Aufschaukelung überschreitet er den üblichen Besetzungsgrad. Damit verändert sich infolge der höheren Stehplatzbelegung im Stauraum des Fahrzeuges die spezifische Fahrgastwechselzeit. Die höhere Zahl von Fahrgästen, welche das Fahrzeug besteigen oder verlassen, brauchen somit zusätzlich pro Person mehr Zeit und der Vorgang wird überproportional verlängert. Die zunehmende Überlastung des verspäteten Kurses führt dazu, dass sich dessen Fahrgastwechselzeiten infolge des erhöhten Stehplatzbelegungsgrades fortwährend verlängern. Die Zusatzverspätung liegt nach dieser Überlegung über dem Wert gemäss linearer Aufschaukelungsformel.

Der erstere Mangel lässt sich geschlossen beheben, wenn die Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses in Funktion der Fahrgastwechselzahl sowie die Fahrgastwechselzahl im fahrplanmässigen Fall bekannt sind. Die Aufschaukelungsformeln, insbesondere (3-38) beziehungsweise (3-42), lassen sich dann entsprechend erweitern.

Dem zweite Mangel lässt sich nur begegnen, wenn nach jedem Verspätungsschritt die momentane Belegung des Fahrzeuges und der Stauraumbesetzungsgrad neu ermittelt wird. Geschlossen darstellen lässt sich dieser Einfluss dann, wenn die Füllungskurve des Fahrzeuges numerisch bekannt ist und an jeder Haltestelle mit konstantem Fahrgastzufluss gerechnet werden kann. Der Besetzungsgrad des Fahrzeuges lässt sich dann in Funktion der bereits durchfahrenen Haltestellenabschnitte darstellen.

Anzumerken bleibt, dass der Aufwand zur Berechnung und zur Gewinnung der erforderlichen Ausgangsdaten wie bei jedem Modell mit dem Detaillierungsgrad sehr stark ansteigt. Da die beiden hauptsächlichen Mängel der bisherigen Berechnungsmethode in entgegengesetzter Weise wirken, kann in erster Näherung davon ausgegangen werden, dass das vereinfachte Verfahren brauchbare Resultate liefert, solange die Eingangsdaten zuverlässig sind.

In Bezug auf das Störungsverhalten verdienen die Kernbereiche eines Netzes besondere Aufmerksamkeit, denn hier überlagern sich verschiedene betrieblich ungünstige Einflüsse. Zunächst treten besonders viele Kurzstreckenfahrten auf, wodurch die Fahrgastwechselzahlen besonders hoch sind. Gleichzeitig ist der Kernbereich jener mit der höchsten Querschnittsbelastung einer Linie. Die kleine mittlere Fahrtweite der Einsteiger im Kernbereich führt zur Überlastung der Auffangräume des Fahrzeuges, obschon das Fahrzeug als ganzes seine Kapazitätsgrenze noch nicht erreicht hat. Ein Kurs verhält sich hier somit bezüglich seiner Störungsempfindlichkeit bei gleicher Gesamtauslastung schlechter als auf einer Aussenstrecke.

6.54.22 Einfluss der Türleistungsfähigkeit auf die Störungsempfindlichkeit

Die Aufschaukelungsbeziehungen (3-38) und (3-42) zeigen, dass ein Kurs umso empfindlicher auf eine Initialstörung reagiert, je grösser der Anteil der Fahrgastwechselzeit an der Beförderungszeit ist. Durch günstige Einstiegsverhältnisse mittels Tiefeinstiegen lässt sich dieser deutlich senken. Gleichzeitig verliert die Störungsaufschaukelung bei grösseren Kursfolgezeiten rasch an Bedeutung. In einem Rechenbeispiel werden nebst verschiedenen Einstiegs Höhen drei verschiedene Kursfolgezeiten untersucht. Der Berechnung wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- **Fahrgastwechselzeit:** Die Fahrgastwechselzeit des konventionellen Fahrzeuges betrage 15 s. Diese Fahrgastwechselzeit vermindere sich in Funktion der Einstiegs Höhe auf 12.1 s bei einer Einstiegs Höhe von 0.40 m und auf 10.2 s bei einer solchen von 0.00 m.
- **Initialstörung:** Die Initialstörung belaufe sich auf 90 s, was etwa der Umlaufzeit einer festgesteuerten Lichtsignalanlage unter Abzug der Grünphase für den öffentlichen Verkehr entspricht und damit einen realistischen Wert darstellt.
- **Kursfolgezeiten:** Als Kursfolgezeiten werden 2, 4 und 6 Minuten betrachtet. Ersteres entspricht einem längeren Gemeinschaftsabschnitt mehrerer Linien, letzteres den Verhältnissen auf einer einzelnen dicht befahrenen Linie.

Auf der Basis dieser Annahmen lassen sich die zusätzlichen Verspätungen des Kurses in Funktion der Haltestellen ermitteln. Das Resultat ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

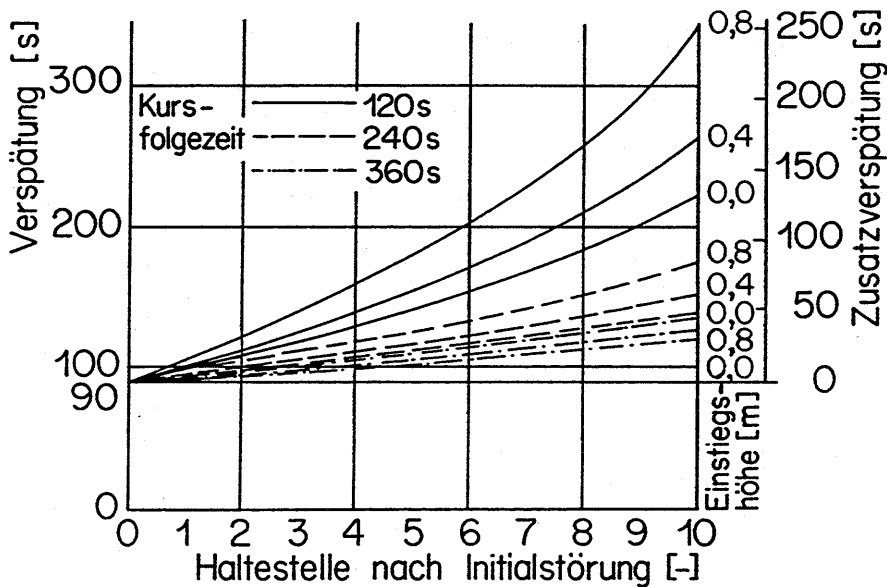


Abb. 6-57: Verspätungsaufschaukelung im Nahverkehr in Funktion der Haltestellenzahl, der Kursfolgezeit und der Einstiegsverhältnisse.

Es zeigt sich, dass günstige Einstiegsverhältnisse vor allem bei dicht befahrenen Strecken zu einer deutlich verbesserten Störungsresistenz führen. Tiefeinstiege verkürzen somit nicht nur die Beförderungszeit wesentlich, sondern sie tragen zusätzlich zur Verstetigung des Betriebsablaufes bei.

7 Kurzfassung

7.1 Problemstellung

7.1.1 Ziele der Forschungsarbeit

Der öffentliche Linienverkehr hat im Verkehrsgeschehen Europas, vor allem in jenem der grossen Agglomerationen, bereits einen hohen Stellenwert, der aufgrund der verkehrspolitischen Zielvorgaben der meisten Länder noch gesteigert werden soll. In den Entwicklungsländern sind zudem Siedlungskonzentrationen von einer Dimension im Entstehen, deren Erschliessung ohne leistungsfähige Massenverkehrsmittel undenkbar ist. Öffentlicher Verkehr mit hoher Leistungsfähigkeit bedeutet Linienbetrieb, der in Bau, Betrieb und Unterhalt aufwendig ist. Entsprechend gross sind die Bestrebungen der Betreiber zur Hebung von dessen Wirtschaftlichkeit. Probleme grundsätzlicher und praktischer Art in der Planung und im Betrieb des öffentlichen Linienbetriebes bereiten nach wie vor der Fahrgastfluss und die Fahrgastwechselzeit. Bei verschiedenen Arbeiten über den Linienbetrieb am Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau der ETH Zürich zeigte sich, dass die Gesetzmässigkeiten des Fahrgastwechsels noch nicht hinreichend bekannt sind. Deshalb wurde dem Fahrgastwechsel die vorliegende Arbeit mit folgenden Zielen gewidmet:

- *Betriebsplanung*: Ist ein Fahrplan aufgrund der bekannten oder zu erwartenden Anzahl der Ein- und Aussteiger sowie für gegebene Fahrzeuge und Anlagen zu konzipieren, so haben mathematische Beziehungen den Zeitbedarf für den Fahrgastwechsel zu liefern.
- *Betriebsführung und Betriebsleittechnik*: Im Projektstadium soll sich die Störungsempfindlichkeit unterschiedlicher Fahrzeuge abschätzen sowie im täglichen Betrieb die Fahrgastwechselzeit in on-line-Prognoserechnungen vorherbestimmen lassen.
- *Fahrzeuggestaltung und Haltestelleninfrastruktur*: Aus den Abhängigkeiten der Fahrgastwechselzeit sollen sich Anforderungen an die Fahrzeug- und Anlagenkonzeption formulieren lassen.

7.1.2 Stand der bisherigen Kenntnisse

7.1.2.1 Rückblick auf die bisherige Forschung

Qualitativ erkannt wurde die Bedeutung des Fahrzeugkonzeptes für die Fahrgastwechselzeit bereits im letzten Jahrhundert. Genauere Berechnungen der Fahrgastwechselzeit wurden aber erst nach dem Zweiten Weltkrieg publiziert. In den Jahren nach 1975 finden sich nur noch spärliche Veröffentlichungen. Insgesamt lassen sich drei Forschungsrichtungen erkennen:

1. *Grösse und Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzeit*: Die Fahrgastwechselzeit wird als reine Zufallsgrösse betrachtet. Diese Untersuchungen dienten der Berechnung von Verkehrsregelungsanlagen.
2. *Abhängigkeit der Einsteigezeit von der Art der kommerziellen Abfertigung*: Wird der Fahrausweis durch einen stationären Schaffner oder durch den Fahrer verkauft, so bestimmt dieser Vorgang meist die Haltezeit. Dabei musste vor allem eine rationelle und betrugssichere Fahrgastabfertigung angestrebt werden.
3. *Abhängigkeit der Fahrgastwechselzeit von den Eigenschaften des Türsystems*: Das Interesse für die Abhängigkeit zwischen der Fahrgastwechselzeit und den Eigen-

schaften des Türsystems wuchs, als neue S- und U-Bahn-Systeme geplant wurden und als man Strassenbahn und Bus auf schaffnerlosen Betrieb umstellte. Die Minimierung der Fahrgastwechselzeit in Abhängigkeit von den Kennwerten des Türsystems wurde zum Ziel.

7.12.2 Wertung der bisherigen Erkenntnisse

Die bisherigen Untersuchungen sind gekennzeichnet von den unterschiedlichen Zielsetzungen. Die Einflussfaktoren sind daher unbefriedigend systematisiert. Praktisch unerforscht geblieben sind die Auswirkungen der Eigenschaften der Fahrgäste und der äusseren Umstände. Der Einfluss des Besetzungsgrades ist noch nicht geschlossen dargestellt worden. Hinweise finden sich zur Bewegungsrichtung und zur gegenseitigen Behinderung. Häufigen Gegenstand von Untersuchungen haben die Breite der Türen und die Einstiegshöhe gebildet. Leider fehlen auch hier allgemeingültige Aussagen. Der Einfluss der ergonomischen Treppengestaltung liegt weitgehend im Dunkeln und die Angaben zur Streuung der Fahrgastwechselzeiten sind wenig konsistent. Aufgrund der Literaturangaben ist es nicht möglich, die Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Türsystems zu bestimmen. Keine Angaben liegen vor zur Vorausberechnung der Fahrgastwechselzeiten einer ganzen Fahrt.

7.13 Eigene Untersuchungen

Literaturstudien mit über 600 erfassten Einzeltiteln galten den beteiligten Systemkomponenten und dem Stand des Wissens auf dem Gebiet des Fahrgastwechsels. Mangels Angaben zu verschiedenen Fragestellungen musste auf verwandte Themenbereiche wie den Fussgängerverkehr ausgewichen werden, um zumindest Anhaltspunkte zu gewinnen. Zur Schliessung der verbliebenen Wissenslücken wurden folgende Methoden eingesetzt:

1. *Messungen an existierenden Fahrzeugen im laufenden Betrieb:* Insgesamt liessen sich 4789 Fahrgastwechsel mit 45'713 beteiligten Fahrgästen bei der S-Bahn München, den Strassenbahnen von Genf und Grenoble sowie bei einer Buslinie in Basel auswerten. Die zur Verfügung stehenden Mittel erlaubten die vollständige Beobachtung nur von Kursen mit bis zu vier Türen.
2. *Messungen an bestehenden Fahrzeugen und Modellen in natürlicher Grösse unter Laborbedingungen:* Für Tests der Fahrgastwechseleigenschaften von geplanten SBB-Intercity-Doppelstockwagen hat die Firma Schindler Waggon Pratteln eine Fahrzeugmaquette in natürlicher Grösse erstellt. Daran und an einem bestehenden Einheitswagen IV der SBB als Vergleichsfahrzeug wurden Fahrgastwechselbeobachtungen unter Laborbedingungen vorgenommen.
3. *Berechnungen an einem Computermodell:* Die Untersuchung der Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses wird durch die Vielfalt möglicher Kombinationen von Türzahl, Türverteilung und Türleistungsfähigkeit stark erschwert. Im Rahmen einer Nebenfach-Semesterarbeit der Abteilung für Informatik der ETH Zürich wurden deshalb zwei Studenten mit der Erarbeitung eines Computerprogrammes zur Bestimmung der Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses unter Verwendung statistischer Methoden beauftragt.

7.2 Die Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre

7.21 Modell

Eine Fahrzeugtüre lässt sich als Engpass betrachten, an welchem sich die Fahrgäste hochgradig ungeordnet bewegen und stochastische Einflüsse dominieren: Die Türbreite ist nicht identisch mit der Breite der Fahrgäste oder einem ganzzahligen Vielfachen und die Breite der Fahrgäste variiert. Die Fahrgäste sind im Warteraum unstrukturiert verteilt und es kann Rückstau auftreten.

Eine Einzeltüre unterliegt Kapazitätsrestriktionen im Zu- und Nachlauf. Ist der Fahrgastzustrom gleich gross wie die Türleistungsfähigkeit, so wird diese genau ausgeschöpft. Übersteigt der Zustrom die Verarbeitungskapazität, so ist die Türe überlastet und es tritt ein Rückstau auf. Solange der Zustrom grösser ist als der Abfluss, wächst die Zahl der vor der Türe wartenden Fahrgäste an. Liegt der Zustrom wieder darunter, so wird die Warteschlange abgebaut. Ist der Zustrom jederzeit kleiner als die Türleistungsfähigkeit, so wird letztere nie ausgenützt.

Wird die Nachlaufkapazität allein durch die Leistungsfähigkeit der Fahrzeuggänge bestimmt, so ist die Kapazitätsbeschränkung konstant. Bei Fahrzeugen mit Funktionsmischung der Stehplatzbereiche als Durchgangs- und Stauräume werden die dem Fahrgastfluss dienenden Flächen mit fortschreitendem Einsteigevorgang von stehenden Fahrgästen beansprucht, sodass die Nachlaufkapazität herabgesetzt wird.

Aufgrund dieser Einflüsse sind die spezifische Türleistungsfähigkeit und die Fahrgastwechselzeit Zufallsvariablen. Die Zufallsvariable der spezifischen Türleistungsfähigkeit kennzeichnet sich durch einen Erwartungswert, eine Standardverteilung, eine Verteilungsfunktion und eine Dichte. Analoges gilt für die aus der spezifischen Türleistungsfähigkeit abgeleiteten Grössen.

7.22 Überblick über die Einflussfaktoren

Die Einflüsse auf die Fahrgastwechselzeit an einer einzelnen Türe lassen sich gliedern in die Eigenschaften der Fahrgäste, die Begleitumstände des Fahrgastwechsels und die Einstiegsgestaltung. Während sich die Eigenschaften der Fahrgäste von Individuum zu Individuum unterscheiden, betreffen die Begleitumstände alle Fahrgäste einer beteiligten Gruppe ähnlich. Die Einstiegsgestaltung schliesslich beeinflusst den Fahrgastwechsel unbesehen der Zusammensetzung der Fahrgastgruppe und der äusseren Bedingungen. Die meisten Einflüsse sind untereinander verknüpft und wirken auch indirekt über mitbestimmte Faktoren auf die Fahrgastwechselzeit ein. Die Streuung der Fahrgastwechselzeit ist eine stochastische Funktion der Unregelmässigkeit des Fahrgastwechselforganges:

1. *Inhomogene Zusammensetzung der Fahrgastgruppen:* Je inhomogener eine Fahrgastgruppe zusammengesetzt ist, desto grösser wird die Streuung.
2. *Dichte des Fahrgaststromes:* Bei kleiner Fahrgastdichte auf dem Perron ist das Zuströmen beziehungsweise die Dichte des Fahrgaststromes besonders stark vom zufälligen Standort der einzelnen wartenden Fahrgäste abhängig. In dieser Situation streut der Zeitbedarf einer bestimmten Zahl von Fahrgästen für das Einsteigen besonders stark.

7.23 Erwartungswert und Streuung

Die Literatur und die eigenen Messungen zeigen eine Abhängigkeit der Türleistungsfähigkeit von der spezifischen Türbelastung, gemessen in Personen pro Meter lichter Türbreite. Sowohl theoretische Überlegungen wie die Messresultate führen auf eine Regressionskurve von logarithmischem Verlauf. Die Form der Kurve ist aufgrund zweier Phänomene eine Funktion der Umstände:

1. Im Nahverkehr warten die Fahrgäste bereits vor dem Anhalteruck in der Nähe der Türe, während sie sich im Fernverkehr oft erst nach dem Anhalteruck zu den Türen begeben. Im Nahverkehr wird daher bereits bei kleiner Türbelastung eine hohe Türleistungsfähigkeit erzielt.
2. Je kleiner die Türabstände sind, desto schneller sind die Fahrgäste beim Durchgang. Bei gleicher spezifischer Türbelastung läuft daher der Fahrgastwechsel bei kleinen Türabständen rascher ab als bei grossen.

Daraus folgt, dass sich ein allgemeingültiges Mass für die Leistungsfähigkeit eines Fahrzeugeinstieges nicht nennen lässt. Als praktischer oberer Grenzwert kann aber die bei einer Türbelastung von 50 P/m' beobachtete spezifische Leistungsfähigkeit von 0.93 P/sm bei ebenen Einstiegen und von 0.69 P/sm bei Treppen gelten.

Die spezifischen Türleistungsfähigkeiten sind praktisch normalverteilt. Deren Standardabweichung liegt im Mittel bei 27.3 % des Erwartungswertes, jene der mittleren Fahrgastwechselzeit bei 28.9 %. Zum Vergleich liegt die Streuung der Fussgängergeschwindigkeiten bei 19.3 %. Für das Verhalten des ganzen Türsystems ist wesentlich, dass die prozentuale Streuung mit der Türbreite anwächst.

7.24 Abhängigkeit von den Einflussfaktoren

7.24.1 Eigenschaften der Fahrgäste

1. *Geschlecht:* Aufgrund ihrer grösseren Körperlänge und Leistungsfähigkeit bewegen sich Männer im Durchschnitt um 10.9 % schneller als Frauen.
2. *Alter:* Ist es bei Kindern unter etwa sieben Jahren vor allem die Körpergrösse, welche eine kleinere Bewegungsgeschwindigkeit verursacht, so sind es mit zunehmendem Alter die schwindenden Körperkräfte.
3. *Belastung durch Gepäck:* Obwohl rund 30 % der Fahrgäste mit mittlerem bis grossem Gepäck unterwegs sind, fanden sich kaum Angaben. Erkennbar ist immerhin, dass sich die Fahrgastwechselzeit bei sehr grossem Gepäckanteil verdreifachen kann.
4. *Körperliche Behinderungen:* Rund 0.5 % der Bevölkerung zählen zu den Rollstuhlfahrern und rund 2.5 % sind Gehbehinderte. Ihre Fahrgastwechselzeit liegt um ein Vielfaches über jener der Nichtbehinderten, ohne dass genauere Angaben möglich wären.

7.24.2 Begleitumstände des Fahrgastwechsels

1. *Verkehrszweck der Fahrgäste:* Gemäss den Erkenntnissen aus dem Fussgängerverkehr bewegen sich die Fahrgäste im Pendlerverkehr um 11 % und im Nutzverkehr um 20 % schneller, im Einkaufsverkehr dagegen um 13 % und im Freizeitverkehr um 18 % langsamer als im Mittel.
2. *Tageszeit:* Im Tagesverlauf verändert sich der Fahrgastmix bezüglich Alter, Geschlecht, Gewandtheit und Reisezweck, von der Tageszeit hängt aber auch die körperliche Leistungsfähigkeit ab. Dadurch bewegen sich die Fahrgäste in der Morgen- und Abendspitze sowie über Mittag deutlich schneller, am Vormittag und insbesondere am Nachmittag aber wesentlich langsamer fort als im Durchschnitt.
3. *Witterung:* Aus dem Fussgängerverkehr lässt sich ableiten, dass bei kaltem Wetter (0°C) mit etwa 10 % kürzeren, bei warmem Wetter (25°C) dagegen mit 10 % verlängerten Fahrgastwechselzeiten zu rechnen ist.
4. *Besetzungsgrad des Fahrzeuges:* Die maximale Leistungsfähigkeit eines ebenen Fussweges wird bei 1.75 P/m^2 erreicht, jene einer Treppe bei 2.23 P/m^2 . Abweichend von den einfachen Fussgängeranlagen ist im Einstiegssystem von Fahrzeugen mit einem hohen Anteil an Fahrgästen zu rechnen, welche nicht am Fahrgastwechsel teilnehmen. Daher ist die Fahrgastdichte im Fahrgastwechselstrom kleiner als jene im Stauraum und der Fahrgastwechsel ist nicht ungestört, sondern wird durch die Stehplatzfahrgäste behindert. Der Stehplatzbelegungsgrad verändert sich während des Fahrgastwechselvorganges laufend und schliesslich befindet sich bei hoher Stehplatzbelegung bereits eine grössere Zahl aussteigewilliger Fahrgäste in Türnähe. Diese Einflüsse führen zu einer Leistungssteigerung bei mittleren und eine Leistungsminderung bei hohen Fahrgastdichten.
5. *Bewegungsrichtung der Fahrgäste am Einstieg:* Das Aussteigen verläuft meist schneller als das Einsteigen. Übliche Treppen sind in Steigungsrichtung um 13 % weniger leistungsfähig als in Gefällrichtung, womit die Abweichung vom Mittelwert $\pm 7\%$ beträgt. $\pm 11\%$ weist die Literatur für ebene Fahrzeugeinstiege aus, während für Fahrzeugtreppen lediglich $\pm 8\%$ genannt werden. Die eigenen Messungen zeigen eine Abweichung vom Mittelwert um $\pm 7\%$.
6. *Gegenseitige Behinderung der Fahrgäste:* Entgegengesetzte Fahrgastströme üben dreierlei Einflüsse auf die Fahrgastwechselzeit einer Gruppe aus, die in unterschiedlicher Richtung wirken: Läuft der Fahrgastwechsel in beiden Richtungen gleichzeitig ab, so behindern sich die Fahrgäste am Einstieg. Wird die Türe dagegen zunächst nur in der einen Richtung begangen, so wird der Fahrgastwechselstrom von den wartenden Fahrgästen der anderen Bewegungsrichtung behelligt. Indem zwei Fahrgastströme auf die Benützung des Durchganges warten, ist hingegen die Wahrscheinlichkeit grösser, dass jede Zeitlücke ausgenützt wird. Auf Fussgängeranlagen verursacht die gegenseitige Behinderung einen Leistungsabfall, der maximal auf 14.5 % ansteigt. Eine Verlängerung der Fahrgastwechselzeit um 14 % nennen die Literaturangaben. Die eigenen Messungen ergeben dagegen nur 2 %. Der Widerspruch erklärt sich dadurch, dass die behindernden Einflüsse bei grossen Fahrgastwechselzahlen zum Tragen kommen, während der beschleunigende letztere Einfluss bei kleinen Fahrgastwechselzahlen wirksam wird.

7.24.3 Charakteristiken des Einstieges

1. *Türbreite:* Es lassen sich keine besonders günstigen Türbreiten finden, insbesondere nicht als Vielfache der Breite einer Fussgänger-Gehspur. Allerdings nimmt die spezifische Türleistungsfähigkeit oberhalb einer Türbreite von etwa 1.50 m leicht ab. Somit besteht eine lineare Abhängigkeit zwischen Türbreite und Türleistungsfähigkeit zumindest bis zu einer Türbreite von 1.50 m. Überbreite Türen dagegen werden im praktischen Betrieb kaum ausgelastet.
2. *Höhendifferenz:* Die Untersuchung des Einflusses der Höhendifferenz zwischen Perron und Fahrzeugboden konnte sich auf 106 Angaben abstützen. Demnach liegt die Fahrgastwechselzeit eines konventionellen Fahrzeugeinstieges mit drei Treppenstufen um rund 40 % über jener eines ebenen Einstieges. Zwischen den ebenen Einstiegen und drei Treppenstufen verläuft die Leistungsabnahme praktisch linear. Darüber ist nicht mehr mit einem weiteren Verlust zu rechnen, da sich der Bewegungsablauf des Menschen bereits bei drei Stufen demjenigen auf einer Treppe angeglichen hat.
3. *Ergonomische Gestaltung:* Aus den verfügbaren Untersuchungen und den eigenen Untersuchungen lässt sich bei ungünstiger Treppengestaltung (unregelmässige Stufenfolge, steile Treppen) ein Zeitmehrbedarf gegenüber dem Mittelwert von etwa 10 % ableiten.
4. *Spaltbreite:* Unter etwa 50 bis 100 mm ist nicht mit einer Verlangsamung des Fahrgastflusses zu rechnen. Überschreitet die Spaltbreite hingegen 200 mm, so verlängert sich die Fahrgastwechselzeit um rund einen Fünftel.

7.3 Die Fahrgastwechselzeit eines Kurses

7.31 Modell

Der Kurs besteht aus einem Einzelfahrzeug oder einer Fahrzeuggruppe und besitzt eine nominelle Türleistungsfähigkeit als Summe der Einzelleistungsfähigkeiten. Die Fahrgastwechselzeit eines Kurses ist indessen das Ergebnis parallel ablaufender Prozesse von zufallsverteilter Dauer, nämlich der stochastischen Fahrgastwechselforgänge an jeder einzelnen Türe. Die statistischen Gesetzmässigkeiten besagen, dass die effektive Türleistungsfähigkeit unter der nominellen liegen muss. Die mittlere Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses sinkt deshalb zwar mit wachsender Türzahl ab, aber nicht im Ausmass, wie dies aufgrund der zunehmenden nominellen Türleistungsfähigkeit zu vermuten wäre. Die Fahrgastwechselzeit eines Kurses lässt sich unter folgenden Voraussetzungen mit Hilfe der Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzeiten an den einzelnen Türen ausdrücken:

- Der Fahrgastwechsel beginnt an jeder Türe gleichzeitig.
- Alle Fahrgäste benutzen immer die nächstliegende Türe.
- Die Fahrgastwechsel an den einzelnen Türen sind stochastisch unabhängig.

Die Berechnung ist für bestimmte Verteilungsfunktionen der Türleistungsfähigkeiten geschlossen ausführbar, wird aber bereits bei wenigen Türen sehr umfangreich.

7.32 Überblick über die Einflussgrössen

Die effektive Leistungsfähigkeit des Türsystems wird durch den Fahrgastwechsel an den einzelnen Türen, die Eigenschaften der Fahrgäste, den Ablauf des Fahrgastwechsels sowie die Fahrzeug- und Anlagengestaltung bestimmt. Besonders der Ablauf des Fahrgastwechsels und das Verhalten der Fahrgäste am Türsystem, zum Beispiel die Wahl der Türe und als Resultat davon die Türbelastung, sind sehr stark von den Fahrzeug- und Anlagenkonzepten abhängig. Den gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den Einflussgrössen kommt damit eine besondere Bedeutung zu. Selbst bei gegebener Fahrgastwechselzahl pro Türe streut die Fahrgastwechselzeit eines Kurses aus folgenden Gründen:

- Die Fahrgäste verteilen sich nicht immer dem Erwartungswert entsprechend auf die einzelnen Türen.
- Da die spezifischen Leistungsfähigkeiten der einzelnen Türen Zufallsgrössen sind, ist auch das Ergebnis dieser parallel ablaufenden Prozesse eine Zufallsgrösse.

7.33 Erwartungswert und Streuung

Da die spezifische Leistungsfähigkeit der einzelnen Türen mit wachsender Türbelastung ansteigt und gleichzeitig der Einfluss der Ganzzahligkeit des Fahrgastwechsels weniger spürbar ist, nimmt die Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse unterproportional zur Fahrgastwechselzahl zu. Die zwei diesbezüglich nutzbaren Literaturangaben weisen eine Verdoppelung der effektiven Leistungsfähigkeit des Türsystems bei einer Erhöhung der Fahrgastwechselquote von 10 auf 100 % nach. Weil sich die Messungen nicht zur Formulierung allgemeingültiger Beziehungen eignen, wurde mittels des Computerprogrammes ACoST.NeXT eine standardisierte Kurve des Wirkungsgrades des Türsystems errechnet, mit deren Hilfe auf der Basis der theoretischen Türleistungsfähigkeit die Fahrgastwechselzeit für beliebige Türzahlen ermittelt werden kann.

Als Verteilungsfunktionen der Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse werden in der Literatur sowohl die Standardverteilung als auch die Erlang-k-Funktion angegeben. Die eigenen Messungen zeigen eine schiefe Dichte der mittleren Fahrgastwechselzeiten ganzer Kurse sowie eine nahezu symmetrische effektive Leistungsfähigkeit. Im Durchschnitt streuen die mittleren Fahrgastwechselzeiten um 48 % und die effektiven Türleistungsfähigkeiten um 39 % des Erwartungswertes.

7.34 Abhängigkeit von den Einflussfaktoren

7.34.1 Einfluss der Türzahl und der Streuung an der Einzeltüre

Die statistischen Gesetzmässigkeiten haben zweierlei zur Folge: Je mehr Türen vorhanden sind, desto tiefer sinkt der Wirkungsgrad. Der Erwartungswert ist aber auch unter sonst gleichen Bedingungen umso tiefer, je grösser die Streuungen an den Einzeltüren sind. Zur Quantifizierung der Einflüsse wurden die Fahrgastwechselzeiten von Kursen mit 1 bis 40 Türen mittels des Programmes ACoST.NeXT für ausgewählte Türbreiten und die zugehörigen Standardabweichungen errechnet. Es konnte eine quadratische Abhängigkeit zwischen der Standardabweichung an den Türen beziehungsweise der Türbreite und dem Exponenten des Ausschöpfungsgrades abge-

leitet werden. Demnach kann beispielsweise die theoretische Leistungsfähigkeit eines Türsystems mit dreissig Einzeltüren selbst unter sonst idealen Verhältnissen nur noch zu rund der Hälfte ausgeschöpft werden.

7.34.2 Einfluss der Ungleichförmigkeit der Türbelastung

Für allgemeine Betrachtungen liefern die rein geometrischen Einzugsgebiete der Fahrzeugtüren, welche durch die Mitten zwischen zwei benachbarten Türen begrenzt werden, einen guten Anhaltspunkt für die Türbenützung. Im Einzelfall ist die Belastung des Türsystems allerdings aus verschiedenen Gründen ungleichförmig und der Fahrgastwechselstrom verteilt sich nicht proportional zur Türleistungsfähigkeit auf die Einstiege:

1. *Türverteilung am Fahrzeug:* Liegen seitens der Fahrgäste keine besonderen Kriterien für die Wahl der Türen vor, so bildet die Mitte zwischen den beiden Türachsen die Grenze des Einzugsgebietes zweier Türen. Eine ungleichmässige Türverteilung führt damit direkt zu deren ungleichmässiger Auslastung.
2. *Auswahlkriterien für die Benützung der Türen:* Bestimmend für das Verhalten der Fahrgäste sind deren Systemkenntnisse bezüglich des eingesetzten Rollmaterials und der Situation an der Zielhaltestelle. Bei hohem Grad der Systemkenntnis wählen die Fahrgäste zu rund zwei Dritteln einen Fahrzeugbereich, der dem Abgang an der Zielhaltestelle am nächsten liegt.
3. *Fahrgastverteilung auf dem Bahnsteig:* Wird der letztgenannte Einfluss nicht wirksam, so sind es Zufälligkeiten und die Haltestelleneinrichtung, welche die Verteilung der Fahrgäste steuern. Zu Fahrgastkonzentrationen kann die Zugangssituation und die Bahnsteigausrüstung führen.
4. *Fahrgastverteilung im Fahrzeug:* Eine Ungleichförmigkeit der Türbelastung durch aussteigende Fahrgäste entsteht, wenn Fassungsvermögen und Türleistungsfähigkeit schlecht übereinstimmen. Während ein Stehplatzfahrgast mit 0.17 m^2 auskommt, benötigt ein Sitzplatz im Nahverkehr 0.35 m^2 und im Fernverkehr sogar 0.55 m^2 . Mit Vorliebe verbleiben die Fahrgäste bei hoher Auslastung in Türnähe, die Fahrzeuggänge werden dagegen möglichst gemieden: Die Fahrgastdichte beträgt gemäss den Messungen bei einer Kursauslastung von 70 % in den Gangbereichen lediglich 1.9 P/m^2 , während sie in den Türräumen auf 5.3 P/m^2 ansteigt.

Die vielfältigen Ursachen einer ungleichmässigen Türausnützung sind nicht allgemein fassbar. Die Verlängerung der Fahrgastwechselzeit kann aber in Funktion des Ungleichförmigkeitsmasses der Türbelastung dargestellt werden. Bei einer Dreiecksverteilung der Fahrgäste verlängert sich demnach die Fahrgastwechselzeit um rund 40 %.

7.4 Die Fahrgastwechselzeit einer Kursfahrt

7.41 Einflussgrössen

Die Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt macht mit 12 % einen wesentlichen Teil der Beförderungszeit aus. Wäre die mittlere Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse von der Grösse des Fahrgastwechsels unabhängig, so wäre die Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt linear von der Gesamt-

fahrgastwechselzahl abhängig. Aus den dargestellten Gründen muss die Fahrgastwechselzeit aber für jede Haltestelle einzeln bestimmt und anschliessend aufsummiert werden. Zusätzlich zu den bisherigen Erkenntnissen sind zur Berechnung der Fahrgastwechselzeit einer ganzen Fahrt somit Informationen zu den einzelnen Fahrgastwechselzahlen erforderlich, wozu folgende Quellen genutzt werden können:

- Zählung der Ein- und Aussteiger bei bestehenden Systemen
- Verkehrsmodelle
- Häufigkeitsverteilung der Fahrgastwechselzahlen

Die Einflüsse auf das Fahrgastaufkommen gliedern sich in drei Gruppen:

- Tageszeit, tageszeitliche Ganglinie des Verkehrsaufkommens
- Charakteristiken des Gebietes, in welchem eine Linie verkehrt
- Funktion der Verkehrslinie

Die beiden erstgenannten Einflüsse sind von äusserer Natur und müssen als solche hingenommen werden. Die Funktion der Verkehrslinie liegt hingegen im Entscheidungsbereich des Systembetreibers. Sie beeinflusst die Fahrgastwechselzahlen folgendermassen:

1. *Sammelfunktion:* Eine Verkehrslinie mit Sammelfunktion sammelt Fahrgäste entlang ihrer Fahrt und befördert sie bis zum Endpunkt. Der Anteil der Kurzstreckenfahrergäste ist klein.
2. *Verteilerfunktion:* Eine Verkehrslinie mit Verteilerfunktion stellt die interne Erschliessung des von ihr durchfahrenen Gebietes sicher. Der Anteil der Kurzstreckenfahrergäste ist gross.

Je grösser der Anteil der Kurzstreckenfahrergäste ist, je stärker also die Verteilerfunktion überwiegt, desto grösser ist der Fahrgastwechsel bei gleicher maximaler Querschnittsbelastung.

7.42 Standardisierte Häufigkeitsverteilung der Fahrgastwechselzahlen

Bei neuen Linien ist eine Schätzung der Fahrgastwechselzahlen unumgänglich. Diesem Zweck dient die standardisierte Häufigkeitsverteilung, welche die Fahrgastwechselzahlen mit den auf der jeweiligen Kursfahrt erzielten Maximalauslastung in Verbindung bringt. Sie beruht auf der Beobachtung, dass das Verhältnis zwischen der maximalen Auslastung eines Kurses und der Fahrgastwechselzahl an den einzelnen Haltestellen während derselben Linienfahrt einer Häufigkeitsverteilung folgt. Die Summenkurve nennt den Prozentsatz der Halte, in welchem eine bestimmte relative Fahrgastwechselzahl unterschritten wird. Den Absolutwert der einzelnen Fahrgastwechselzahlen erhält man als Produkt der relativen Fahrgastwechselzahlen mit der maximalen Auslastung während der Kursfahrt.

Die Annahme, wonach kleine Fahrgastwechselzahlen häufig, grosse dagegen selten sind, bestätigte sich bei allen Messfahrten. Die Summenkurve nimmt daher einen gekrümmten Verlauf. Die grösste relative Fahrgastwechselzahl liegt bei etwa 85 % der maximalen Kursauslastung. Die fest-

gestellten Abweichungen zwischen der Buslinie in Basel einerseits und den Strassenbahnlinien von Genf und Grenoble andererseits haben folgende Ursachen:

- Bei einigen Messfahrten in Basel war die Auslastung so bescheiden, dass sehr kleine relative Fahrgastwechselzahlen aufgrund der Ganzzahligkeit des Fahrgastwechsels gar nicht möglich waren.
- Die beobachtete Buslinie in Basel ist eine Tangentiallinie mit überwiegender Verteilerfunktion. Die beiden Tramlinien von Genf und Grenoble sind hingegen Durchmesserlinien mit starker Sammelfunktion.

Unbesehen davon liess sich mittels einer Regressionsrechnung eine standardisierte Summenkurve von hinreichender Genauigkeit ableiten.

7.5 Wertung der Forschungsergebnisse

Die Einflüsse auf die Fahrgastwechselzeit sind ausserordentlich vielfältiger Natur, weshalb die Formulierung allgemeiner Gesetzmässigkeiten während langer Zeit Schwierigkeiten bereiten musste. Erst die neuesten Entwicklungen der Computertechnik erlauben es, statistische Analysen und Modellrechnungen mit tragbarem Aufwand auszuführen. Es zeigen sich aber auch die Grenzen der analytischen Verfahren: Nicht erfassen lassen sich die Veränderungen des Systemzustandes während des Fahrgastwechsellvorganges und die Reaktion der Fahrgäste darauf. Trotz dieser Einschränkung lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse zu Lösungen in den eingangs formulierten Zielbereichen mit genügender Aussagekraft nutzen:

- *Betriebsplanung:* Konnte die reine Fahrzeit auf der Basis der Fahrdynamik bereits bisher recht präzise berechnet werden, so trifft dies nunmehr auch für die Fahrgastwechselzeit zu. Der besonders interessierende Einfluss einer reduzierten Einstiegs- höhe auf die Beförderungszeit von Strassenbahn- und Autobuslinien lässt sich abschätzen. Es erweist sich, dass ein Tiefeinstieg vor allem bei langen Linien von über 8 bis 10 km zum Tragen kommt, bei welchen die Verkürzung der Fahrgastwechselzeit die Einsparung eines Kurses ermöglicht.
- *Betriebsführung und Betriebsleittechnik:* Durch ihre Quantifizierung lässt sich die Fahrgastwechselzeit nun in Prognosealgorithmen von Leitrechnern integrieren. Die Gesetzmässigkeiten der Störungsaufschaukelung besagen zudem, dass die Anfälligkeit eines Kurses direkt von dessen Türleistungsfähigkeit abhängt und dass deshalb günstige Einstiegsverhältnisse, zum Beispiel durch Tiefeinstiege oder Hochperrons, zu einer erhöhten Störungsresistenz führen.
- *Fahrzeuggestaltung und Haltestelleninfrastruktur:* Es lässt sich nachweisen, dass für kurze Fahrgastwechselzeiten bei gleicher gesamter Türbreite möglichst viele schmale Türen zweckmässiger sind als wenige breite. Zum Ausdruck kommt ferner die Bedeutung einer gleichmässigen Fahrgastverteilung auf dem Perron, welche durch eine entsprechende Anordnung der Zugänge und Ausrüstungsgegenstände erreicht wird.

A Anhang

A.1 Literaturverzeichnis

- [1] Ahlbrecht, H.; Müller-Hellmann, A.: Renaissance der Niederflur-Fahrzeuge bei Straßen- und Stadtbahnen, in: Der Nahverkehr, 5(1987), H. 5, S. 32 - 40
- [2] Ahlbrecht, H.: Niederflur - Vorteil für alle/Antwort auf Artikel Iffländer/Weidmann, in: Der Nahverkehr, 8(1990), H. 8, S. 65
- [3] Alfter; Müller-Hellmann; Püttner; Rothermel: Die VÖV-Niederflur-Stadtbahn - Das Konzept einer neuen Fahrzeugfamilie, in: Der Nahverkehr, 6(1988), H. 6, S. 10 - 19
- [4] Alfter; Müller-Hellmann; Püttner; Rothermel: Der VÖV-Niederflur-Stadtbahnwagen, in: ZEV Glasers Annalen, 112(1988), H. 11, S. 408 - 418
- [5] Alfter, R.; Rothermel, V. H.: VÖV-Niederflur-Stadtbahn - ein Projekt in der Bewährung für künftige Serienbestellungen, in: ZEV+DET - Glasers Annalen, 116(1992), H. 8-9, S. 375 - 382
- [6] Allos, A.E.; Mohamad, A.R.: Usage of Pedestrian Footbridges, in: Traffic Engineering & Control, 24(1983), May, S. 269 - 273
- [7] Allouche, Jean Francois: Approach to Probability Distribution of Value of Walking Time and Pedestrian Circulation Models, in: Highway Research Record 392, S. 121 - 133, Washington D.C. 1972
- [8] Amacker; Karli: Untersuchung der Haltezeiten auf der Strecke Zürich-Rapperswil, interner Bericht des Instituts für Verkehrsplanung und Transporttechnik, Dezember 1982
- [9] Amar, G.: L'optimisation des temps de battement des autobus aux terminus, in: Transport Environnement Circulation No 67, novembre/décembre 1984, S. 14 - 18
- [10] Amler, J.; Püttner, G.: U-Bahn-Wagen nach VÖV-Typenempfehlung 6.030.1 für München und Nürnberg, in: Verkehr und Technik, 25(1972), H. 2, S. 49 - 57
- [11] Amossowa; Gillert; Küchler; Maximow: Bedienungstheorie - Eine Einführung, BSB B.G.Teubner Verlagsgesellschaft, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Bibliothek Band 71, Leipzig 1986
- [12] Annesley, T.; Dix, M.; Beswick, A.; Buchanan, P.: Development and Application of Pedestrian Assignment Models in London Railway Station Studies, in: Traffic Engineering + Control, 30 (1989), July/August, S. 345 - 352
- [13] Antoniou, J.: Planning for Pedestrians, in: Traffic Quarterly, 30(1971), January, S. 55 - 71
- [14] Arbeitsgruppe Optimierung der Einstiegsverhältnisse CH: Provisorische Fassung von Teilbericht 1: Einstieg in Reisezugwagen - zu beachtende Maße, Bern, Juni 1985.
- [15] Arbeits- und Forschungsgemeinschaft für Strassenverkehr und Verkehrssicherheit: Die Sicherung des Fussgängerverkehrs, Buchreihe Band XXIX, Köln 1976
- [16] Ario, O.; Schütze, P.: Masse für Regelmässigkeit und Pünktlichkeit öffentlicher Verkehrsmittel - Wartezeiten und Verspätungen an Haltestellen, in: Der Nahverkehr, 2(1984), H. 3, S. 74 - 81
- [17] Ashford, N.; Holloway, F. M.: The Effect of Age on Urban Travel Behaviour, in: Traffic Engineering, 42(1971), April, S. 46 - 49, 67
- [18] Asmussen, G.: Physiologische Grundlagen von Haltung und Bewegung, Verlag Chemie, Weinheim/New York 1979
- [19] Association pour le développement des techniques de transport, d'environnement et de circulation: Usage et aménagement des rues, compte rendue, Paris 7./8. Dezember 1983
- [20] Astrand, I.: Arbeitsphysiologie, Schattauer Verlag, Stuttgart/New York 1987
- [21] Aufzüge- und Elektromotorenfabrik Schindler & Cie. AG: Erfahrungen mit Rolltreppen in Unterführungen, in: Strasse und Verkehr, 47(1961), H. 5, S. 276 - 279
- [22] Australian Road Research Board: DoT Pedestrian Conference - Program and Papers, Sydney 1978
- [23] Bäckström, I.: Massnahmen und Erfahrungen bei der Einrichtung behindertengerechter Verkehrssysteme in Schweden, in: Verkehr und Technik, 35(1982), H. 1, S. 7 - 9
- [24] Baerwald, J. E.: Traffic Engineering Handbook, Third Edition, Institute of Traffic Engineers, Washington DC 1965
- [25] Barrette, R.: Moving Pedestrians in a Traffic-free Environment, in: Traffic Engineering & Control, 13(1972), September, S. 235-238
- [26] Bauer, W.: Studie über den Fahrgastwechsel im Eisenbahn-Nahverkehr, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 17(1968), H. 8, S. 320 - 330
- [27] Bauermeister, K.: Fahrzeuge und Stromversorgung für S-Bahnen bei der DB, in: Die Bundesbahn, 45(1969), H. 21-22, S. 1013 - 1020
- [28] Bauknecht, K.: Untersuchung des Verkehrsverhaltens von Strassenbahnen durch Simulation auf einem Rechenautomaten, Dissertation an der ETH Zürich, Juris Druck + Verlag, Zürich 1967
- [29] Beck, H.: Kriterien zur Kennzeichnung der Betriebsgüte und der praktischen Leistungsfähigkeit von Strassenbahnnetzen - Störmasstäbe für spezielle Streckenabschnitte und Knoten, VDI-Zeitschrift, Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 5, Düsseldorf 1965
- [30] Beinbauer, M.; Brandau, R.: Die Haltestelle im Niederflursystem, in: Verkehr + Technik, 46 (1993), H. 2, S. 53 - 60
- [31] Benjamin, J. R.; Cornell, C. A.: Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill Book Company, New York 1970

- [32] Berg, W.: Innerbetriebliche Gesetzmässigkeiten des öffentlichen Linienbetriebes, Teilbericht Fahrgastwechselzeiten im ÖPNV in Abhängigkeit zur Fahrzeugbelastung, IVT-ETHZ, Zürich 1980
- [33] Berg, W.: Innerbetriebliche Gesetzmässigkeiten des öffentlichen Linienbetriebes, Teilbericht Fahrgastwechsel als Einflussfaktor bei der Fahrzeugwahl, IVT-ETHZ, Zürich 1980
- [34] Berg, W.: Innerbetriebliche Gesetzmässigkeiten des öffentlichen Linienbetriebes, IVT-Bericht Nr.82/2 (Dissertation). Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule - Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik (IVT), 1982
- [35] Berg, W.: Gestaltung von Zugängen zu den Haltestellen und Bahnhöfen - Verkehrstechnisch-betriebliche Belange, Arbeitsgemeinschaft Recht für Fussgänger, Zürich 1988
- [36] Berger, H.: Niederflur-Doppelgelenk-Tramwagen für die Verkehrsbetriebe Bern; in: Der Nahverkehr, 6(1988), H. 5, S. 70 - 74
- [37] Berger, W. u.a.: Haltung und Bewegung beim Menschen - Physiologie, Pathophysiologie, Gangentwicklung und Sporttraining, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo 1984
- [38] Bernard, J. Ph.: Die neuen Doppelstockwagen der SNCF für den Vorortsverkehr, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 25(1976), H. 9, S. 535 - 541
- [39] Besch, M.: Simulation des Strassenbahnbetriebes, in: Schweizerische Bauzeitung, 92(1974), H. 27, S. 663 - 665
- [40] Biella; Bopp; Hofbauer; Kleemann; Parsch; Schuster; Trenkle; Übel: Energiebedarfsoptimierung bei Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen, Teil II, in: Verkehr und Technik, 41(1988), H. 9, S. 375 - 377
- [41] Biermann, J.-L.: La capacité des divers moyens de transports routiers, in: Strasse und Verkehr, 53(1967), H. 7, S. 368 - 370
- [42] Bigot; Dunoyé; Hamel: Etude de l'embarquement - débarquement latéral d'un véhicule en mouvement - Présentation générale de résultats de l'expérimentation, Institut de recherche des transports, Rapport de recherche No 13, volume I, Arcueil 1976
- [43] Blennemann, F.; Brandenburg, W.: Anforderungen der Fahrgäste an den öffentlichen Nahverkehr, Forschung und Praxis U-Verkehr und unterirdisches Bauen, Band 17, Alba-Buchverlag, Düsseldorf 1975
- [44] Blennemann, F.; Brandenburg, W.: Komfortfragen bei der Benutzung öffentlicher Verkehrsmittel und deren Beurteilung durch die Fahrgäste, in: Verkehr und Technik, 32(1979), H. 2, S. 39 - 44; 32(1979), H. 3, S. 106 - 108
- [45] Blennemann, F.: Behinderte und alte Personen im öffentlichen Nahverkehr - Beispiele für Massnahmen und Erfahrungen im Ausland, in: Verkehr und Technik, 34(1981), H. 4, S. 134 - 139
- [46] Blennemann, F.: Empfehlungen für die Entwicklung von fahrgastfreundlichen und behindertengerechten Linienbussen, in: Nahverkehrsforschung '90, Statusseminar XVII, Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH, Ottobrunn 1990
- [47] Blennemann, F.; Brandenburg, W.; Grossmann, H.: Fahrgastfreundliche und behindertengerechte Linienbusse - Erarbeitung von Empfehlungen für die Entwicklung von fahrgastfreundlichen und behindertengerechten Linienbussen auf der Grundlage von Erhebungen nach einheitlichen und vergleichbaren Bewertungskriterien, STUVA, Köln September 1991
- [48] Bochum-Gelsenkirchener Strassenbahnen Aktiengesellschaft/Studiengesellschaft Nahverkehr SNV: Bewertung von Beschleunigungsmassnahmen im ÖPNV am Beispiel eines ausgewählten Strassenbahn- und Bus-Netzes im mittleren Ruhrgebiet, Schlussbericht, 1989
- [49] Bock, J.: Die Erweiterung der Hamburger S-Bahn, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 9(1960), H. 11, S. 485 - 503; 9(1960), H. 12, S. 541 - 558
- [50] Boegli u.a.: Le tram à Genève - Histoire imaginée de la Compagnie Genevoise des Tramways Electriques et de ses Précurseurs 1862 - 1976, Editions du Tricorne, Genf 1976
- [51] Boesch, H.; Dietrich, K.: Verkehrsprobleme körperlich Behinderter - Bauliche Massnahmen im Strassenbau, Bericht zu den Vorschlägen der Schweizerischen Kommission für Rehabilitation, ETH Zürich, Lehrstuhl für Verkehrsingenieurwesen, Zürich 1971
- [52] Bohley, P.: Statistik - Einführendes Lehrbuch für Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler, R.Oldenbourg Verlag, München/Wien 1991
- [53] Bölkow, L.: Ein Jahrhundert Flugzeuge - Geschichte und Technik des Fliegens, VDI-Verlag, Düsseldorf 1990
- [54] Bollhöfer, K.-D.: Betriebliche Hinweise zum Einsatz von Fahrtreppen, in: Verkehr und Technik, 30(1977), H. 8, S. 312 - 316
- [55] Bosserhoff, D.; Grund, R.; Masak, H.-O.: Strassenbahn komplett beschleunigt - Acht Jahre Erfahrungen in Krefeld - Erstes Fazit und grundsätzliche Überlegungen, in: Der Nahverkehr, 8(1990), H. 6, S. 63 - 67
- [56] Bovy, Prof. Philippe H./Vuille, J.: Réseaux et espaces piétonniers, EPF Lausanne, Institut de technique des transports, Lausanne 1973
- [57] Bovy, Ph. H.: Le rôle du piéton dans les transports urbains, Sonderdruck aus Bulletin technique de la Suisse romande, Nr. 6, 14. März 1974, Lausanne 1974
- [58] Bovy, Ph. H.: Pedestrian Planning and Design 1965-1975 - Bibliography, University of California, Insitut of Transportation and Traffic Engineering, Berkeley 1975

- [59] Boxma, O.J./Syski, R.: Queueing Theory and its Applications, Liber Amicorum for J.W.Cohen, CWI Monograph 7, North-Holland 1988
- [60] Braaksma, J. P.: Surveying Pedestrian Traffic - Results of the 'Time-Stamping' Method used at Winnipeg Airport, in: Traffic Engineering & Control, 19(1978), June, S. 274-276
- [61] Brand: Der U6-Wagen der DUEWAG für die Strassenbahn Frankfurt/Main, Schriftenreihe für Verkehr und Technik, Heft 27, S. 21 - 32, Bielefeld 1966
- [62] Brändli, H.; Siegrist, R.; Altherr, W.; Enz, R.: Einfluss des Anmarschweges auf die Benützung öffentlicher Verkehrsmittel, IVT-Bericht Nr. 78/3, IVT-ETHZ, Zürich 1978
- [63] Brändli, H.; Berg, W.: Einfluss von neuen Bahnhofzugängen auf das Fahrgastverhalten - Eine Vorher/Nachher-Untersuchung an der neuen Unterführung West im HB Zürich, IVT-ETHZ, Zürich 1979
- [64] Brändli, H.; Berg, W.: Einfluss von neuen Bahnhofzugängen auf das Fahrgastverhalten, in: Verkehr und Technik, 32(1979), H. 11, S. 480 - 482
- [65] Brändli, H.: Vorlesungen öffentlicher Verkehr, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, Zürich 1982 - 1986
- [66] Brändli, H.; Wichser, J.; Weidmann, U.; Rangosch, S.; Schaffer, H.: Gutachten ÖV-Konzept Frankfurt am Main, ausgeführt im Auftrag des Magistrats der Stadt Frankfurt am Main, IVT-ETHZ, Zürich 1990
- [67] Brändli, H.: Vorlesungen öffentlicher Verkehr, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, Zürich 1990 - 1992
- [68] Braun: Die elektrischen Stadtbahnen, Strasseneisenbahnen und die Franz-Josef Elektrische Untergrundbahn zu Budapest, in: Elektrotechnische Zeitschrift 36/1897, S. 545 - 556
- [69] Brdlik, A.; Nussbaum, M.: Beschleunigungsprogramm für den ÖPNV in Mannheim, in: Der Nahverkehr, 5(1987), H. 6, S. 70 - 75
- [70] Brenner, M. F.: Steuerung des Individualverkehrs und des öffentlichen Personenverkehrs unter Berücksichtigung der Gesamtverkehrszeiten, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 281, Bundesminister für Verkehr, Bonn-Bad Godesberg 1980
- [71] Brenner, M. F./Heinz, G.: Reisezeit- und Behinderungsanalysen im öffentlichen Personennahverkehr, in: Der Nahverkehr, 7(1989), H. 2, S. 60 - 65
- [72] Brilon, W.; Eickers, C.: Bushalt im Verkehrsraum - Einige Aspekte für Busbetrieb und Individualverkehr, in: Der Nahverkehr, 10(1992), H. 8, S. 44 - 48
- [73] Bronstein, I.N./Semendjajew, K.A.: Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main 1983
- [74] Brunner, P.: Simulationsmodell für Tramnetze, Schriftenreihe des IVT Nr. 94, Zürich 1993
- [75] Bullemer, O.: Münchens Schienenschnellbahnen im Bau, in: ZEV-Glasers Annalen, 91(1967), H. 5, S. 137 - 141
- [76] Bundesamt für Sozialversicherungen: Invaliditätsstatistik 1992, Bern 1992
- [77] Bundesamt für Statistik: Statistisches Jahrbuch der Schweiz 1991, Verlag Neue Zürcher Zeitung, Zürich 1990
- [78] Bundesminister für Verkehr: Niederflur-Verkehrssysteme - Gestaltung von Haltestellen in den alten und neuen Bundesländern, in: direkt - Verbesserung der Verkehrsverhältnisse in den Gemeinden 46/1992, Bonn-Bad Godesberg 1992
- [79] Bundesminister für Verkehr: Bürgerfreundliche und behindertengerechte Gestaltung des Strassenraumes, in: direkt - Verbesserung der Verkehrsverhältnisse in den Gemeinden 47/1992, Bonn-Bad Godesberg 1992
- [80] Burek, G.; Grund, R.: Krefelder Erfahrungen mit Beschleunigungsmassnahmen, in: Der Nahverkehr, 5(1987), H. 2, S. 42 - 47
- [81] Büsing, F.: Überlegungen zur Zugabfertigung bei der Stadtbahn Rhein-Ruhr, in: Verkehr und Technik, 25(1972), H. 9, S. 374 - 375; 25(1972), H. 10, S. 420 - 424
- [82] Cameron, R. M.: Pedestrian Volume Characteristics, in: Compendium of Technical Papers, Institute of Traffic Engineers, 45th annual Meeting, Seattle/Washington, August 17-21, 1975, S. 110 - 125
- [83] Cameron, R. M.: Pedestrian Volume Characteristics, in: Compendium of Technical Papers, Institute of Transportation Engineers, 46th annual Meeting, Baltimore/Maryland, August 15-19, 1976, S. 11 - 27
- [84] Cameron, R. M.: Pedestrian Volume Characteristics, in: Traffic Engineering, 48(1977), January, S. 36 - 37
- [85] Canal, G.: Le programme français d'autobus futur, in: Transport - Environnement - Circulation No 69, mars/avril 1985, S. 21 - 31
- [86] Carstens, R.L./Ring, S.L.: Pedestrian Capacities of Shelter Entrances, in: Traffic Engineering, December 1970, S. 38-43
- [87] Casteleijn, H.: Rotterdamer Triebwagen der Reihe 1 - 15, in: Tram-Bulletin 10, Tramclub Basel, S. 96 - 98, Basel 1980

- [88] Casteleijn, H.: Die Geschichte der Rotterdamer Strassenbahn, in: Tram-Bulletin 11, Tramclub Basel, 86 - 95, Basel 1982
- [89] Catling, David: Higher standards and lower floors in the light rail car market, in: Railway Gazette International, 143(1987), H. 9, S. 596 - 599
- [90] Chapman, R. A.: Bus Boarding Times - A Review of Studies and Suggestions for Interpretation, University of Newcastle upon Tyne, Transport Operations Research Group, Working Paper No. 8, January 1975
- [91] Chapman, R. A.; Gault, H. E.; Jenkins, I. A.: Factors affecting the operation of urban bus routes, University of Newcastle upon Tyne, Transport Operations Research Group, Working Paper No. 23, December 1976
- [92] Chapman, R. A.; Gault, H. E.; Jenkins, I. A.: The Operation of Urban Bus Routes, in Traffic Engineering & Control, 18(1977), June, S. 294 - 298; 18(1977), July-August, S. 364 - 367; 18(1977), September, S. 416-419
- [93] Ceder, A.; Marguier, Ph. H. J.: Passenger waiting time at transit stops, in: Traffic Engineering & Control, 26(1985), June, S. 327 - 329
- [94] City of Boulder: Fifth Annual Pedestrian Conference September 20 and 21, 1984, The City on its Feet, Transportation Division, City of Boulder 1984
- [95] Colberg, R.: Tunnel-Strassenbahn und U-Bahn - Möglichkeiten und Grenzen, in: Stadtverkehr, 7(1962), H. 6, S. 124 - 131
- [96] Colberg, R.: Reicht die Münchner S-Bahn für die Zukunft? in: Stadtverkehr, 8(1963), H. 1, S. 14 - 16
- [97] Collis, R.E.: A possible Design Criterion for Pavement Width, in: Traffic Engineering & Control, 16(1975), March, S. 124 - 125
- [98] Crampen, M.: Von der Typenvielzahl zum aufgabengerechten Standard-Linienbus, in: Verkehr und Technik, 20(1967), H. 8, S. 189 - 193
- [99] Cunagin, W.; Abrahamson, T.: Driver Eye Height: A Field Study, in: ITE Journal, May 1979, S. 34 - 36
- [100] Daeves, K./Flachsbar, O.: Strömung von Menschenmengen, in: Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 94(1952), H. 26, S. 880 - 881
- [101] Dähnck: Die Fahrzeuge der Berliner Stadt-, Ring- und Vorortbahnen, in: Glasers Annalen, 62 (1938), Juni, S. 137 - 145
- [102] Danas, A.: Arrivals of Passengers and Buses at two London Bus-Stops, in Traffic Engineering & Control, 21(1980), October, S. 472 - 475
- [103] Danas, A.: Passenger Car Equivalents of Buses with different Numbers of Seats, in: Traffic Engineering & Control, 22(1981), October, S. 514 - 521
- [104] Davis, D. G.; Braaksma, J. P.: Level-of-Service Standards for Platooning Pedestrians in Transportation Terminals, in ITE-Journal April 1987, S. 31 - 35
- [105] Deinert, W.: Eisenbahn-Wagen, 4. Auflage, VEB transpress, Berlin 1981
- [106] Déjeammes, M.; Carvalhais, J.: Concept d'accessibilité autobus/infrastructure urbaine: Evaluation de l'expérience de Caen, Institut de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, Laboratoire Ergonomie - Santé - Confort, rapport LESCO No 9303, Bron 1993
- [107] Delvendahl, H.: Über die Gestaltung der Bahnanlagen für den Nahverkehr der Deutschen Bundesbahn, in: Die Bundesbahn, 40(1964), H. 19-20, S. 698 - 702
- [108] Delvendahl, H.: Gestaltung der Bahnanlagen und signaltechnische Ausstattung moderner S-Bahnen, in: Die Bundesbahn, 45(1969), H. 21-22, S. 993 - 1002
- [109] de Niet, J.: Konstruktive Betrachtungen über die Rotterdamer U-Bahn-Wagen, in: ZEV-Glasers Annalen, 91(1967), H. 6, S. 185 - 191
- [110] Dieckmann, D.: Anmerkungen zur Gestaltung von ergonomischen Fahrerplätzen, in: Unfall- und Sicherheitsforschung Strassenverkehr, Heft 45/1983, Arbeitsplatz des Berufskraftfahrers, S. 54 - 59
- [111] Dietrich, K.; Spacek, P.: Vorlesung Transporttechnik, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, ETH Zürich, Zürich 1983
- [112] Dijkman, P. J.: Wirtschaftliche Reisegeschwindigkeit bei U-Bahn-Wagen, in: Verkehr und Technik, 23(1970), H. 5, S. 121 - 123
- [113] Dirmeier, W.: Die Bedeutung der Haltezeit im Stadtschnellbahnbetrieb, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 27(1978) H. 5, S. 273 - 276
- [114] Dittermer, Th.: Haltestellenkap für Bus und Strassenbahn - Die bessere Haltestelle auch für Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit? in: Der Nahverkehr, 8(1990), H. 4, S. 42 - 48
- [115] Dittrich, W.: Berechnung zeitgünstiger Grüner Wellen für Strassenbahn und Bus, in: Die Strasse, 20(1980), H. 8, S. 256 - 260
- [116] Domstad, R.; Berntsson, J.-O.: Bevorrechtigungsmassnahmen für den ÖPNV an Lichtsignalanlagen in Göteborg, Schweden, in: Verkehr und Technik, 37(1984), H. 3, S. 79 - 82
- [117] Donskoi, D. D.: Grundlagen der Biomechanik, Deutscher Sportbund, Schriftenreihe des Bundesausschusses zur Förderung des Leistungssports, Trainerbibliothek Band 16, Verlag Bartels & Wernitz KG, Berlin 1975

- [118] Drechsler, G.; Zimmermann, M.: Karlsruher Erfahrungen mit dem Beschleunigungsprogramm - Kürzere Reisezeiten, höhere Attraktivität, wirtschaftlicherer Betrieb, in: Der Nahverkehr, 11 (1993), H. 9, S. 43 - 51
- [119] Dresden, Dezernat für Stadtentwicklung: Dresden - Verkehrskonzept der Stadt, Entwurf, in: Die Landeshauptstadt plant und informiert 2/1991, Dresden 1991
- [120] Dreyfuss, H.: The Measure of Man - Human Factors in Design, Whitney Library of Design, New York 1967
- [121] Drossel, P.: Doppelstockwagen bei der Deutschen Reichsbahn, in: Die Bundesbahn, 67(1991), H. 3, S. 344 - 348
- [122] Duncan, N.C.: A further Look at Speed/Flow/Concentration, in: Traffic Engineering & Control, 20(1979), October, S. 482-483
- [123] Dunoyé, D.: Etude de l'embarquement-débarquement latéral d'un véhicule en mouvement - Présentation générale et résultats de l'expérimentation, Rapport de recherche I.R.T. No 13, Arcueil 1976
- [124] Dunoyé, D.: Simulation d'une ligne de transports en commun en site propre du type semi-continu, Rapport de recherche I.R.T. No 20, Arcueil 1977
- [125] Dupaigne, F.: Wirtschaftlicher Einmannbetrieb durch beschleunigte Fahrgastabfertigung, in: Revue de l'UITP, 11(1962), H. 2, S. 103 - 110
- [126] Dupuis, H.: Ergonomische Gestaltung von Fahrersitzen, in: Unfall- und Sicherheitsforschung Strassenverkehr, Heft 45/1983, Arbeitsplatz des Berufskraftfahrers, S. 60 - 63
- [127] Ebnöter, A.: Strassenbahn-Eingelenktriebwagen Be 4/6 in Niederflurbauweise der Transports publics genevois mit Gleichstromstellern für 600 V, in: Brown Boveri-Mitteilungen 12/1984, S. 567 - 577
- [128] Eidgenössisches Post- und Eisenbahndepartement: Ein Jahrhundert Schweizer Bahnen, 1847-1947, dritter Band: Das Rollmaterial der Normal- und Schmalspurbahnen, Frauenfeld 1957
- [129] Eilmès, H.: Untersuchungen über die Durchlassfähigkeit von Treppen im Bereich schienengebundener Nahverkehrsmittel, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 19(1972), H. 4, S. 1037 - 1044
- [130] Eissmann, A.; Geissler, G.; Giese, K.-H.; Schumann, M.: Aufenthaltszeiten für die Konstruktion der Taktintervallmodelle des Taktfahrplans, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 30(1983), H. 1, S. 153 - 160
- [131] Elkington, J.; McGlynn, R.; Roberts, J.: The Pedestrian: Planning & Research - a Literature Review and annotated Bibliography, Transport & Environment Studies, London 1976
- [132] Elkouby, J.: Pedestrian Areas in Town Centres and their Connection with main Transport Facilities, in: International Road Safety and Traffic Review, Spring 1967, Vol. XV, No 2, S. 8 - 17
- [133] Elsners Handbuch für den ÖPNV, Otto Elsners Verlagsgesellschaft, Darmstadt 1980
- [134] Engelbrecht; Ampenberger: Beziehungen zwischen Besetzungsgrad, Aussteigezeiten, Signalsystem und Streckenleistung einer U-Bahn, in: Schriftenreihe Verkehr und Technik, 3. Sonderheft Zweite Ebene, 1968, S. 69 - 74
- [135] Engelbrecht, P.: Fahrgast- und verkehrsgerechte Haltestellen des öffentlichen Personennahverkehrs, in: Verkehr und Technik, 28(1975), H. 8, S. 305 - 311
- [136] Entwicklungsgemeinschaft VÖV-Niederflur-Strassenbahn: VÖV-Niederflur-Stadtbahn - Ein attraktives, wirtschaftliches Fahrzeugkonzept für die Zukunft, Juni 1988
- [137] European Conference of Ministers of Transport: Transport for Disabled People - International comparisons of Practice and Policy with Recommendations for Change, Paris 1986
- [138] European Conference of Ministers of Transport: Transport for Disabled People - A Review of Provisions and Standards for Journey Planning and Pedestrian Access, Paris 1990
- [139] Evans, H. K.: Traffic Engineering Handbook, Second Edition, Institute of Traffic Engineers, New Haven/Connecticut 1950
- [140] Fabig, M.; Grahl, St.: ÖPNV-Bevorrechtigung innerhalb koordinierter Lichtsignalanlagen, in: Die Strasse, 22(1982), H. 2, S. 45 - 48
- [141] Fackelmeyer, A: Rollende Strassen - Utopie damals und Wirklichkeit heute des Förderbandes für Personenverkehr, in: Fördern und Heben 6/1957, S. 252 - 258
- [142] Faivre d'arcier, B.: Les effets d'un couloir réservé sur la progression des autobus - le cas de la RN 306, Rapport de recherche I.R.T. No 39, Arcueil 1979
- [143] Fausch, P. A.: A Transit Station Simulation, in: Traffic Engineering, 42(1971), December, S. 18 - 25, 54
- [144] Feutlinske, H.: Gelenkbusse, in: UITP-Revue, 38(1989), H. 2, S. 153 - 163
- [145] Fiedler, J.: Die Haltezeit und ihre Einflussfaktoren, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 17 (1968), H. 11, S.474 - 479
- [146] Fiedler, J.: Die Haltezeit als massgebendes Kriterium kurzer Zugfolgezeiten, in: Verkehr und Technik, 24(1971), H. 7, S. 316 - 318; 24(1971), H. 8, S. 375 - 378
- [147] Fiehn, R.: Wirtschaftlichkeit und Fahrweise im Omnibus-Linienvkehr, in: Verkehr und Technik, 18(1965), H. 1, S. 6 - 9
- [148] Fischer; Grund; Lindner; Pieper; Reichelt; Sacré: Leitfaden zur ÖPNV-Beschleunigung, herausgegeben von Krefelder Verkehrs-AG, Wuppertaler Stadtwerke, BOGESTRA, SNV Studiengesellschaft Nahverkehr mbH, Bergisch Gladbach, 1988.

- [149] Fischer, K.; Hertel, G.: Bedienungsprozesse im Transportwesen - Grundlagen und Anwendungen der Bedienungstheorie, transpress Verlagsgesellschaft mbH, Berlin 1990
- [150] Flemming, E.: Berechnung und Effektivität von Projektierungsparametern für Phasenlängensteuerung mit Bevorzugung der Strassenbahn am Einzelknoten, in: Die Strasse, 29(1989), H. 9, S. 262 - 266
- [151] Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen: Richtlinien für die Anlage von Strassen (RAS) - Teil: Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs (RAS-Ö), Abschnitt 1: Strassenbahn, Ausgabe 1977, Kirschbaum-Verlag, Bonn-Bad Godesberg 1977
- [152] Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen: Richtlinien für die Anlage von Strassen (RAS) - Teil: Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs (RAS-Ö), Abschnitt 2: Omnibus und Obus, Ausgabe 1979, Kirschbaum-Verlag, Bonn-Bad Godesberg 1979
- [153] Förster, H.-J.: Omnibus und Omnibusverkehrssystem, in: Verkehr und Technik, 32(1979), H. 9, S. 359 - 370
- [154] Frederich, F.: Niederflur-Fahrzeuge: Technik für Fahrgäste, in: Der Nahverkehr, 8(1990), H. 4, S. 22 - 28
- [155] Fruin, J. J.: Designing For Pedestrians: A Level-Of-Service Concept, in: Highway Research Record, Nr. 355, S. 1 - 15, Highway Research Board, Washington D.C. 1971
- [156] Fruin, J. J.; Benz, G. P.: Pedestrian Time-Space Concept for Analyzing Corners and Crosswalks, in: Transportation Research Record, Nr. 959, S. 18 - 24, Washington D.C. 1984
- [157] Fürmetz, R.: Anlagen zur Überwindung von Höhenunterschieden im städtischen Verkehrsraum, in: Fachhochschule Aachen, FH-Texte 38, S. 33 - 85, Aachen 1983
- [158] Fürmetz, R.; Bernecker, M.: Fussgängerbewegungen auf Treppenanlagen im städtischen Verkehrsraum, in: Der Nahverkehr, 2(1984), H. 4, S. 56 - 59
- [159] Gabathuler, W.: Technische Beschreibung des Einheitswagens IV, in: Schweizer Eisenbahn-Revue 5/1993, S. 200 - 213
- [160] Gall, U.: Für zufriedene Betagte und das Wohlergehen der Gesellschaft im 21. Jahrhundert: Eine Zehn-Jahres-Strategie zur Förderung der Gesundheit und Wohlfahrt, aus dem Englischen übersetzt und bearbeitet im Vergleich zur Schweiz, in: Stadtärztlicher Dienst Zürich, Intercura Nr. 32, 1990, S. 27 - 39
- [161] Gantvoort, J. Th.: Pedestrian Traffic in Town Centres, in: Traffic Engineering & Control, 12 (1971), January, S. 454 - 456
- [162] Garbrecht, D.: Gehen - Ein Plädoyer für das Leben in der Stadt, Beltz-Verlag, Weinheim und Basel 1981
- [163] Gebhard, E.; Ludwig, H.-G.: Grundgedanken zum Bau eines U-Bahnwagens, in: Stadtverkehr, 8(1963), H. 1, S. 5 - 8
- [164] Gebhard, K.: Berechnungsmethoden der Durchlassfähigkeit von Fussgängerüberwegen, in: Die Strasse, 5(1965), H. 4, S. 158 - 164
- [165] Gerber, F.: Die Optimierung der Förderleistung bei Pendelbahnen mit Zwischenstationen, in: VTP-Mitteilungen 61, 1984, S. 31 - 39
- [166] Gerbig, R. M.: Die Leichtmotorwagen der Zürcher Strassenbahn, Mitteilungsblatt 16 des Vereins Tram-Museum Zürich, Zürich 1990
- [167] Gerland, H.; Meetz, M.: Fahrgastbedienung im öffentlichen Personennahverkehr - Wünsche, Probleme, Möglichkeiten, SNV Studiengesellschaft Nahverkehr mbH, Hamburg/Berlin, Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe, Köln, Alba-Verlag, Düsseldorf 1980
- [168] Gibson, J.; Baeza, I.; Willumsen, L.: Bus stops, Congestion an congested Bus-stops, in: Traffic Engineering + Control, 30(1989), June, S. 291 - 296, 302
- [169] Gierse, K.: Gestaltung oberirdischer Stadtbahnstationen - Vom "Eschersheimer-Landstrassen-Effekt" zu einer ÖPNV-freundlichen Anlage, in: Der Nahverkehr, 10(1992), H. 4, S. 82 - 86
- [170] Girnau, G.; Blennemann, F.: Verknüpfung von Nahverkehrssystemen, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA), Alba Buchverlag, Düsseldorf 1970
- [171] Girnau, G.: Massnahmen für Behinderte im öffentlichen Personennahverkehr aus der Sicht der öffentlichen Verkehrsunternehmen, in: Verkehr und Technik, 34(1981), H. 12, S. 492 - 496
- [172] Girnau, G.; Müller-Hellmann, A.: ÖPNV auch für Ältere und Behinderte; in: Der Nahverkehr, 7(1989), H. 4, S. 10 - 18
- [173] Girnau, G.: Beförderung von Älteren und Behinderten - Weltweite Erfahrungen und spezielle Lösungen in der Bundesrepublik Deutschland beim öffentlichen Personennahverkehr für Ältere und Behinderte, in: Der öffentliche Nahverkehr in aller Welt, 39(1990), H. 1, S. 37 - 43, 39 (1990), H. 2, S. 144 - 165
- [174] Girnau, G.: Das Niederflerbus-Verkehrskonzept - Ein Vorschlag, der allen Fahrgästen dient, in: Der Nahverkehr, 9(1991), H. 1, S. 35 - 42
- [175] Glaser, R.: Grundriss der Biomechanik, WTB Band 286, Akademie-Verlag, Berlin 1983
- [176] Glissmeyer, H. u.a.: Handbuch Städtischer Verkehr, Verlag transpress, Berlin 1974
- [177] Gnädig, F.; Kupper, D.: Linienzugbeeinflussung und automatischer Zugbetrieb bei der Berliner U-Bahn, in: Verkehr und Technik, 20(1967), H. 6, S. 142 - 144; 21(1968), H. 8, S. 215 - 219
- [178] Grabe, W./Meyer, L.: Ergebnisse einer Verkehrsstudie über den Einsatz zweispuriger Fahrtruppen in U-Bahn-Haltestellen, in: Verkehr und Technik, 23(1970), H. 1, S. 17 - 19
- [179] Grahl, W.; Hahn, S.; Sandner, R.: Breitenbemessung und Durchlassfähigkeit von Fussgängerunterführungen, in: Die Strasse, 6(1966), H. 4, S. 192 - 197

- [180] Grahl, W.: Durchlassfähigkeit von Anlagen des Fussgängerverkehrs, in: Die Strasse, 18 (1978), H. 12, S. 407 - 409
- [181] Gray, B. E.: Slips, Stumbles and Falls: Pedestrian Footwear and Surfaces, American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1990
- [182] Grayson, G. B.: Observations of Pedestrian Behaviour at four Sites, Transportation and Road Research Laboratory, TRRL Laboratory Report 670, Crowthorne/Berkshire 1975
- [183] Grein, O.: Schienenpersonenfernverkehr - Ein Beitrag zur Optimierung von Platzangebot und Zugkonfiguration, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 42(1993), H. 6, S. 409 - 414
- [184] Grigoriadou, M.; Braaksma, J. P.: Application of the Time-Space Concept in Analyzing Metro Station Platforms, in: ITE Journal, May 1986, S. 33 - 37
- [185] Grund, R.; Lindner, P.: ÖPNV-Technologieerprobung Krefeld, Teil I, in: Verkehr und Technik, 44(1991), H. 7, S. 277 - 280
- [186] Guenther, R. P.; Hamat, K.: Transit Dwell Time under Complex Fare Structure, in: Journal of Transportation Engineering, 114(1988), H. 3, S. 367 - 379
- [187] Habicht, T. A.; Braaksma, J. P.: Effective Width of Pedestrian Corridors, in: Journal of Transportation Engineering, 110(1984), H. 1, S. 80 - 93
- [188] Haenicke, W.: Der starre Fahrplan - Wünsche der Reisenden und Möglichkeiten der Betriebsführung, in: Internationales Archiv für Verkehrswesen, 3(1951), H. 8, S. 176 - 182
- [189] Hall, E. T.: Die Sprache des Raumes, Pädagogischer Verlag Schwann, Düsseldorf 1976
- [190] Hamburg Consult GmbH. Untersuchung über die Anordnung erhöhter Haltestellen für Busse, in: Forschung Stadtverkehr Heft 33, 1983, S. 32 - 34
- [191] Hankin, B.D.; Wright, R.A.: Passenger Flow in Subways, in: Operational Research Quarterly, 9(1958), H. 2, S. 81 - 88
- [192] Harland, D.G.; Jacoby, R.G.; Pickering, D.: Footways used by Cyclists and Pedestrians, in: Traffic Engineering & Control, 27(1986), May, S. 283 - 287
- [193] Harres, H.: Personen-Nahverkehr im Ballungsraum Ruhrgebiet, in: Eisenbahningenieur, 15 (1964), H. 1, S. 10 - 14
- [194] Harres, H.: Spezielle Fahrzeuge für den Einsatz im S-Bahnverkehr in Ballungsräumen, in: Eisenbahningenieur, 20(1969), H. 3, S. 67 - 70
- [195] Harris, Nigel G.: Capacity restraint Simulation in a Public Transport Environment, in: Traffic Engineering + Control, 30(1989), June, S. 312 - 315
- [196] Heidemann, C.: Über Gesetzmässigkeiten des Fussgängerverkehrs einer Einkaufsstrasse, in: Strassenverkehrstechnik, 11(1967), H. 5-6, S. 55 - 60
- [197] Heidemann, C.: Gesetzmässigkeiten städtischen Fussgängerverkehrs, Forschungsarbeiten aus dem Strassenwesen, Neue Folge Heft 68, Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg o.J.
- [198] Heilmann, W.: Simulation des Fahrtverlaufs im ÖPNV - Ein Hilfsmittel zur Planung und Bewertung des Fahrtverlaufs von Bussen und Strassenbahnen, in: Der Nahverkehr, 7(1989), H. 6, S. 73 - 76
- [199] Heinel, K.: Haben die heutigen U-Bahn- und U-Strab-Neubauten Zukunft? in: Verkehr und Technik, 23(1970), H. 5, S. 117 - 120
- [200] Helbling, D.: Models for Pedestrian Behavior, in: Natural Structures - Principles, Strategies and Models in Architecture and Nature; Proceedings of the II. International Symposium of the Sonderforschungsbereich 230, Stuttgart, 1.-4. Oktober 1991
- [201] Helbling, D.: A mathematical Model for the Behaviour of Pedestrians, in: Behavioral Science, 36(1991), S. 298 - 310
- [202] Helbling, D.: A fluid-dynamic Model for the Movement of Pedestrians, in: Complex Systems, 6(1992), S. 391 - 415
- [203] Herrmann, D.: Verbesserung der Betriebseigenschaften von Fahrtreppen durch Geschwindigkeitssteuerung, in: Verkehr und Technik, 39(1986), H. 1, S. 16 - 19
- [204] Heyden: Einführung der elektrischen Zugförderung auf den Berliner Stadt-, Ring- und Vorortsbahnen, in: Glasers Annalen, 22(1922), Oktober, S. 105 - 109
- [205] Hill, M. R.: Pedestrian Behaviour and Facilities Design, Selected Bibliography 1970-1975, Council of Planning Librarians, Exchange Bibliography, Monticello/Illinois, 1976
- [206] Hoel, L. A.: Pedestrian Travel Rates In Central Business Districts, in: Traffic Engineering, 39(1968), January, S. 10 - 13
- [207] Hoessly, J.: Halte- und Fahrzeitenuntersuchung rechtes Zürichseeufer, interner Bericht des Institutes für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau der ETH Zürich, Zürich 1993
- [208] Hollmann, W.; Hettinger, Th.: Sportmedizin - Arbeits- und Trainingsgrundlagen, F.K.Schattauer Verlag, Stuttgart/New York 1980
- [209] Hollmann, W.; Hettinger, Th.: Sportmedizin - Arbeits- und Trainingsgrundlagen, dritte Auflage, F.K.Schattauer Verlag, Stuttgart/New York 1990
- [210] Hölsken; Krug; Frederich; Böhm; Büsing; Zemlin; Ahlbrecht; Boisserée; Teubner: Untersuchung von Bedienungskonzepten für den Schienenverkehr der Stadt Frankfurt a.M., Ergebnisbericht, Aachen 1990
- [211] Hötge, D.: Die deutschen Strassenbahn-Gelenkwagen - Technik und Geschichte, Kohlhammer Edition Eisenbahn, Stuttgart/Berlin/Köln/Mainz, 1983

- [212] Homburger, W. S.; Keefer, L. E./McGrath, W. R.: Transportation and Traffic Engineering Handbook, second edition, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs (New Jersey, USA) 1982
- [213] Hondius, H.: ÖPNV-Niederflurfahrzeuge im Kommen; in: Stadtverkehr, 34(1989), H. 2, S. 7 - 18
- [214] Hondius, H.: ÖPNV-Niederflurfahrzeuge im Kommen (2), in: Stadtverkehr, 35(1990), H. 5, S. 12 - 38
- [215] Hondius, H.: Low-floor development out of control, in: Railway Gazette International, 145 (1991), November, S. 793 - 799
- [216] Hondius, H.: Ausländische Bushersteller rüsten für europäischen Markt, in: Der Nahverkehr, 10(1992), H. 8, S. 16 - 23
- [217] Hondius, H.: ÖPNV-Niederflur-Fahrzeuge im Kommen (3), in: Stadtverkehr, 37(1992), H. 3, S. 30 - 43; 37(1992), H. 4, S. 19 - 31
- [218] Hondius, H.: Servicebus-Konzept jetzt auch in Dänemark und Norwegen, in: Stadtverkehr, 37 (1992), H. 11-12, S. 20 - 25
- [219] Hondius, H.: All-low-floor cars dominate orders, in: Developing Metros 1993, S. 61 - 65
- [220] Hondius, H.: ÖPNV-Niederflur-Schienenfahrzeuge im Kommen (5), in: Stadtverkehr, 38(1993), H. 2, S. 8 - 23
- [221] Hondius, H.: ÖPNV-Niederflurfahrzeuge im Kommen (6), in: Stadtverkehr, 38(1993), H. 5, S. 36 - 43
- [222] Hoppe, H.: Nochmals: Gegenseitige Beeinflussung von Leichtbau und Beschleunigungsvermögen bei elektrischen Nahverkehrsbahnen in bezug auf die Energie-, Betriebs- und Investitionskosten, in: Verkehr und Technik, 18(1965), H. 8, S. 226 - 230
- [223] Hotop, R.; Lenz, K.-H.: Reisegeschwindigkeit in einer deutschen Grossstadt - Ein Vergleich zwischen Individualverkehr und öffentlichem Nahverkehr, in: Verkehr und Technik, 28(1975), H. 1, S. 23 - 28
- [224] Hurt, O.: Die S-Bahn-Planung in München - Zum Entwurf der Deutschen Bundesbahn, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 9(1960), H. 9, S. 369 - 383; 9(1960), H. 10, S. 439 - 451
- [225] Ibaragi, Y.; Uehara, T.; Todoriki, M.: Simulation of Passenger Flow in an Station, in: Quarterly Reports, Japanese National Railway, Railway Technical Research Institute, 13(1972), H. 4, S. 202 - 207
- [226] Iffländer, H.; Weidmann, U.: Niederflur - Vorteil für alle! - Untersuchungen des Fahrgastwechsels bei Niederflurfahrzeugen, in: Der Nahverkehr, 7(1989), H. 4, S. 71-77
- [227] Iffländer, H.; Weidmann, U.: Niederflur - Vorteil für alle/Antwort auf Einwendungen von Dr. Müller-Hellmann, in: Der Nahverkehr, 8(1990), H. 1, S. 65 - 66
- [228] ITE-Technical Council Committee 6Y-1: Levels of Service Provided by Urban Transportation Systems, in: Traffic Engineering, 47(1976), January, S. 30 - 35
- [229] ITE-Technical Council Committee 5-R: Characteristics and Service Requirements of Pedestrians and Pedestrian Facilities, Traffic Engineering, 47(1976), May, S. 34 - 45
- [230] ITE-Technical Council Committee 6Y-28: Pedestrian Planning Activities, in: ITE Journal, 57 (1986), June, S. 17 - 20
- [231] Jabez, A.: Simulating Passenger Flows, in: UTI, March/April 1991, S. 24 - 25
- [232] Jackson, R. I.; Simmons, J. B.; Louw, Th. J.: Guidelines for the Design of Bus Terminals and Bus Stations, in: Compendium of Technical Papers, Institute of Transportation Engineers, 54th annual Meeting, September 23-27, 1984, S. 20-11 - 20-16
- [233] Jäger, M.: Biomechanisches Modell des Menschen zur Analyse und Beurteilung der Belastung der Wirbelsäule bei der Handhabung von Lasten, Fortschrittberichte VDI, Reihe 17: Biotechnik, Nr. 33, VDI Verlag, Düsseldorf 1987
- [234] Jähnichen, W.: Aufbau eines behindertenfreundlichen Busverkehrssystems in Berlin, Teil II, in: Verkehr und Technik, 43(1990), H. 10, S. 372 - 376
- [235] Janetzki, G.; Riedel, R.: Analyse des Verkehrsverhaltens von Rollstuhlfahrern in der Stadt Leipzig, in: Die Strasse, 29(1989), H. 5, S. 133 - 139
- [236] Jenkins, I. A.: A comparison of several techniques for simulating bus routes, University of Newcastle upon Tyne, Transport Operations Research Group, Working Paper No. 14, January 1976
- [237] Jennings, N. H.; Dickins, J. H.: Computer Simulation of Peak Hour Operations in a Bus Terminal, in: Management Science, 5(1958), H. 1, S. 106 - 120
- [238] Johansson, B.: L'importance de la montée et de la descente dans la force d'attraction des transports en commun, Conseil de l'Europe, Conférence sur l'amélioration de la circulation et de la qualité de vie dans les grandes villes, Göteborg, 12-14 juin 1990, Documents de travail et conclusions, S. 186 - 194
- [239] Johansson, Th.: Neues aus Halmstad, Schweden, in: Stadtverkehr, 29(1984), H. 3, S. 110 - 111
- [240] Johansson, Th.: 70 neue Zweiachsobusse für Mailand, in: Stadtverkehr, 29(1984), H. 5-6, S. 194 - 197
- [241] Joss, E.: Wachstum und Entwicklung gesunder Kinder, in: Bachmann u.a.: Pädiatrie in Praxis und Klinik, Band III, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/New York 1980
- [242] Kelly, J.J.: Piccadilly Circus Pedestrian Study, Greater London Council, Departement of Planning and Transportation, Transportation Branch, London 1974

- [243] King, R.H.; Eagland, R.M.: Gloucester's Traffic and Transport Plan - Fair Treatment for the Pedestrians, in: *Traffic Engineering & Control*, 12(1971), January, S. 456-459
- [244] Kirchhoff, H.-H.; Köhler, U.: Lösungsansätze zur Verbesserung des Omnibusverkehrs in Hamburg, in: *Verkehr und Technik*, 34(1981), H. 2, S. 51 - 55; 34(1981), H. 3, S. 99 - 103; 34(1981), H. 4, S. 145 - 153; 34(1981), H. 5, S. 208
- [245] Kirchhoff, P.; Schulze, W.: Bewältigung von Störungen im Fahrtablauf, in: *Der Nahverkehr*, 0(1982), H. 0, S. 46 - 51
- [246] Kirchhoff, P.; Holz, S.: Optimierung der Fahrzeitvorgaben für Busse und Strassenbahnen - Festlegung der Fahrzeiten in Abhängigkeit von der Tageszeit, in: *Der Nahverkehr*, 5(1987), H. 3, S. 32 - 37
- [247] Kirsch, H.: Leistungsfähigkeit und Dimensionierung von Fussgängerüberwegen, in: *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik* 33, Bonn 1964
- [248] Kjellin, B.: The Bicycle in the Urban Traffic Network, in: *Compendium of Technical Papers*, Institute of Transportation Engineers, 46th annual Meeting, Baltimore/Maryland, August 15-19, 1976, S. 88 - 93
- [249] Kleinau, H.: Strassenbahnen ohne Schaffner, in: *Verkehr und Technik*, 17(1964), H. 4, S. 94 - 95
- [250] Knoblauch, R. L.; Tobey, H. N.; Shunaman, E. M.: Pedestrian Characteristics and Exposure Measures, in: *Transportation Research Record*, Nr. 959, S. 35 - 41, Washington D.C. 1984
- [251] Knoflacher, H. H.; Stephanides, J.: Systemspezifische Einflüsse auf die Aufenthaltsdauer von Straßenbahnen in Haltestellen, in: *Verkehr+Technik*, 36(1983), H. 2, S. 46 - 50
- [252] Knopp, H.-J.: Fahrgast und Fahrzeugbau - Auswirkungen des Fahrgastverhaltens auf den Schienen-Fahrzeugbau im SPNV, in: *Der Nahverkehr*, 11(1993), H. 5, S. 56 - 62
- [253] Kochevar, R. A.; Lalani, N.: How long should a safe Pedestrian Clearance Intervall be? in: *ITE Journal*, May 1985, S. 30 - 32, 49
- [254] Koenig, G. K.: Il tram a pianale ribassato: storia e sviluppi, in: *Ingegneria Ferroviaria*, 40(1985), H. 5, S. 223 - 241
- [255] Koffman, J. L.: Der "Birney"-Einmann-Sicherheitswagen, in *Strassenbahn-Magazin* 44, Mai 1982, S. 119 - 127
- [256] Koffman, J. L.: Der Montrealer PAYE-Wagen, in: *Strassenbahn-Magazin* 47, Februar 1983, S. 63 - 68
- [257] Koffman, J. L.: Die Z- und Brückenwagen, Vorläufer der Grossraumwagen, in: *Stadtverkehr*, 28(1983), H. 11-12, S. 476 - 479
- [258] Koffman, J. L.: Losradlaufwerke, in: *Der Stadtverkehr*, 29(1984), H. 3, S. 118 - 122
- [259] Koffman, J. L.: Drei Strassenbahnpioniere - Ein Beitrag zur Geschichte des Fahrgastflusses bei der Strassenbahn, in: *Strassenbahn-Magazin* 53, August 1984, S. 195 - 215
- [260] Koffman, J. L.: Aus den Anfängen des amerikanischen Gelenkwagenbaus, in: *Strassenbahn-Magazin* 59, 1986, S. 52 - 64
- [261] Koffman, Jury Leonid: Der Weg zum leichten Niederflur-Wagen, in: *Stadtverkehr*, 36(1991), H. 10, S. 37 - 43
- [262] Korn, M.: Eine Dokumentation zur EDV-gestützten Fahrplananalyse, in: *Der Nahverkehr*, 3(1985), H. 1, S. 77 - 80
- [263] Korn, M.: Fahrplandatenanalyse - Fahrgastzählung, in: *Der Nahverkehr*, 8(1990), H. 3, S. 77 - 80
- [264] Köröndi, G.: Lösungsansätze zur Rollstuhlfahrerbeförderung im ÖPNV, in: *Verkehr und Technik*, 41(1988), H. 2, S. 39 - 48
- [265] Körsten, R.: Bevorrechtigung des Busses an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten durch regelungstechnische Massnahmen, in: *Die Strasse*, 15(1975), H. 6, S. 224 - 228
- [266] Körsten, R.: Beurteilung von Strassenbahnhaltestellen in Fahrbahnlage, in: *Die Strasse*, 17(1977), H. 8, S. 312 - 315
- [267] Körsten, R.; Schiller, M.: Kriterien zur Anlage von Bushaldebuchten, in: *Die Strasse*, 18(1978), H. 9, S. 297 - 299
- [268] Kracke: Untersuchung von Stauerscheinungen an Personenverkehrsanlagen auf Bahnhöfen unter Berücksichtigung der Gestaltung von Umsteigeanlagen und Übergangsstellen zum Individualverkehrs, in: *Forschung Stadtverkehr* 3, April 1971, S. 23 - 26
- [269] Kraft, W. H.; Boardman, Th. J.: Predicting Bus Passenger Service Time, in: *Traffic Engineering*, 40(1969), October, S. 16 - 20
- [270] Kraft, W. H.; Boardman, T. J.: Predicting Bus Passenger Service Time, in: *Traffic Engineering*, 41(1970), February, S. 36 - 40
- [271] Krämer, H.: Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Fahrtreppen, in: *Strassenverkehrstechnik*, 13(1969), H. 5, S. 151 - 152
- [272] Krämer, H. W.; Sprenger, J.: Das Demonstrationsvorhaben Busverkehrssystem Lübeck - Bilanz und kritischer Rückblick auf den Projektablauf, in: *Der Nahverkehr*, 10(1992), H. 1, S. 14 - 22
- [273] Krämer, H.: BO Kraft, Textausgabe mit Erläuterungen, 7. Auflage, Verkehrs-Verlag J. Fischer, Düsseldorf 1991

- [274] Krampe, H.: Simulation zur Bemessung spezieller Stauräume in Transportsystemen, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 26 (1979), H. 1, S. 13 - 20
- [275] Krell, K.: Möglichkeiten zur Steigerung der Reisegeschwindigkeit von S- und U-Bahnen, in: Stadtverkehr, 19(1964), H. 2, S. 46 - 50
- [276] Krell, K.: U- und S-Bahn-Haltestellen mit starkem Fahrgastwechsel, in: Der Tiefbau 3/1964, S. 186 - 196
- [277] Krell, K.: Der Einfluss von Verzögerungen, Beschleunigungen und Abstandssicherung auf die Mindestzugfolgezeit von S- und U-Bahnen, in: Verkehr und Technik, 17(1964), H. 12, S. 333 - 334; 18(1965), H. 2, S. 48 - 50
- [278] Krobot; Slezak; Sternhart: Strassenbahn in Wien - vorgestern und übermorgen, Verlag Josef Otto Slezak, Wien 1972
- [279] Kröh, J.: Bay Area Rapid Transit (BART), Teil II, in: Verkehr und Technik, 35(1982), H. 9, S. 319 - 324
- [280] Krug, St.: Ein interaktives Programmsystem zur Angebotsplanung für den liniengebundenen öffentlichen Personennahverkehr, Dissertation an der Technischen Universität Carolo Wilhelmina Braunschweig, Braunschweig 1987
- [281] Krug, W.: Einfluss der Strassenbahn auf die Leistungsfähigkeit signal geregelter Knotenpunkte, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik Heft 41, Bonn 1965
- [282] Krüger, Th.; Dannehl, A.: Konzept für Doppelstocktriebwagen - Fahrzeugarten in Deutschland, Europa und Übersee, in: Eisenbahningenieur, 43(1992), H. 8, S. 481 - 485
- [283] Kunath, H.: Erfahrungen eines Rollstuhlfahrers, in: Die Strasse, 27(1987), H. 4, S. 106 - 108
- [284] Kwo, T.T.: A Theory of Conveyors, in: Management Science, 5(1958), H. 1, S. 51 - 71
- [285] Lachmann, P.: Fussgängerorientierte Dimensionierung von Mischverkehrsflächen, in: Die Strasse, 27(1987), H. 2, S. 40 - 42
- [286] Lambert, M.; Perron, A.; Leutourneur, M.: Le tramway de l'agglomération grenobloise et les aménagements urbains, in: Transport Environnement Circulation No 78, septembre/octobre 1986, S. 19 - 23
- [287] Lane, R.: Introduction to Traffic Engineering, part 4: Road Capacity, in: Traffic Engineering & Control, 9(1968), January, S. 440 - 443
- [288] Laterveer, J.P.: Evaluatie rapport Grenoble rijtuignumner 2020 bij RET van 11 juli tot en met 22 augustus 1988, interner Arbeitsbericht Rotterdamse Elektrische Tram RET, Rotterdam, November 1988
- [289] Laurien, F.; Steierwald, G.: Über die Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauchs von der Änderung der Reisegeschwindigkeit durch Haltestellenaufenthalte, in: Nahverkehrspraxis, 13(1965), H. 1, S. 11 - 12
- [290] Lautso, K.; Pentti, M.: A Study of Pedestrian Traffic in Helsinki: Methodes and Results, in: Traffic Engineering & Control, 15(1974), January, S. 446 - 449
- [291] Lehmann, H.: Verkehrliche Auswirkungen von Verspätungen, in: Verkehr und Technik, 21 (1968), H. 3, S. 57 - 58
- [292] Lehmann, H.: Erfahrungen mit dem schaffnerlosen Strassenbahnbetrieb in Hannover, in: Verkehr und Technik, 21(1968), H. 6, S. 141 - 143
- [293] Lehmann, H.: Nochmals: Verkehrliche Auswirkungen der Verspätungen, in: Verkehr und Technik, 21(1968), H. 12, S. 324, 326
- [294] Lehmann, P.: Das Würzburger Konzept für Strassenbahn-Niederflurwagen; in: Der Nahverkehr, 6(1988), H. 4, S. 32 - 40
- [295] Lehotzky, P.: Niederflur-Strassenbahn-System für Wien - SGP, Elin und Siemens sind die erfolgreichen Anbieter, in: Der Nahverkehr, 11(1993), H. 5, S. 63 - 73
- [296] Leibbrand, K.: Verkehrsingenieurwesen - Städtische Verkehrsplanungen für Schiene und Strasse, Birkhäuser-Verlag, Basel 1957
- [297] Leibbrand, K.: Stadt und Verkehr - Theorie und Praxis der städtischen Verkehrsplanung, Birkhäuser Verlag, Basel/Boston/Stuttgart 1980
- [298] Leiner, A.: Möglichkeiten zur Beschleunigung des Fahrgastwechsels bei öffentlichen Verkehrsmitteln, Diplomarbeit am Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart, Stuttgart 1983
- [299] Lenk, L.; Proksch, F.: Neue Fahrwerke zur Niveauabsenkung des Fahrgastfussbodens bei schienengeführten Stadtverkehrsmitteln, in: ZEV+DET - Glasers Annalen, 116(1992), H. 8-9, S. 333 - 342
- [300] Lenke, P.: Fussgängerbereiche als Planungselement für den öffentlichen Nahverkehr, in: Verkehr und Technik, 24(1971), H. 2, S. 67 - 70, 24(1971), H. 3, S. 96 - 102
- [301] Leonhardt, B.: Erste Erhebungsergebnisse des Fussgängerverkehrs in Dresdner Neubaugebieten, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 28(1981), H. 2, S. 411 - 414
- [302] Leung, W.S.; Lau, C.C.: A new Study of the Traffic Flow/Concentration Relationship, in: Traffic Engineering & Control, 16(1975), September, S. 386 - 387
- [303] Lewis, P.A.: The Interpretation and Use of Speed/Flow Relationships for Transport Planners, in: Traffic Engineering & Control, 21(1980), June, S. 304 - 309

- [304] Lindner, P.: Beschleunigungsmassnahmen als wichtiges Element integrierten Verkehrsmanagements, in: *Verkehr und Technik*, 41(1988), H. 6, S. 251 - 253
- [305] Lippacher, K.: Gegenseitige Beeinflussung von Leichtbau und Beschleunigungsvermögen bei elektrischen Nahverkehrsbahnen in bezug auf die Energie-, Betriebs- und Investitionskosten, in: *Verkehr und Technik*, 17(1964), H. 11, S. 296 - 302
- [306] Lippacher, K.: Einfache Berechnungsgrundlagen für den Vergleich und Entwurf von U-Bahn-ähnlichen Fahrzeugen, in: *nahverkehrspraxis*, 17(1969), H. 1, S. 10 - 15
- [307] Lohrmann, K.-D.; Möbus, F.: Beschleunigungsmassnahmen bei der Stadtbahn Stuttgart - Systemparameter Fahrzeug, Fahrweg und Fahrbetrieb mit unterschiedlicher Beschleunigungswirkung, in: *Der Nahverkehr*, 11(1993), H. 4, S. 31 - 38
- [308] Losa, P.: Tram articolato a pavimento ribassato, in: *Ingegneria Ferroviaria*, 40(1985), H. 5, S. 250 - 257
- [309] Lübbecke, G.: Für welche Verkehrsgrößen sollen die Personenverkehrsanlagen der Deutschen Bundesbahn bemessen werden? in: *Internationales Archiv für Verkehrswesen*, 3(1951), H. 24, S. 563 - 573
- [310] Machtemes, A.: Raum für Fussgänger - Ein Beitrag zur Stadtplanung, Materialbände I und II, Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung des Landes Nordrhein-Westfalen, Essen 1976
- [311] Mäcke, P.: Moderne Schienenverkehrsmittel für den Nahverkehr in Ballungsräumen, Schriftenreihe des Instituts für Stadtbauwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Heft 13, 1969
- [312] Magaria, R.: *Biomechanics and energetics of muscular exercise*, Oxford University Press, Oxford 1976
- [313] Mandel, G.: Betriebsgerechte Gestaltung beim Bau von Haltestellen in der zweiten Verkehrsebene, Schriftenreihe für Verkehr und Technik, Heft 27, S. 53 - 61, Bielefeld 1966
- [314] Matthaeus, W.-E.: Der Ring schliesst sich - Die Berliner S-Bahn, in: *Die Deutsche Bahn*, 68(1992), H. 8, S. 887 - 892
- [315] Maurer, J. J.; Schmidt, R.: Neue Doppelstockwagen für den Wendezugbetrieb der Niederländischen Eisenbahn (NS); in: *ZEV-Glasers Annalen*, 109(1985), H. 12, S. 470 - 481
- [316] Maurer, W.: *Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung*, Vorlesung an der ETH Zürich, Zürich 1984
- [317] Mayer, L.: *Impianti ferroviari - tecnica ed esercizio*, Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani, Roma 1986
- [318] Menzel, J.: Der Triebwagen als Einheitsfahrzeug für den Nahverkehr, in: *Eisenbahningenieur*, 20(1969), H. 3, S. 85 - 90
- [319] Menzel, J.: Betrieb und Vorhaltung von Verkehrsfahrtreppen bei der Deutschen Bundesbahn sowie technische Neuerungen, in: *Eisenbahningenieur*, 33(1982), H. 8, S. 343 - 353
- [320] Menzer, E. u.a.: *Transporttechnologie Eisenbahn*, Band 1, VEB transpress, Berlin, 1985
- [321] Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners: *Pedestrian Planning and Design Seminar Proceedings*, New York February 28-29, 1972
- [322] Meyer-Benz, A.: Die Haltestelle als Visitenkarte - Corporate Identity und Corporate Design beim Nahverkehr Hohenlohekreis, in: *Der Nahverkehr*, 11(1993), H. 6, S. 77 - 79
- [323] Meyer-Plate, E.: Erfahrungen mit dem schaffnerlosen Strassenbahnbetrieb in Hannover, in: *Verkehr und Technik*, 21(1968), H. 8, S. 199 - 202
- [324] Meyer, H.-U.: Einfluss der Blocksysteme und Zugdaten auf die Zugfolge von Stadtbahnen, in: *Verkehr und Technik*, 25(1972), H. 1, S. 7 - 11
- [325] Meyer, H.-U.: Der Rückstau durch Langsamfahrstellen bei verschiedenen Signalsystemen, in: *Verkehr und Technik*, 25(1972), H. 9, S. 387 - 388
- [326] Meyer, H.-U.: Einfluss der Zugdaten und Signalsysteme auf die Folgeverspätung bei Stadtbahnen, in: *Verkehr und Technik*, 28(1975), H. 6, S. 235 - 237
- [327] Meyer, L. u.a.: In Bremen: Beschleunigung des Strassenbahn-Betriebs - Verkehrsabhängige Steuerung mit Strassenbahnbeeinflussung an Lichtsignalanlagen, in: *Der Nahverkehr*, 7(1989), H. 5, S. 26 - 34
- [328] Meyer, W.: Städtebauliche Integration von Haltestellen im Oberflächenverkehr - Nicht mehr reine Verkehrsfunktion - offene Fragen der Finanzierung, in: *Der Nahverkehr*, 8(1990), H. 4, S. 31 - 41
- [329] Michalopoulos, P. G.: Bus Priority System Studies, in: *Compendium of Technical Papers*, Institute of Transportation Engineers, 46th annual Meeting, Baltimore/Maryland, August 15-19, 1976, S. 2 - 7
- [330] Molino, N.: *Treni navetta FS*, Edizioni Gulliver, Torino 1992
- [331] Monheim, R.: Fussgängerbereiche und Fussgängerverkehr in Stadtzentren in der Bundesrepublik Deutschland, *Bonner Geographische Abhandlungen*, Heft 64, Ferd. Dümmers Verlag, Bonn 1980
- [332] Monheim, R.: Analyse von Tätigkeiten und Wegen in der Stadt - Neue Möglichkeiten für den modal-split, in: *Verkehr und Technik*, 38(1985), H. 8, S. 267 - 270; 38(1985), H. 9, S. 324 - 330
- [333] Moosmang, H.: Betrachtungen über Sitzanordnungen in Linienbussen, in: *Verkehr und Technik*, 18(1965), H. 6-7, S. 168 - 170

- [334] Morecki, A. (Herausgeber): Biomechanics of Motion, International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures No 263, Springer-Verlag, Wien/New York 1980
- [335] Mühe, P.: Arbeitsplatz Nutzfahrzeug - Ein Beitrag zur Sicherheit, in: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 5/1989, S. 138 - 142
- [336] Müller-Hellmann, A.: Einwendungen zu Artikel von Iffländer/Weidmann (Der Nahverkehr 4/1989), in: Der Nahverkehr, 7(1989), H. 5, S. 80 - 81
- [337] Müller-Hellmann, Dr. A.: Niederflur-Stadtbahnwagen - eine neue Fahrzeuggeneration, Vorträge der ETG-Fachtagung vom 13. bis 14. März 1990 in Kassel, VDE-Verlag, Berlin/Offenbach 1990
- [338] Müller-Hellmann, A.: Europäische Firmen präsentieren Niederflur-Bahnfahrzeug-Konzepte, in: Der Nahverkehr, 8(1990), H. 6, S. 17 - 24
- [339] Müller-Hellmann, A.: Niederflurbauweise stimuliert die Entwicklung neuer Fahrwerks- und Antriebstechnologien für Nahverkehrsschienenfahrzeuge, in: Elektrische Bahnen, 89(1991), H. 6, S. 178 - 185
- [340] Müller-Hellmann, A.: Entwicklungslinien von Nahverkehrsschienenfahrzeugen, in: Elektrische Bahnen, 90(1992), H. 10, S. 308 - 312
- [341] Müller-Hellmann, A.: Neue Rolle für ein traditionsreiches Verkehrsmittel - Quo vadis Strassenbahn? in: Internationales Verkehrswesen, 45(1993), H. 1-2, S. 61 - 68
- [342] Müller, A.: Über die Wahl des mittleren Haltestellenabstandes bei elektrischen Strassenbahnen, in: Elektrotechnik und Maschinenbau, 35(1917), H. 37, S. 448 - 450
- [343] Müller, H.: Fahrplanabhängigkeit des Fahrgastzuflusses zu Haltestellen, IVT-Bericht Nr. 81/5, IVT-ETHZ, Zürich 1981
- [344] Müller, H.; Amacker, H.: Konzept einer Untersuchung über Phänomene des Fahrgastwechsels im ÖPNV, interner Arbeitsbericht des Instituts für Verkehrsplanung und Transporttechnik, Zürich 1984
- [345] Müller, K.: Die Doppelstockwagen der Französischen Staatsbahnen, in: ZEV-Glasers Annalen, 108(1984), H. 7-8, S. 216 - 219
- [346] Müller-Hillebrand, M.: Die Gesetzmässigkeit der Verkehrsstrombildung, in: Eisenbahningenieur, 15(1964), H. 12, S. 317 - 324
- [347] Müller, M.: Fahrtreppen und Fahrsteige in Stadtbahn- und U-Bahn-Haltestellen - Eine Erhebung des VÖV-Ausschusses für Bahnbau, in: Der Nahverkehr, 5(1987), H. 6, S. 26 - 32
- [348] Müller, R.: Pedestrian Volume and Speed Characteristics - A Thesis presented to the Faculty of the Bureau of Highway Traffic, Yale University, Yale 1968
- [349] Müller, S.; Uhlig, W.-R.: Dimensionierung von Personenverkehrswegen in Reiseverkehrsanlagen, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 32(1985), H. 5, S. 873 - 885
- [350] Nasemann, G.: Einmann-Strassenbahn-Gelenkwagen mit Fahrgastselbstbedienung, in: Nahverkehrspraxis, 13(1965), H. 11, S. 447 - 449
- [351] Nasemann, G.: Durch Fahrgastselbstbedienung zum schaffnerlosen Betrieb, Schriftenreihe für Verkehr und Technik, Heft 27, S. 33 - 38, Bielefeld 1966
- [352] Navin, F. P. D.; Wheeler, R. J.: Pedestrian Flow Characteristics, in: Traffic Engineering, 40 (1969), June, S. 30 - 36
- [353] NEOPLAN/Gottlob Auwärter GmbH & Co.: NEOPLAN Niederflurbusse auf einen Blick, Stuttgart 1992
- [354] Ness, M.P.; Morrall, J.F.; Hutchinson, B.G.: An Analysis of Central Business District Pedestrian Circulation Patterns, in: Highway Research Record 283, S. 11 - 18, Washington D.C. 1969
- [355] Newell, G. F.; Potts, R. B.: Maintaining a Bus Schedule, in: Australian Road Research Board, Proceedings 1964, Volume 2, Part 1, S. 388 - 393
- [356] Newell, G.F.: Control of Pairing of Vehicles on a Public Transportation Route, Two Vehicles, One Control Point, in: Transportation Science, 8(1974), H. 3, S. 248 - 264
- [357] Newell, G.F.: Applications of Queueing Theory, second edition, Chapman and Hall, London/New York 1982
- [358] Newland, R.M.: Driver Eye Level and Road Safety, in: International Road Safety and Traffic Review, 14(1966), H. 3, S. 26 - 35
- [359] Niemitz, K.: Planungsüberlegungen für elektrische Tunnelbahnen und ihre Triebwagen, in: ZEV-Glasers Annalen, 91(1967), H. 9, S. 275 - 280, 286
- [360] Oeding, D.: Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fussgängerverkehrs, Dissertation an der Technischen Hochschule Carolo-Wilhelmina Braunschweig, Braunschweig 1963
- [361] Offner, J.-M.: Les Déplacements Piétonniers, analyse bibliographique, Institut de Recherche des Transports, note d'information No 20, Arcueil/F 1981
- [362] O'Flaherty, C.A.; Parkinson, M.H.: Movement on a City Centre Footway, in: Traffic Engineering & Control, 13(1972), February, S. 434 - 438
- [363] Older, S.J.: Movement of Pedestrians on Footways in Shopping Streets, in: Traffic Engineering & Control, 9(1968), August, S. 160 - 163

- [364] Oplatka, G.: Die Steigerung der Förderleistung von Pendelbahnen / Optimizing on the Transport Capacity of Reversible Aerial Tramways, in: Internationale Seilbahn-Rundschau/Seilförderanlagen, 1973
- [365] Oswald, G.: Behinderte im Strassenverkehr - Arbeitsbericht des Instituts für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau an der ETH Zürich, Dezember 1986
- [366] Otto, D.: Verkehrserzeugungsmodell zur Quantifizierung des Fussgängerverkehrsaufkommens, in: Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 279, Bonn 1980
- [367] Pahl, H.: Der Stadtlinien-Omnibusverkehr in Kiel, in: Stadtverkehr, 30(1985), H. 8, S. 281 - 287
- [368] Pampel, F.: Zum Thema "Vereinheitlichung von Schnellbahnwagen", in: Verkehr und Technik, 23(1970), H. 4, S. 92 - 95
- [369] Pampel, F.; Bugarcic, H.; Runkel, M.: Der Einfluss der Fahrzeuggrösse auf die Betriebskostenstruktur im Schnellbahnverkehr, in: Verkehr und Technik, 28(1975), H. 11, S. 401 - 425
- [370] Pasricha, P.S.: Pedestrian Planning in Greater Bombay, in: Traffic Engineering & Control, 24(1983), February, S. 62 - 67
- [371] Petersen, St. G.; Braswell, R. H.: Planning and Design Guidelines for Mode Transfer Facilities, in: Traffic Quarterly, 26(1972), July, S. 405 - 423
- [372] Pfeifer, H.: Fussgängerverkehr in Städten, in: Die Strasse, 8(1968), H. 7, Juli 1968, S. 321 - 327
- [373] Pieper, F.; Jencke, P.; Lindner, P.: Kosten-Nutzen-Untersuchung eines Integrierten Beschleunigungssystems, in: Der Nahverkehr, 5(1987), H. 4, S. 24 - 31
- [374] Pieper, F. u.a.: Integriertes Beschleunigungssystem Mittleres Ruhrgebiet, in: Verkehr und Technik, 42(1989), H. 10, S. 381 - 382; 42(1989), H. 11, S. 425 - 426
- [375] Pieper, F. u.a.: Das Beschleunigungsprogramm der BOGESTRA - Bericht über Zwischenergebnisse und das weitere Vorgehen, in: Der Nahverkehr, 9(1991), H. 2, S. 36 - 42
- [376] Pieper, F.: Beschleunigungsmassnahmen im ÖPNV, Vortrag zum VSVI-Seminar am 20. Januar 1992 in Bergisch Gladbach, Bochum 1992
- [377] Pierick: Verspätungsübertragung im Taktfahrplan, in: Forschung Stadtverkehr, Heft 21, 1977, S. 53 - 55
- [378] Piper, H. P.: Berechnung des Verkehrsflusses in Abflughallen, in: Internationales Verkehrswesen, 41(1989), H. 6, S. 424 - 426
- [379] Plag, P.: Entwicklung und Ausbildung der Fahrtreppe, in: Eisenbahningenieur, 20(1969), H. 11, S. 315 - 320
- [380] Planell, F.: Der neue Abschnitt Sagrera-Horta der Untergrundbahn von Barcelona, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 9(1960), H. 7, S. 312 - 318
- [381] Planungsgesellschaft Ruhr: Untersuchung über die Mitnahme von Gepäck im Nahverkehr (im Fahrzeug und an Übergangs- und Umsteigestellen), in: Forschung Stadtverkehr, Heft 2, November 1970, S. 32 - 34
- [382] Plewes, J. C.; Yeates, M. H.: The Urban Rush Hour: An Analysis of the Yonge Street, Toronto Subway System, in: Traffic Quarterly, 26(1972), April, S. 209 - 229
- [383] Polus, A.; Schofer, J. L.; Ushpiz, A.: Pedestrian Flow and Level of Service, in: Journal of Transportation Engineering, 109(1983), H. 1, S. 46 - 56
- [384] Porombka, Th.; Auerbacher, J.: Entwurfs- und Bewertungskriterien für schienengebundene Nahverkehrsfahrzeuge, in: Verkehr und Technik, 34(1981), H. 8, S. 321 - 336 (Teil I); 34(1981), H. 10, S. 418 - 424 (Teil II)
- [385] Pottgiesser, H.: V-Bahnen aus der Sicht des Eisenbahnbetriebes, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 15(1966), H. 8, S. 288 - 302
- [386] Pottgiesser, H.: Allgemeine betriebliche Probleme des Nahschnellverkehrs der DB in den Ballungsräumen, in: Die Bundesbahn, 45(1969), H. 21-22, S. 1003 - 1012
- [387] Potthoff, G.: Verteilung der Beförderungsweiten im städtischen Nahverkehr, in: Deutsche Eisenbahntechnik 12/1968, S. 583 - 584
- [388] Potthoff, G.: Verkehrsströmungslehre, Band 3: Die Verkehrsströme im Netz, VEB transpress, Berlin 1969
- [389] Potthoff, G.: Verkehrsströmungslehre, Band 5: Bedienungstheorie, VEB transpress, Berlin 1975
- [390] Potthoff, G.: Verkehrsströmungslehre, Band 1: Die Zugfolge auf Strecken und in Bahnhöfen, VEB transpress, Berlin 1980
- [391] Prasse, W.: Vortrag anlässlich der Arbeitstagung "Mittel und Wege zur Beschleunigung der Fahrgastabfertigung" des Verbandes öffentlicher Verkehrsbetriebe, Kassel, 28. Juni 1956
- [392] Pretty, Robert Lindsay: The Delay to Vehicles and Pedestrians at signalized Intersections, in: ITE Journal, May 1979, S. 20 - 23
- [393] Preuss, E.; Preuss, R.: Lexikon Erfinder und Erfindungen - Eisenbahn, R.v.Decker's/G.Schenk GmbH, Heidelberg 1986
- [394] Prinzing, R.: Lebensalter und physiologische Zeit - Messung der Lebensdauer in biologischen Systemen, Neue Zürcher Zeitung Nr. 30/1991, 6. Februar 1991
- [395] Prokop, L.: Einführung in die Sportmedizin für Ärzte, Sportler und Übungsleiter, 3. bearbeitete Auflage, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/New York 1983

- [396] Proske, M.; Weber, M.: Die neue Stadtbahn Bielefeld - Ziele, Planung, Aufbau und Betriebserfahrungen mit dem neuen Verkehrssystem, in: Der Nahverkehr, 11(1993), H. 6, S. 10 - 18
- [397] Prusa, W.: Berechnung der Busfahrtkosten unter Berücksichtigung der spezifizierten Dienstplan- und Fahrplanwirkungsgrade, in: Verkehr und Technik, 34(1981), H. 11, S. 474 - 475
- [398] Prusa, W.: Die Gestaltung der Kraftomnibus-Innenräume - Verkehrsphysiologische und verkehrspsychologische Kriterien, in: Die Bundesbahn, 63(1987), H. 9
- [399] Pushkarev, B.; Zupan, J. M.: Urban Space for Pedestrians - A Report of the Regional Plan Association, The MIT Press Cambridge/Massachusetts and London/England, 1975
- [400] Rabe, U.; Wegener, B.: Fusswege zu den Zugangsstellen des öffentlichen Personennahverkehrs - Näherungsverfahren zur Gewinnung von Eingabedaten für Netzberechnungen mit EDVA, in: Die Strasse, 13(1973), H. 10, S. 407 - 411, 426
- [401] Rabe, U.: Bewertung städtischer Verkehrssysteme für den öffentlichen Personenverkehr, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 22(1975), H. 1, S. 215 - 220
- [402] Rabisch, B.-M.; Rüger, S.: Mehrfache Zugfolgezeiten im städtischen Nahverkehr, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 22(1975), H. 4-5, S. 905 - 908
- [403] Rappenglück, W.: Konstruktion der Fahrzeuge für den Nahverkehr bei der DB, in: Eisenbahningenieur, 20(1969), H. 3, S. 76 - 82
- [404] Rappenglück, W.: Neue Triebzüge der Deutschen Bundesbahn für Ballungsräume, in: Elektrische Bahnen, 40(1969), H. 11, S. 244 - 254
- [405] Rappenglück, W.: Neuzzeitliche Nahverkehrstriebfahrzeuge auf Vollbahnstrecken, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 21(1972), H. 6, S. 234 - 243
- [406] Rappenglück, W.: 10 Jahre S-Bahn-Triebzüge 420; in: Eisenbahntechnische Rundschau, 30(1981), H. 5, S. 415 - 427
- [407] Regierungsrat des Kantons Basel-Stadt: Ratschlag betreffend die Beschaffung von 12 Niederflur-Gelenkbussen für die Basler Verkehrsbetriebe vom 8. November 1990
- [408] Reimer, K.: Die Bewegung der Menschenmassen in Verkehrsräumen, in: Glasers Annalen, 71(1947), H. 7, S. 121 - 131
- [409] Reimer, K.: Das Problem des raschen Fahrgastwechsels bei städtischen Verkehrsmitteln, in: Glasers Annalen, 73(1949), H. 11, S. 198 - 202; 73(1949), H. 12, S. 217 - 219
- [410] Reimer, K.: Beförderungsleistung von Rolltreppen, in: Internationales Archiv für Verkehrswesen, 2(1950), H. 23, S. 533 - 538
- [411] Reimer, K.: Bewegungsvorgänge auf Bahnsteigen des grossstädtischen Schnellverkehrs, in: Glasers Annalen, 77(1953), H. 11, S. 338 - 341
- [412] Reimer, K.: Fahrgastwechsel im Städte-Schnellverkehr, in: Glasers Annalen, 81(1957), H. 5, S. 146 - 148
- [413] Reinhardt, W.: Beschleunigungsmassnahmen im öffentlichen Personennahverkehr, in: Verkehr und Technik, 38(1985), H. 8, S. 285 - 288
- [414] Reiss, M. L.: Young Pedestrian Behavior, in: Transportation Engineering, 48(1977), October, S. 40 - 44
- [415] Reitmayer, U.: Holztreppe in handwerklicher Konstruktion, 3. Auflage, Julius Hoffmann Verlag, Stuttgart 1986
- [416] Remmele, P.; Seybold, B.: NeXTRuessel - Programm zur Ermittlung von Fahrgastwechselzeiten bei öffentlichen Verkehrsmitteln, Nebenfach-Semesterarbeit WS 1992/93 an der ETH Zürich, Bericht vom 25. Februar 1993
- [417] Retzko, H.-G.; Androsch, W.: Pedestrian Behaviour at signalised Intersections, in: Traffic Engineering & Control, 15(1974), August-September, S. 735-738
- [418] Rice, Ph.: Capacity Requirements for Local Bus Terminals, in: Compendium of Technical Papers, Institute of Transportation Engineers, 46th annual Meeting, Baltimore/Maryland, August 15-19, 1976, S. 100 - 104
- [419] Riedel, K.: Zur Ermittlung des zweckmässigsten Haltestellenabstandes grossstädtischer Verkehrsmittel, in: Internationales Archiv für Verkehrswesen, 9(1957), H. 24, S. 557 - 561
- [420] Rizzi, M.; Saporito, A.: Variations de temps de parcours et changements de tableau de marche, in: Transport Environnement Circulation No 75, mars/avril 1986, S. 34 - 40
- [421] Rizzi, M.: La régulation des autobus en ligne - Approche théorique et algorithmes, in: Transport Environnement Circulation No 89, juillet/aout 1988, S. 18 - 22
- [422] Rizzi M.: Le graphicage des lignes d'autobus - Comment déterminer l'intervalle, in: Transport Environnement Circulation No 89, juillet/aout 1988, S. 23 - 28
- [423] Rohmert, W.; Rutenfranz, J.: Praktische Arbeitsphysiologie, 3. neubearbeitete Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart/New York 1983
- [424] Rossberg, R. R. (Herausgeber): Deutsche Eisenbahnfahrzeuge von 1838 bis heute, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1988
- [425] Rüger, S.: Betriebstechnologie städtischer öffentlicher Personenverkehr, transpress-Verlag, Berlin 1974
- [426] Rüger, S.: Koordinierte Lichtsignalanlagen und öffentlicher Nahverkehr, in: Die Strasse, 15 (1975), H. 1, S. 4 - 6

- [427] Rüger, S.: Betriebsablauf öffentlicher Verkehrsmittel an Lichtsignalanlagen, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 25(1978), H. 3, S. 523 - 529
- [428] Rüger, S.: Einfluss von Lichtsignalanlagen auf die Reisegeschwindigkeit des ÖPNV, in: Die Strasse, 18(1978), H. 10-11, S. 339 - 342
- [429] Rüger, S.: Zur Entwicklung der Theorie der Durchlassfähigkeit für städtische öffentliche Verkehrsmittel, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 26(1979), H. 1, S. 25 - 28
- [430] Rüger, S.: Ein mathematisches Modell für die Ankunftshäufigkeiten von Strassenbahnen und seine Anwendung zum Beschreiben der Qualität des Betriebsablaufs an Knotenpunkten, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 27(1980), H. 4, S. 687 - 694
- [431] Rüger, S.; Thomsch, K.: Möglichkeiten zur Energieeinsparung bei Strassenbahnen durch Einsatz von Bordrechnern, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 30(1983), H. 4, S. 831 - 837
- [432] Rüger, S.: Analyse des Betriebsablaufes an einer Strassenbahn-Haltestelle nach einer sportlichen Grossveranstaltung, in: Die Strasse, 24(1984), H. 5, S. 134 - 137
- [433] Runkel, M.: Die funktionsgerechte Gestaltung von Stadtbahnfahrzeugen, in: nahverkehrspraxis, 20(1972), H. 4, S. 160 - 163 (Teil I); 20(1972), H. 5, S. 194 - 197 (Teil II)
- [434] Runkel, M.: Fahrzeuge im öffentlichen Personennahverkehr für Regionalbahnen, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 22(1973), H. 3, S. 104 - 114
- [435] Runkel, M.: Grundsätze für die Gestaltung von Zugangsanlagen in Schnellbahnhaltestellen, in: Verkehr und Technik, 26(1973), H. 7, S. 295 - 301
- [436] Ruske, W.: Piétons et cyclistes, in: Strasse und Verkehr, 70(1984), H. 2, S. 47 - 51
- [437] Saitz, H. H.: Tunnel der Welt - Welt der Tunnel, VEB Verlag für Verkehrswesen transpress, Berlin 1988
- [438] Sandahl, J.; Percivall, M.: A Pedestrian Traffic Model for Town Centers, in: Traffic Quarterly, 26(1972), July, S. 359 - 372
- [439] Schaufelberger, E.: Les Piétons: Réseaux et Aménagements, Institut des Transports et de Planification, ITEP-EPFL, cahier TEA No 5, Lausanne 1992
- [440] Scheelhaase, K.: Öffentlicher Nahverkehr und Siedlungsplanung, in: Verkehr und Technik, 23(1970), H. 12, S. 311 - 313
- [441] Schindler Aufzüge AG: Diverse Produktdokumentationen zu Rolltreppen und Rollbändern, 1992
- [442] Schindler Waggon Pratteln: Typenskizzen verschiedener Doppelstockwagen-Varianten, Stand 18. Mai 1993
- [443] Schleife, W. u.a.: Metros der Welt - Geschichte, Technik, Betrieb, 2. bearbeitete und ergänzte Auflage, Verlag transpress, Berlin 1992
- [444] Schmidt, R.: Doppelstockwagen im Einsatz bei der Niederländischen Eisenbahn; in: Eisenbahningenieur, 40(1989), H. 6, S. 305 - 307
- [445] Schmidt, R.F.; Thews, G.: Physiologie des Menschen, dreiundzwanzigste Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1987
- [446] Schmitz, A.: Der Weg zur Strassenbahn - Die Lage der Haltestelle im Raum, in: Verkehr und Technik, 44(1991), H. 4, S. 139 - 144; 44(1991), H. 6, S. 235 - 240
- [447] Schnabel, W.: Gehgeschwindigkeiten von Fussgängern auf lichtsignalgeregelten Überwegen, in: Die Strasse, 9(1969), H. 6, S. 269 - 270
- [448] Schnabel; Lohse: Strassenverkehrstechnik und -planung, Grundlagen, VEB transpress, Berlin, 1980
- [449] Schnabel, W.: Erkenntnisse und Methoden der Strassenverkehrstechnik im neuen "Highway Capacity Manual", Kapitel 12 Kapazität des öffentlichen Personennahverkehrs, in: Das Strassenwesen, 31(1990), H. 11, S. 314 - 322
- [450] Schnabel, W.: Erkenntnisse und Methoden der Strassenverkehrstechnik im neuen "Highway Capacity Manual", Kapitel 13: Fussgänger, Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, ohne Jahrgang
- [451] Schopf, J. M.: Bewegungsabläufe, Dimensionierung und Qualitätsstandards für Fussgänger, Radfahrer und Kraftfahrzeugverkehr, Dissertation Technische Universität Wien, Wien 1985
- [452] Schoppert, D. W.; Herald, W. S.: Pedestrian Range as Related to Transit Stations and their immediate Surroundings, in: Transportation Engineering, 49(1978), March, S. 13 - 15
- [453] Schorer, R. D.: Sonderfahrtdienst für Schwerstbehinderte in Düren - durchgeführt durch ein Verkehrsunternehmen, in: Verkehr und Technik, 35(1982), H. 9, S. 341 - 343
- [454] Schreck; Meyer; Stumpf: S-Bahnen in Deutschland, 2. Auflage, Düsseldorf: alba 1979
- [455] Schuler, H.: Der Schienenfahrzeugpark der Betriebe des öffentlichen Personennahverkehrs im VÖV, in: Verkehr und Technik, 25(1972), H. 11, S. 450 - 452
- [456] Schultz, O.W.O.; Goldbach, H.: Interessante Konstruktions-Details der Hamburger U-Bahn-Wagen Typ DT2, in: Verkehr und Technik, 17(1964), H. 6, S. 151 - 155; 17(1964), H. 7, S. 187 - 191

- [457] Schultz, O.W.O.; Feutlinske, H.: Vorschläge zur Standardisierung von Gelenkbussen, in: Verkehr und Technik, 21(1968), H. 2, S. 37 - 39
- [458] Schultz, O.W.O.: Der VÖV-Bus II - das Stadtfahrzeug der achtziger Jahre, in: Verkehr und Technik, 29(1976), H. 5, S. 177 - 183
- [459] Schultz, O.W.O.: Der Neoplan 814 - ein neuartiger Stadtbus? in: Verkehr und Technik, 29(1976), H. 12, S. 479 - 482
- [460] Schümburg, G.: Gleisplangestaltung (Kapitel Personenverkehrsbereich), Verlag transpress, Berlin 1987
- [461] Schürch, A.: Fussgänger im Verkehr - Eine Literaturobseruierung, ETH Zürich, Lehrstuhl für Verkehrsingenieurwesen, LS-Studienunterlage Nr. 73/2, Zürich 1973
- [462] Schütz, E.; Rothsuh, K. E.: Bau und Funktionen des menschlichen Körpers - Anatomie und Physiologie des Menschen für Hörer aller Fakultäten und für medizinische Assistenzberufe, Urban & Schwarzenberg, München/Berlin/Wien 1976
- [463] Schütz, E.; Caspers, H.; Speckmann, E.-J.: Physiologie - Lehrbuch für Studierende, 16. Auflage, Urban&Schwarzenberg, München/Wien/Baltimore 1982
- [464] Schütze, P.: Fahrgastzugang und mittlere Wartezeit an Haltestellen im Linienverkehr, in: Der Nahverkehr, 2(1984), H. 1, S. 58 - 63
- [465] Schwanke-Gernig, K.: Behindertengerechte Fahrzeuge und ihre Einsatzmöglichkeiten aus betrieblicher Sicht, in: Verkehr und Technik, 38(1985), H. 5, S. 174 - 176
- [466] Schweizerische Bundesbahnen: Haltezeiten für Vorortzüge, Generaldirektion, Studienbüro Bau + BA GD SBB, Bern 1969
- [467] Schweizerische Bundesbahnen, Generalsekretariat: SBB-Lokomotiven und -Triebwagen, Bern 1975
- [468] Schweizerische Bundesbahnen: SBB-Reisezug- und Gepäckwagen, Generalsekretariat SBB, Bern 1982
- [469] Schweizerische Bundesbahnen, Betriebsabteilung der Kreisdirektion III: Maquettenversuch Doppelstockwagen, interner Arbeitsbericht, Zürich 1983
- [470] Schweizerische Bundesbahnen, Betriebsabteilung der Kreisdirektion III: Messungen "Glattalblitz", interner Arbeitsbericht, Zürich 1985
- [471] Schweizerische Bundesbahnen, Betriebsabteilung der Kreisdirektion III: Tests mit Doppelstockwagen, interner Arbeitsbericht, Zürich 1986
- [472] Schweizerische Bundesbahnen: Handbuch für den Bau und Unterhalt der Fahrbahn, Reglement R 220.4, Bauabteilung, Bern 1988 mit Nachträgen
- [473] Schweizerische Bundesbahnen, Direktion Marketing Personenverkehr: Behindertenkonzept SBB, Teilberichte I und II, Bern 1989
- [474] Schweizerischer Invalidenverband: Behindertengerechtes Bauen, Norm SN 521 500 mit Leitfaden, Olten 1989
- [475] Seddon, P.A.; Day, M.P.: Bus Passengers Waiting Times in Greater Manchester, in: Traffic Engineering & Control, 15(1974), January, S. 442 - 445
- [476] Siegloch, W.: Vom Niederflurfahrzeug zum Niederflursystem - Kassels Bemühungen um einen kundenorientierten Betrieb, in: Der Nahverkehr, 8(1990), H. 2, S. 16 - 25
- [477] Simon, R.: Eine Alternative zum ET 27, in: ZEV-Glasers Annalen, 91(1967), H. 5, S. 157 - 159
- [478] Simonis, C.; Korn, M.: Zeitverluste im Strassenbahnbetrieb durch Fahrertüre, Barzahler und LS-Anlagen - Eine Untersuchung der Rheinbahn zur Fahrgastbedienung, in: Der Nahverkehr, 6(1988), H. 2, S. 48 - 52
- [479] Singal, B.I.: Der Schienennahverkehr in Bombay, in: Schienen der Welt, 1/1992, S. 2 - 9
- [480] SMTC: Une ville et un tramway - Dossier d'information sur la réalisation du Tramway de l'Agglomération Grenobloise, Grenoble 1986
- [481] Sone, S.: Squeezing Capacity out of Commuter Lines, in: Developing Metros 1990, S. 9 - 12
- [482] Stadtrat von Zürich: Einrichtung eines gesamtstädtischen Behindertentransportsystems, Weisung 539 an den Gemeinderat vom 17. Januar 1990
- [483] Stadt Zürich: Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich 1990, 85. Jahrgang, Statistisches Amt der Stadt Zürich, Zürich 1990
- [484] Stadt Zürich: Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich 1992, 87. Jahrgang, Statistisches Amt der Stadt Zürich, Zürich 1992
- [485] Stagni, E.: Unificazione dei veicoli per trasporto urbano, in: trasporti pubblici, 4/1949, S. 343 - 352
- [486] Stähli, S.: Haltezeit für Nahverkehrszüge, in: Monatsschrift der Internationalen Eisenbahn-Kongress-Vereinigung, Mai 1969, S. 319 - 331
- [487] Stanek, W.: Zürcher Bevölkerung im Jahre 1988; in: Zürcher Statistische Nachrichten, Berichte 2/1989, Statistisches Amt der Stadt Zürich, Zürich 1989
- [488] Stegemann, J.: Leistungsphysiologie - Physiologische Grundlagen der Arbeit und des Sports, 3. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart/New York 1984
- [489] Stein, W.v.; Schwanter, R.: Verbesserungsmöglichkeiten für den öffentlichen Verkehr auf signalgeregelten Strassen, in: Verkehr und Technik, 29(1976), H. 3, S. 71 - 76

- [490] Stein, W. v.: Zur Dynamik des Linienverkehrs bei zeit- und verkehrsabhängig gesteuerten Signalanlagen, Schriftenreihe für Verkehr und Technik, Heft 62, Bielefeld 1976
- [491] Stengel, W.: Aspekte der Verkehrssicherheit bei Führung von Bussen und Strassenbahnen in Fussgängerzonen, in: Verkehr und Technik, 33(1980), H. 3, S. 110 - 116
- [492] Stetza, G.: Neue Aspekte zur völligen Fahrgast-Selbstbedienung im öffentlichen Verkehr, in: Verkehr und Technik, 17(1964), H. 4, S. 97 - 98
- [493] Stetza, G.: Attraktive Haltestellenzeiten beim Anderthalbdeck-Bus, in: Nahverkehrspraxis, 13(1965), H. 9, S. 372
- [494] Stetza, G.: Die neuen zweiteiligen Triebwagen der Kopenhagener S-Bahn, in: Elektrische Bahnen, 40(1969), H. 3, S. 70 - 71
- [495] Stucki, Ch.; Dunand, M.; Grasset, E.: Die Genfer Niederflur-Strassenbahn, in: Der Nahverkehr, 7(1989), H. 3, S. 59 - 65
- [496] Studiengesellschaft Nahverkehr mbH: Bus-Verkehrssystem - Fahrzeug, Fahrweg, Betrieb; Alba-Buchverlag, Düsseldorf 1979
- [497] Studiengesellschaft Nahverkehr mbH: Bewertung von Beschleunigungsmassnahmen im ÖPNV am Beispiel eines ausgewählten Strassenbahn- und Bus-Netzes im mittleren Ruhrgebiet, 1989
- [498] Südmeyer, E.: Nochmals: Verkehrliche Auswirkungen von Verspätungen, in: Verkehr und Technik, 21(1968), H. 10, S. 272
- [499] Surti, V. H.; Burke, Th. J.: Investigation of the capacity of the White House sidewalk for orderly demonstrations, in: Highway Research Record, Nr. 355, S. 16 - 25, Highway Research Board, Washington D.C. 1971
- [500] Tamo, A.: Für mobilitätsbehinderte Fahrgäste zugängliche Autobusse, die in den Liniendienst des öffentlichen Verkehrs integriert sind, in: Der öffentliche Nahverkehr in aller Welt, 41(1992), H. 3, S. 43 - 51
- [501] Taplin, M.: Low-Floor LRV Progress - Gathering Monumentum, in: Light Rail Review, 2/1991, S. 57 - 62
- [502] Tappert, H.; Lippacher, K.: Grundlagen und Kennzahlen für die Weiter-Entwicklung und Typisierung von Stadtlinien-Omnibussen, in: Verkehr und Technik, 18(1965), H. 9, S. 243 - 246
- [503] Tappert, H.; Schultz, O.W.O.: Betrachtungen zur Standardisierung von Omnibussen im Stadt- und Überland-Linienverkehr, in: Verkehr und Technik, Sonderheft "Standardbus", 1968, S. 2 - 23
- [504] Tar, J.: Die Bevorrechtigung öffentlicher Personenverkehrsmittel und deren Wirkung auf die Reisezeit, in: Die Strasse, 19(1979), H. 1, S. 7 - 10
- [505] Terry, D. S.; Thomas, G.J.: Farside Bus Stops are better, in: Traffic Engineering, 42(1971), March, S. 21 - 29
- [506] Teubner, W.: Der Bus als Verkehrssystem, in: Der Nahverkehr, 2(1984), H. 2, S. 26 - 31
- [507] Theis, H.: Eine Methode zur Abschätzung des Busbedarfs, in: Verkehr und Technik, 37(1984), H. 1, S. 15 - 16
- [508] Theis, H.: Reisezeiten im ÖPNV, in: Verkehr und Technik, 38(1985), H. 1, S. 32 - 35
- [509] Thews, G.; Mutschler, E.; Vaupel, P.: Anatomie, Physiologie, Pathophysiologie des Menschen - Ein Lehrbuch für Pharmazeuten und Biologen, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart 1980
- [510] Thiergen, S.: Zeitverlust des freien Strassenverkehrs an Haltestellen der Strassenbahn, in: Die Strasse, 10(1970), H. 8, S. 427 - 432
- [511] Thillainayagam, R.: Economic Study for Providing Grade separated Pedestrian Crossings in Madras City, Highway Research Station, Madras ca. 1969
- [512] Tichauer, E. R.: The biomechanical Basis of Ergonomics - Anatomy Applied to the Design of Work Situations, John Wiley & Sons Inc., New York/Chichester/Brisbane/Toronto 1978
- [513] Torma, A.; Khasnabis, S.: An Analysis of Bus Flow Parameters in a Downtown Transit Mall, in: ITE Journal, November 1978, S. 25-29
- [514] Transportation Research Board: Highway Capacity Manual, Special Report 209, Washington DC 1985
- [515] Transports Publics Genevois: Interne Vergleichsuntersuchung Prototyp Vevey/DUEWAG - Standardzug TPG, Genf 1984
- [516] Trüb, W.: Die Personenwagen der SBB (Normalspur) 1902-1970, mit Nachtrag 1971-1977, Separatdruck aus Eisenbahn-Amateur
- [517] Untermann, R. K.: Accomodating the Pedestrian - Adapting Towns and Neighborhoods for Walking and Bicycling, Van Nostrand Reinhold Company, New York 1984
- [518] Urbanik, Th.: Understanding Forced Flow, in: ITE Journal, October 1986, S. 23 - 26
- [519] Utech, J.: Inanspruchnahme von Sitzplätzen im Schnellbahnverkehr in Hamburg, in: Verkehr und Technik, 28(1975), H. 7, S. 275 - 277
- [520] Vance, M.: Pedestrian Facilities Design, 1970-1987, Architecture Series: Bibliographie A 2030, Monticello/Illinois 1988
- [521] Van Dijk, J.: Befragung Regionalverkehr Zürich, ausgeführt im Auftrag der Behördendelegation für den Regionalverkehr Zürich und des Stadtrates der Stadt Zürich, Zürich 1972
- [522] Vecchio, D.: Prospettive e soluzioni applicative per metrò leggeri non automatici, in: TRASPORTI e TRAZIONE, 6(1993), H. 4, S. 148 - 152

- [523] Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe: VÖV-Schriften - Typenempfehlung für Schienenfahrzeuge des öffentlichen Personennahverkehrs - U-Bahntriebwagen, Reihe Technik, Nr. 6.030.2, BEKA-Verlag, Köln 1979
- [524] Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe: Massnahmen zur leichteren Benutzung öffentlicher Verkehrsmittel durch Behinderte, VÖV-Schriften, Reihe Technik, VÖV 09.91.1, Ausgabe September 1981, BEKA-Verlag, Köln 1981
- [525] Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe: VÖV-Schriften - Anforderungen an Überwachungen von fremdkraftbetätigten Türen und Trittstufen in Linienbussen und Strassenbahnfahrzeugen, Reihe Technik, Nr. 6.22.1, BEKA-Verlag, Köln 1985
- [526] Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe: VÖV-Schriften - Empfehlungen für automatisch arbeitende, fremdkraftbetätigte Türen in Linienbussen und Strassenbahnfahrzeugen, Reihe Technik, Nr. 8.23.1, BEKA-Verlag, Köln 1985
- [527] Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe: BO Strab - Verordnung über den Bau und Betrieb der Strassenbahnen vom 11. Dezember 1987, BEKA-Verlag, Köln 1987
- [528] Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe: VÖV-Schriften - Haltestellen für Busse und Strassenbahnen, Anordnung, Gestaltung, Bemessung und Ausstattung, Reihe Technik, Nr. 1.15.2, BEKA-Verlag, Köln 1988
- [529] Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe: Das Niederflerbus-Verkehrssystem - Vorläufige Hinweise zu Niederflerbussen, zugehörigen erhöhten Haltestellen, Finanzierungshilfen, Köln November 1989
- [530] Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe: VÖV-Schriften - Typenempfehlung für Schienenfahrzeuge des öffentlichen Personennahverkehrs - Stadtbahntriebwagen, Reihe Technik, Nr. 6.030.1, BEKA-Verlag, Köln 1990
- [531] Verein Tram-Museum Zürich: Typenblätter VBZ 1:100, Zürich 1982
- [532] Vereinigung Schweizerischer Verkehrsingenieure: Optimale Haltestellenabstände beim öffentlichen Verkehr, Forschungsauftrag, 1. Zwischenbericht, Zürich 1969
- [533] Vereinigung Schweizerischer Verkehrsingenieure: Leistungsfähigkeit bei verschiedenen Transportarten, Forschungsauftrag 5/67, Zürich 1971
- [534] Vereinigung Schweizerischer Verkehrsingenieure: Öffentlicher Verkehr / Verkehrsregelung in Städten, Forschungsauftrag 9/71, Zürich 1974
- [535] Verkehrsbetriebe Zürich: VR-TRAM 12, Querschnittsgestaltung von Fahrzeugen und festen Anlagen, Zürich 1985
- [536] Vevey: Niederfler-Gelenktriebwagen für Strassen- und Stadtbahnen, Dokumentation, o.J.
- [537] Vianello G.: Carrello portante a piano basso per veicoli leggeri su rotaia, in: Ingegneria Ferroviaria, 40(1985), H. 5, S. 242 - 249
- [538] Virkler, M. R.; Guell, D. L.: Pedestrian Crossing-Time Requirements at Intersections, in: Transportation Research Record, Nr. 959, S. 47 - 51, Washington D.C. 1984
- [539] Vogt, M.; Lapp, U.: Erhöhte Bussteige zur Verbesserung des Ein- und Ausstieges, in: Verkehr und Technik, 36(1983), H. 10, S. 395 - 400
- [540] Voigt, W.: Modellfunktionen zur Beschreibung der Fahrgastwechselzeiten im Straßenbahnverkehr, in: Die Strasse, 15(1975), H. 2, S. 48 - 51.
- [541] Voigt, W.; Kühnelt, W.-D.; Glass, M.: Zeitmessungen im Strassenbahnbetrieb auf der Nord-Süd-Verbindung in Dresden, in: Die Strasse, 13(1973), H. 12, S. 493 - 500
- [542] Voigt, W.: Die Strassenbahn in der Grünen Welle, in: Die Strasse, 14(1974), H. 1, S. 4 - 13
- [543] Voigt, W.; Schmiel, G.; Körsten, R.: Verkehrstechnische Voruntersuchungen für den Ausbau einer Schnellstrassenbahn-Trasse in Halle, in: Die Strasse, 14(1974), H. 12, S. 492 - 497
- [544] Voigt, W.; Glass, M.: Verkehrsmessungen als Grundlage verkehrsorganisatorischer und verkehrsplanerischer Massnahmen, in: Die Strasse, 15(1975), H. 1, S. 7 - 14
- [545] Voigt, W.: Koordinierte Lichtsignalisierung und Strassenbahn - Ein Lösungsvorschlag für die Nord-Süd-Verbindung in Dresden, in: Die Strasse, 15(1975), H. 3, S. 92 - 97
- [546] Voigt, W.: Möglichkeiten zur Bevorrechtigung des öffentlichen Personennahverkehrs im Strassenraum, in: Die Strasse, 17(1977), H. 9, S. 356 - 361
- [547] Voigt, W.: Planung und raticnelle Gestaltung von Fussgängerverkehrsanlagen in Wohngebieten, in: Die Strasse, 22(1982), H. 9, S. 292 - 296; 22(1982), H. 10, S. 334 - 337
- [548] Voigt, W.; Kühnelt, W.-D.; Packroff, K.: Organisation des städtischen Strassenverkehrs, VEB transpress, Berlin 1982
- [549] Völkening, W.: Behindertengerechte Linienbusse in der Betriebserprobung, in: nahverkehrspraxis, 35(1987), H. 11, S. 426 - 427.
- [550] VÖV-Verwaltungsrat (EntschlieÙung): Ein Konzept für Behinderte im ÖPNV, in: Der Nahverkehr, 6(1988), H. 3, S. 26 - 27
- [551] Vuchic, V. R.; Newell, G. F.: Rapid Transit Interstation Spacings for Minimum Travel Time, in: Transportation Science, 2(1968), H. 4, S. 303 - 339
- [552] Vuchic, V.: Fahrplanstörungen - zusätzliche Faktoren und betriebliche Massnahmen, in: Verkehr und Technik, 22(1969), H. 4, S. 97 - 100
- [553] Vuchic, V.: Potenzierung der Fahrplanstörungen im Linienverkehr, in: Revue de l'UITP, 18 (1969), H. 4, S. 285 - 288

- [554] Vuchic, V. R.: Urban Public Transportation - Systems and Technology, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey/USA, 1981
- [555] Weber, W.: Fahrwege und Fahrdynamik der Schienenbahnen, Skript zur gleichnamigen Vorlesung an der Universität Stuttgart/Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen
- [556] Weeber, H. u.a.: Verkehrsanlagen aus der Sicht des Fussgängers, in: Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 279, Bonn 1980
- [557] Weidmann, U.: Untersuchung über Phänomene des Fahrgastwechsels im Nahverkehr - Zwischenbericht vom Januar 1989, IVT-ETHZ, Zürich 1989
- [558] Weidmann, U.: Die Gesetzmässigkeiten des Fahrgastwechsels - Zwischenbericht vom November 1989 über die Ergebnisse der Messfahrten bei der S-Bahn München, IVT-ETHZ, Zürich 1989
- [559] Weidmann, U.: Die Gesetzmässigkeiten des Fahrgastwechsels im Nahverkehr - Dritter Zwischenbericht vom Juli 1990 über die Ergebnisse der Messfahrten bei den Basler Verkehrsbetrieben, IVT-ETHZ, Zürich 1990
- [560] Weidmann, U.: Wertanalyse Doppelstockwagen S-Bahn München, Kurzbericht zur Fahrgastwechselzeit, IVT-ETHZ, Zürich 1990
- [561] Weidmann, U.: Wertanalyse Doppelstockwagen S-Bahn München, Ergänzungen zur Sitzung vom 29. 11. 1990, IVT-ETHZ, Zürich 1990
- [562] Weidmann, U.: Projekt COBRA der Verkehrsbetriebe Zürich, Haltezeitschätzung, IVT-ETHZ, Zürich 1991
- [563] Weidmann, U.: Niederflurfahrzeuge - ein Beitrag zum attraktiven Nahverkehr, in: Schweizer Ingenieur und Architekt, 110(1992), H. 13, S. 269 - 275
- [564] Weidmann, U.: Transporttechnik der Fussgänger, in: Strasse und Verkehr, 78(1992), H. 3, S. 161 - 169
- [565] Weidmann, U.: Fahrgastwechsel bei Autobussen, in: Verkehr und Technik, 45(1992), H. 4, S. 138 - 144
- [566] Weidmann, U.: Fahrgastwechsel im S-Bahn-Verkehr, Fahrgastwechsellmessungen bei der S-Bahn München, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 41(1992), H. 7-8, S. 533 - 536
- [567] Weidmann, U.: Transporttechnik der Fussgänger - Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs, Literaturlauswertung, IVT-ETHZ, Schriftenreihe des IVT Nr. 90, Zürich 1992
- [568] Weidmann, U.: Niederflur-Technik als Komponente eines attraktiven und wirtschaftlichen öffentlichen Verkehrs, Vortragsmanuskript Informationsfahrt LITRA "Niederflur-Technik" vom 16. April 1993, IVT-ETH Zürich, Zürich 1993
- [569] Weidmann, U.: Transporttechnik der Fussgänger - Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs, Literaturlauswertung, IVT-ETHZ, zweite ergänzte Auflage, Schriftenreihe des IVT Nr. 90, Zürich 1993
- [570] Weidmann, U.: Der Fussgänger im Strassenverkehr - Geschwindigkeit und Leistungsfähigkeit, in: Der Nahverkehr, 11(1993), H. 6, S. 53 - 60
- [571] Weidmann, U.: Die Fahrgastwechselzeiten der geplanten Doppelstockzüge von Bahn 2000, ausgeführt im Auftrag der Generaldirektion der SBB, Zürich 1993
- [572] Weidmann, U.: Nachweis der Fahrgastwechselzeiten eines Doppelstockwagens mit einem Dreispur-Eingang, ausgeführt im Auftrag der Schindler Waggon AG, Zürich 1993
- [573] Weidmann, U.: Beziehungen Fahrgastwechsel - Zugfolge - Kapazitätssteigerung, 2. Fachsymposium der SGP Verkehrstechnik, "Zu ebener Erde - und im 1. Stock", Resultate der Diskussion im Arbeitskreis III, Wien 30. Juni 1993
- [574] Weidmann, U.: Optimierung des Fahrgastwechsels, Referat anlässlich der IVT-Informationstagung zum Problemkreis "Zukunft öffentlicher Verkehr Schweiz", Zürich 20. Oktober 1993
- [575] Weidmann, U.: Niederflurtechnik und Mobilitätsbehinderte, Manuskript für Zeitschrift "Verkehr und Technik", Zürich Oktober 1993
- [576] Weigelt, H. (Herausgeber): Fünf Jahrhunderte Bahntechnik, Hestra-Verlag, Darmstadt 1986
- [577] Weinmann, M. R.: The gallery car is alive and well, in: Railway Gazette International, 146 (1990), December, S. 943 - 945
- [578] Weiss, K.-D.: Luftheizungs- und Lüftungsanlage in den neuen Doppelstockwagen der Niederlandse Spoorwegen; in: ZEV-Glasers Annalen, 109(1985), H. 10, S. 412 - 414
- [579] Weiss, Th.: Das Rollmaterial der SBB für die Bahn 2000, in: Schweizer Eisenbahn-Revue, 5/1987, S. 169-176
- [580] Wermuth, M. J.: Härtefälle bei der Fahrgelderstattung - Die unentgeltliche Beförderung Schwerbehinderter/Das Problem der Erhebungsmethoden, in: Der Nahverkehr, 5(1987), H. 3, S. 22 - 29
- [581] Wernecke: Neuere Strassenbahnwagen in England, in: Glasers Annalen, 47(1923), Februar, S. 47 - 49
- [582] Weston, J.G.: Operational Research in London Transport, in: Journal of Operational Research Society, 32(1981), S. 683 - 694
- [583] Westphal, J.: Ein Beitrag zur Leistungsfähigkeit von Rolltreppen im U-Bahn-Berufsverkehr, in: Verkehr und Technik, 25(1972), H. 5, S. 185 - 196

- [584] Westphal, J.: Fahrgastwechselzeiten bei Fernreisezügen der Deutschen Bundesbahn, in: Eisenbahningenieur, 27(1976), H. 10, S. 417 - 426
- [585] Westphal, J.: Zeituntersuchungen an abfahrenden Reisezügen im Fern- und Nahverkehr der Deutschen Bundesbahn, in: Archiv für Eisenbahntechnik Nr. 31, 1976, S. 35 - 45
- [586] Wiebusch-Wothge, R.: Beurteilung von Verkehrsabläufen an konventionellen und alternativen Fussgängerüberwegen, Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen I, Ruhr-Universität Bochum, Heft 6, 1987
- [587] Wilke, Dr. Gerhard: Elektrotriebwagen als Eisenbahn-Nahverkehrsmittel im städtischen Nahverkehr, in: Die Bundesbahn, 38(1964), H. 19-20, S. 703 - 710
- [588] Wirbitzky, G.: Rollsteige sind die Grundlage künftiger Fussgängerverkehre, in: Strassenverkehrstechnik, 13(1969), H. 2, S. 37 - 41
- [589] Wirsching, A.; Burmeister, G.: Massstab für den Einbau von Fahrtreppen in U-Bahn-Haltestellen, in: Verkehr und Technik, 35(1982), H. 6, S. 203 - 206
- [590] Wolf, J.: Ermittlung des hinsichtlich der Reisezeit zweckmäßigsten Haltestellen-abstandes im städtischen Nahverkehr, Dissertation an der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List", Dresden, 1970
- [591] Wolf, K.-H.: Integration von Schwerbehinderten im öffentlichen Nahverkehr, in: Der Nahverkehr, 3(1985), H. 6, S. 24 - 27
- [592] Wolff, H.; Bierschenk, H.; Scholz, G.: Berücksichtigung des Fussgängerverkehrs bei Verkehrserhebungen, in: Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 279, Bonn 1980
- [593] Wontorra, K.; Milobara, M.: Fahrzeitmessung und Störungsanalyse (FAST), in: Verkehr und Technik, 38(1985), H. 8, S. 281 - 284
- [594] Yearsley, I.: Autobusse in den Städten der Welt, in: Der öffentliche Nahverkehr in der Welt, 42(1993), Februar, S. 69 - 77
- [595] Zeevenhooven, N. H. C. E.: "Plädoyer" für die Einführung von Doppelstockwagen im nationalen und internationalen (RIC)-Verkehr, in: ZEV-Glasers Annalen, 108(1984), H. 7-8, S. 204 - 215
- [596] Zeevenhooven, N. H. C. E.: Konstruktive Grundsätze für den Entwurf und Möglichkeiten für den Betriebseinsatz von Doppelstockfahrzeugen im Eisenbahnverkehr der europäischen Normalspurbahnen; in: ZEV-Glasers Annalen, 110(1986), H. 6-7, S. 250 - 256
- [597] Zeevenhooven, N. H. C. E.: Doppelstockwagen für den Einsatz im Eisenbahnverkehr, in: ZEV-Glasers Annalen, 114(1990), H. 1-2, S. 15 - 23
- [598] Zschech: Triebwagen deutscher Eisenbahnen, Band 1: ET und ETA, alba Buchverlag GmbH+ Co KG, Düsseldorf, 1978
- [599] Zschweigert, M.: Bahnanlagen des Nahverkehrs, transpress Verlag, Berlin 1982
- [600] Züger, J.: Die Grossraum-Triebwagen der Zürcher Strassenbahn, in: Zeitschrift Verkehrstechnik, 24(1943), H. 6, S. 71 - 73
- [601] Autorenkollektiv: Die Strassenbahnen in der DDR - Geschichte, Technik und Betrieb, Motorbuch Verlag Stuttgart, 1978
- [602] anonym: Una nuova vettura tranviaria a carelli per l'A.T.A.C., in: Trasporti Pubblici, 5(1948), H. 3-4, S. 327 - 330
- [603] anonym: Niederflur-Gelenkbus in Hamburg vorgestellt, in: Verkehr und Technik, 28(1975), H. 10, S. 388 - 389
- [604] anonym: Fahrzeiten, Reisegeschwindigkeiten und Zugfolgezeiten einst und jetzt, in: Verkehr und Technik, 2. Sonderheft 1983, S. 22 - 25
- [605] anonym: Beschleunigung des ÖPNV in Bielefeld, in: Verkehr und Technik, 37(1984), H. 3, S. 83 - 84
- [606] anonym: Beschleunigungsmassnahmen für Bus und Strassenbahn - Vom Bundesminister für Forschung und Technologie geförderte Forschungsvorhaben, in: Verkehr und Technik, 37(1984), H. 12, S. 461 - 462
- [607] anonym: Behinderte im ÖPNV: Grundlagen, Technik, Möglichkeiten, in: Stadtverkehr, 36(1991), H. 10, S. 6 - 9
- [608] anonym: Niederflur-Verkehrssystem - Gestaltung von Haltestellen in den alten und neuen Bundesländern, ca. 1992
- [609] anonym: Neue Ideen für Fahrzeugkonzepte, in: Bus & Bahn, 27(1993), H. 9, S. 4 - 7

Sämtliche Abbildungen ohne Quellenangabe stammen vom Autor.

A.2 Begriffe im Zusammenhang mit der Fahrgastwechselzeit

- **Haltezeit [s]:** Die Haltezeit ist die Zeit, während der sich ein Zug an einer Haltestelle nicht bewegt. Sie beginnt mit dem Anhalteruck und endet mit dem Anfahruck.
- **Gesamthaltezeit [s]:** Die Summe aller Haltezeiten auf einer Fahrt zwischen zwei Endstationen ohne -> Verlustzeit, ohne -> Wendezeit und ohne die Gegenrichtung wird als Gesamthaltezeit bezeichnet.
- **Fahrgastwechselzeit [s]:** Bei der Fahrgastwechselzeit handelt es sich um jene Zeit, während welcher sich Fahrgäste durch den Querschnitt mindestens einer Türe eines Kurses bewegen. Nicht enthalten sind darin die Zeiten für das Öffnen und Schliessen der Türen sowie die übrigen fixen Haltezeitkomponenten.
- **Gesamtfahrgastwechselzeit [s]:** Die Summe aller Fahrgastwechselzeiten einer Fahrt bildet die Gesamtfahrgastwechselzeit.
- **Fahrzeit [s]:** Die Zeit, während welcher ein Fahrzeug in Bewegung ist, ist die Fahrzeit.
- **Fahrzeitverlust [s]:** Eine Störung, welche zur Verlangsamung der Fahrt, nicht aber zu einem Halt auf freier Strecke führt, verursacht eine Verlängerung der Fahrzeit gegenüber der unbehinderten Fahrt. Die Differenz zwischen der planmässigen und der effektiven Fahrzeit ist der Fahrzeitverlust. Ursachen sind beispielsweise nahe am Gleis stehende Autokolonnen oder vorausfahrende langsame Kurse.
- **Streckenverlustzeit [s]:** Kommt ein Kurs zwischen zwei Haltestellen infolge einer Störung, zum Beispiel Linksabbieger, Lichtsignalanlagen etc., zum Stehen, so entsteht die Streckenverlustzeit. Als Streckenverlustzeit wird nur derjenige Zeitraum bezeichnet, während welchem sich das Fahrzeug in Ruhe befindet. Die Brems- und Anfahrverluste fallen unter den -> Fahrzeitverlust.
- **Haltestellenverlustzeit [s]:** Hindernisse verschiedener Art (zum Beispiel Lichtsignalanlagen) können dazu führen, dass ein Kurs eine Haltestelle nicht unmittelbar nach Abschluss des Fahrgastwechsels verlassen kann. Dieser Verlustanteil wird als Haltestellenverlustzeit bezeichnet.
- **Verlustzeit [s]:** Die Summe aller Teilverlustzeiten (-> Fahrzeitverlust, -> Streckenverlustzeit, -> Haltestellenverlustzeit) wird als Verlustzeit bezeichnet.
- **Beförderungszeit [s]:** Unter der Beförderungszeit wird der fahrplanmässige Zeitbedarf zwischen zwei definierten Stationen, meist den Endstationen, verstanden. Sie umfasst die -> Fahrzeit, die -> Haltezeiten und die -> Verlustzeiten, nicht aber die -> Wendezeiten.
- **Wendezeit [s]:** An den Endhaltestellen werden bestimmte Reservezeiten - die Wendezeiten - zur Stabilisierung des Fahrplanes und für die Bedürfnisse des Personals vorgesehen, deren Grösse die -> Kursfolgezeit erreichen kann. Reserve- oder Ausgleichszeiten können aber auch unterwegs angeordnet werden.
- **Umlaufzeit [s]:** Die Umlaufzeit ist jene Zeit, welche ein Kurs benötigt, um ein sich wiederholendes Betriebsprogramm einmal zu absolvieren. Sie setzt sich zusammen aus den -> Wendezeiten, den -> Fahrzeiten in beiden Richtungen, sämtlichen -> Haltezeiten sowie der Summe der -> Verlustzeiten.
- **Kursfolgezeit [s]:** Der zeitliche Abstand zweier sich folgender Kurse derselben Linie ist die Kursfolgezeit.
- **Zeitabstand [s]:** Der zeitliche Abstand zweier Kurse, die sich unmittelbar folgen, aber nicht derselben Linie angehören müssen, ist der Zeitabstand. Befährt nur eine einzige Linie einen bestimmten Streckenabschnitt, so ist der Zeitabstand mit der -> Kursfolgezeit identisch.
- **Mittlere Fahrgastwechselzeit [s/P]:** Die mittlere Fahrgastwechselzeit ergibt sich, indem die -> Fahrgastwechselzeit durch die -> Fahrgastwechselzahl dividiert wird. Sie kann auf eine bestimmte Tür oder ein ganzes Fahrzeug bezogen werden.
- **Spezifische Fahrgastwechselzeit [sm/P]:** Als Standardmass lässt sich die spezifische -> Fahrgastwechselzeit als Fahrgastwechselzeit pro Person und pro Meter lichter Türbreite definieren.
- **Türleistungsfähigkeit [P/s]:** Bei der Türleistungsfähigkeit handelt es sich um den Kehrwert der -> mittleren Fahrgastwechselzeit. Sie gibt die Zahl der Fahrgäste an, welche pro Sekunde ein

Fahrzeug besteigen oder verlassen können. Die Türleistungsfähigkeit kann auch auf eine einzelne Türe bezogen werden.

- **Spezifische Türleistungsfähigkeit $[P/sm]$:** Bezieht man die \rightarrow Türleistungsfähigkeit auf einen lichten Querschnitt von einem Meter Breite, so erhält man ein Standardmass, welches im folgenden als spezifische Türleistungsfähigkeit bezeichnet wird. Es ist der Kehrwert der \rightarrow Spezifischen Fahrgastwechselzeit.
- **Türbelastung $[P]$:** Die Zahl der Personen, welche in einem Referenzzustand auf eine Türe entfällt, wird als Türbelastung bezeichnet. Der Referenzzustand kann beispielsweise durch die definierte Maximalauslastung oder durch einen anderen Auslastungsgrad definiert sein.
- **Relative Türbelastung $[s]$:** Die relative Türbelastung ist die Gegenüberstellung von Türbelastung und Türleistungsfähigkeit. Sie entspricht gerade der Zeit, welche zum Austausch der Fahrgäste notwendig ist.
- **Spezifische Türbelastung $[P/m]$:** Ein Mass für die Beanspruchung der Leistungsfähigkeit des Türsystems stellt die spezifische Türbelastung als Zahl der Personen, bezogen auf die Türbreite dar. Analog zur Türbelastung kann auch die spezifische Türbelastung für das Fassungsvermögen des Fahrzeuges oder für eine konkrete Fahrgastwechselzahl berechnet werden.
- **Fahrgastzahl $[P]$:** Summe der Fahrgäste, welche eine bestimmte Fahrt eines Linienkurses benutzt haben. Sie ist gleich der Summe aller Einsteiger oder aller Aussteiger.
- **Fahrgastwechselzahl $[P]$:** Die Zahl der Fahrgäste, welche an einer bestimmten Haltestelle ein- und aussteigen, ist die Fahrgastwechselzahl.
- **Gesamtfahrgastwechselzahl $[P]$:** Die Summe aller Fahrgastwechselzahlen auf einer Fahrt wird als Gesamtfahrgastwechselzahl bezeichnet. Die Gesamtfahrgastwechselzahl entspricht der doppelten Fahrgastzahl.
- **Stehplatzbelegungsgrad $[P/m^2]$:** In jedem Fahrzeug lassen sich bestimmte Bereiche als Stehplatzflächen ausweisen. Wird die Zahl der Fahrgäste, welche sich auf diesen Flächen aufhalten, auf diese Stehplatzfläche bezogen, so erhält man den Stehplatzbelegungsgrad.
- **Fassungsvermögen $[P]$:** Das Fassungsvermögen eines Fahrzeuges ist die Zahl der Personen, welche darin unter definierten Bedingungen Platz finden. Die Grenzwerte werden zum ersten durch Komfortüberlegungen bestimmt und zum zweiten aufgrund der zulässigen \rightarrow Haltezeiten beziehungsweise die betrieblich zulässige Verlängerung der \rightarrow Fahrgastwechselzeit an den Haltestellen.
- **Auslastungsgrad $[-]$:** Der Auslastungsgrad ist die Gegenüberstellung von aktueller Besetzung des Fahrzeuges und maximalem Fassungsvermögen.

A.3 Zusammenstellung der Abkürzungen

A.3.1 Masseinheiten

[a]	Jahre
[cal]	Kalorien
[h]	Stunden
[inch]	Inch
[J]	Joule
[kg]	Kilogramm
[km]	Kilometer
[m]	Meter
[min]	Minuten
[P]	Personen
[s]	Sekunden

A.3.2 Kurzzeichen der verwendeten Grössen

A.3.2.1 Bezeichnungssystematik

A.3.2.1.1 Hauptzeichen

A	Fläche [m ²]
D	Dichte [P/m ²]
F	Zahl von Fahrgästen [P]
f	Fahrgaststrom pro Zeit [P/s]
k	Konstanten [-]
L	Leistungsfähigkeiten [P/s]
l	Längen, Distanzen [m]
n	Anzahl, Stückzahlen [-]
P	Verteilungsfunktionen [-]
p	Wahrscheinlichkeiten [-]
Q	Beanspruchungen, absolute Belastungswerte
q	Auslastungen, relative Belastungswerte [-], [%]
t	Zeiten [s]
v	Geschwindigkeiten [m/s]
W	Energieverbrauch [J]
w	Energieverbrauch pro Zeit beziehungsweise körperliche Leistung [J/s]

A.3.2.1.2 1. Index

Auf	Grösse mit Bezug auf einen Aufenthalt
Bew	Grösse mit Bezug auf eine Bewegung
F	Fahrgastbezogene Grössen
H	Haltestellenbezogene Grössen
h	Grössen mit Bezug zum Haltevorgang
i	Laufvariable
K	Kursbezogene Grösse
L	Linienbezogene Grössen
m	Mittelwerte

max	Höchstwerte
min	Mindestwerte
R	Referenzzustände
r	Radiale Abstände
S	Türspuren
s	Spezifische Werte
T	Türbezogene Grössen
tot	Gesamtzahl, Total
U	Ungleichförmigkeitsbeiwerte
V	Verbindungselemente
W	Warteraum, Stehplatzraum

A.32.13 2. Index und weitere

b	Breitenmasse
d	Distanzen
f	Grössen mit Bezug zum Fahrgastwechsel
g	Grenzwerte
h	Horizontale Grössen
i	Laufvariable
K	Kursbezogene Grösse
l	Längenmasse
m	Mittelwerte
max	Höchstwerte
min	Mindestwerte
R	Referenzzustände
s	Spezifische Werte
t	Tiefenmasse
tot	Gesamtzahl, Total
v	Vertikale Grössen
W	Warteraum, Stehplatzraum

A.32.2 Bezeichnung der wichtigen Kenngrössen

A_W	Warteraumfläche [m^2]
A_i	Summe aller Aussteiger an der Haltestelle i [P]
D_F	Dichte des Fahrgaststromes [P/m^2]
$D_{F,l}$	Fahrgastdichte pro Länge an der Haltekante [P/m]
$D_{F,li(x)}$	Längsdichteverteilung des Typs i [P/m]
$D_{F,lm}$	Mittlere Fahrgastdichte pro Länge an der Haltekante [P/m]
$D_{F,lmax}$	Maximale Fahrgastdichte pro Länge an der Haltekante [P/m]
$D_{F,G}$	Stehplatzdichte in den Gangbereichen [P/m^2]
$D_{F,T}$	Stehplatzdichte im Türraum [P/m^2]
$D_{F,W}$	Dichte des Fahrgäste im Warteraum [P/m^2]
$D_{F,Wmax}$	Maximale Fahrgastdichte im Warteraum [P/m^2]
E_i	Einsteiger an der Haltestelle i für einen bestimmten Kurs [P]
E_{tot}	Gesamtzahl der an einer Haltestelle wartenden Fahrgäste [P]
F	Fahrgastwechselzahl [P]

F_K	Fahrgastzahl eines Kurses; gesamte Anzahl transportierter Fahrgäste auf einer Fahrt einer Linie [P]
F_R	Anzahl der Fahrgäste im Referenzzustand [P]
$F_{St,max}$	Maximaler Fahrgastrückstau [P]
$F_{T,i}$	Fahrgastwechselzahl an der Türe i [P]
F_i	Fahrgastwechselzahl an der Haltestelle i oder an der Türe i [P]
$F_{r,i,k}$	Zahl der Fahrgäste im Abstand $l_{r,i}$ bis $l_{r,k}$ von der Türe [P]
F_{tot}	Gesamtfahrgastwechselzahl [P]
$f(l_r)$	Zahl der Fahrgäste im Abstand l_r von der Türe [P/m]
$f(t)$	Fahrgastzuströmfunktion [P/s]
k_D	Korrekturfaktor zur Fahrgastwechselzeit beim Auftreten von Stehplatzfahrgästen im Türraum [-]
$k_{K,L50}$	Zuschlagfaktor zur mittleren Fahrgastwechselzeit bei einer spezifischen Türbelastung von 50 P/m' [-]
k_L	Verkehrsdichtenkonstante einer öffentlichen Verkehrslinie [m^{-1}]
k_U	Zuschlagfaktor zur Fahrgastwechselzeit bei ungleichförmiger Belastung des Türsystems [-]
L	Türleistungsfähigkeit eines ganzen Kurses oder einer bestimmten Türe [P/s]
L_T	Leistungsfähigkeit einer Türe [s/P]
$L_{T,K}$	Nominelle Leistungsfähigkeit des Türsystems eines Kurses [P/s]
$L'_{T,K}$	Effektiv erreichte Leistungsfähigkeit des Türsystems [P/s]
L_{T,K_i}	Wirksame Türleistungsfähigkeit des Kurses für die Fahrgastwechselzahl F_i [P/s]
$L_{T,i}$	Leistungsfähigkeit der Türe i [P/s]
L_V	Leistungsfähigkeit aller Verbindungselemente vom Türraum zu den Aufenthaltsbereichen der Fahrgäste [P/s]
L_s	Spezifische Türleistungsfähigkeit [P/sm]
$L_{s,i}$	Spezifische Türleistungsfähigkeit des Elementes i [P/sm]
$L_{s,i'}$	Spezifische Türleistungsfähigkeit bei einer spezifischen Türbelastung von i [P/m']
$l_{Bew,h}$	Horizontal zurückgelegte Distanz im Fahrzeug zwischen Einstieg und Platz [m]
$l_{Bew,v}$	Zu überwindende Höhendifferenz im Fahrzeug zwischen Einstieg und Platz [m]
$l_{F,b}$	Körperbreite der Fahrgäste [m]
$l_{F,d}$	Horizontaldistanz zwischen den Fahrgästen [m]
$l_{F,t}$	Körpertiefe der Fahrgäste [m]
l_L	Länge einer öffentlichen Verkehrslinie [m]
$l_{V,bi}$	Nutzbare Breite des Verbindungselementes i [m]
$l_{i,max}$	Maximaler Abstand eines Fahrgastes von der Türachse [m]
l_r	Abstand von der Einstiegstüre [m]
$l_{r,g}$	Grenzradius, ausserhalb dessen keine Fahrgäste warten [m]
$l_{r,i}$	Abstand i von der Einstiegstüre [m]
$l_{r,max}$	Maximale Zugangsdistanz eines Fahrgastes zur Einstiegstüre [m]
$l_{W,b}$	Breite des Warteraumes [m]
$l_{W,l}$	Länge des Warteraumes [m]
l_x	Abstand des Fahrgastes von der Türachse [m]
l_y	Abstand des Fahrgastes von der Fahrzeugwand [m]
$l_{T,b}$	Türbreite [m]
$l_{T,bi}$	Lichte Breite der Türe i [m]
$l_{T,bK}$	Gesamte lichte Türbreite des Kurses [m]
$l_{T,v}$	Einstiegshöhe [m]
$l_{W,b}$	Warteraumbreite [m]

$l_{w,b}(x)$	Warteraubreite in Funktion der Längskoordinate x [m]
$l_{w,l}$	Warteraulänge [m]
n_S	Anzahl der Türspuren [-]
$n_{T,K}$	Anzahl der Türen eines ganzen Kurses [-]
$n_{T,i}$	Anzahl der Türen des Fahrzeuges i [-]
$P(K)$	Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzahlen [-]
$P(\tau)$	Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzeit einer Türe [-]
$P_K(\tau)$	Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses [-]
$P_{K,m}(\tau)$	Verteilungsfunktion der mittleren Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses [-]
$P_{q,reli}$	Summenhäufigkeit der relativen Fahrgastwechselzahlen [%]
$P_{sta}(\tau)$	Standardverteilungsfunktion der spezifischen Fahrgastwechselzeit [-]
$p(a)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der Grösse a
$p_K(x)$	Dichte der Fahrgastwechselzeit des Kurses [-]
Q_K	Momentane Besetzung eines Kurses [P/Kurs]
$Q_{K,i}$	Gesamtbesetzung des Kurses nach der Haltestelle i [P/Kurs]
$Q_{K,max}$	Maximales Fassungsvermögen eines Kurses [P/Kurs]
$Q_{K,imax}$	Maximales Fassungsvermögen des Kursbereiches i [P/Kurs]
$Q_{K,rel}$	Relatives Fassungsvermögen eines Kurses [P/Kurs]
$Q_{K,reli}$	Relatives Fassungsvermögen des Kursbereiches i [P/Kurs]
$Q_{K,Qmax}$	Maximale Auslastung des Kurses während einer Fahrt [P/Kurs]
Q_T	Türbelastung [P/Türe]
$Q_{T,rel}$	Relative Türbelastung des Fahrzeuges [s]
$Q_{T,reli}$	Relative Türbelastung des Kurses i [s]
$Q_{T,relmax}$	Maximal an einem Fahrzeug auftretende relative Türbelastung [s]
$Q_{T,s}$	Spezifische Türbelastung [P/m]
Q_i	Zahl der Fahrgäste im Fahrzeugbereich i [P]
$Q_{i,sat}$	Sättigungsbesetzung des Fahrzeugbereiches i [P]
$q_{F,i}$	Anteil der Fahrgäste der Linie i an der Gesamtzahl der Fahrgäste [-]
$q_{F,reli}$	Relative Fahrgastwechselzahl an der Haltestelle i [-]
$q_{F,St}$	Rückstaufaktor für Gesamtfahrgastwechselzeit [-]
$q_{F,Ti}$	Anteil des Fahrgastwechsels an einer bestimmten Haltestelle, welcher auf die Türe i entfällt [-]
q_K	Auslastungsgrad eines Kurses [-]
$q_{K,U}$	Umschlagfaktor [-]
$q_{K,L}$	Ausschöpfungsgrad der Türleistungsfähigkeit des Türsystems [-]
$q_{K,L50}$	Ausschöpfungsgrad der Leistungsfähigkeit des Türsystems in [%] der Leistungsfähigkeit bei einer spezifischen Türbelastung von 50 P/m^2
$q_{K,nb}$	Wirkungsgrad des Türsystems in Funktion der Türzahl und der Breite der einzelnen Türen [-]
$q_{K,nc}$	Wirkungsgrad des Türsystems in Funktion der Türzahl und der Standardabweichung der spezifischen Leistungsfähigkeit der einzelnen Türen [-]
$q_{L,T}$	Ausschöpfungsgrad der Türleistungsfähigkeit der Einzeltüre [-]
$q_{T,i}$	Spezifische Türbelastung des Kurses i [P/m]
$q_{U,H}$	Ungleichförmigkeitsmass von Haltestellen [-]
$q_{U,T}$	Ungleichförmigkeitsmass der Türbelastung [-]
t_A	Anfangszeitpunkt des Fahrgastwechsels [s]
t_{Auf}	Aufenthaltszeit am Aufenthaltsort [s]
t_{Bew}	Bewegungszeit des Fahrgastes vom Einstieg zum Aufenthaltsort [s]
t_E	Ende des Fahrgastwechsels [s]

$t_{St,1}$	Zeitpunkt des Beginns des Fahrgastrückstaus [s]
$t_{St,2}$	Zeitpunkt, in welchem das Maximum des Rückstaus erreicht ist beziehungsweise Zeitpunkt, ab welchem der Zustrom kleiner wird als die Türleistungsfähigkeit [s]
t_Z	Zuströmzeit; Gehzeit eines Fahrgastes zur Fahrzeugschleuse [s]
t_b	Beförderungszeit [s]
t_f	Fahrzeit [s]
t_g	Grenzzeit; Zeitpunkt, an welchem der am weitesten von der Tür entfernte Fahrgast eintrifft [s]
t_h	Haltezeit [s]
$t_{h,f}$	Fahrgastwechselzeit an einer Haltestelle oder Tür [s]
$t'_{h,f}$	Effektive Fahrgastwechselzeit an einer Haltestelle oder Tür [s]
$t_{h,fSt}$	Gesamte Verlängerung der Fahrgastwechselzeit durch Fahrgastrückstau [s]
$t_{h,fi}$ (F)	Fahrgastwechselzeit des Kurses i bei einem Fahrgastwechsel F [s]
$t_{h,fm}$	Mittlere Fahrgastwechselzeit einer Tür beziehungsweise nominelle mittlere Fahrgastwechselzeit des Türsystems [s/P]
$t'_{h,fm}$	Effektive mittlere Fahrgastwechselzeit des Türsystems [s/P]
$t_{h,fs}$	Spezifische Fahrgastwechselzeit [sm/P]
$t_{h,ftot}$	Gesamtfahrgastwechselzeit einer Fahrt [s]
t_v	Verlustzeiten durch Behinderungen [s]
t_w	Wendezeiten an den Endhaltestellen [s]
v	Verlustbeiwert der Fahrzeugkapazität zur Berücksichtigung verschiedener störender Einflüsse [-]
$v_{F,h}$	Horizontalgeschwindigkeit der Fahrgäste oder Fussgänger [m/s]
$v_{F,v}$	Vertikalgeschwindigkeit der Fahrgäste oder Fussgänger [m/s]
W_{tot}	Gesamter Energieaufwand des Fahrgastes bei der Fahrt [J]
W_{Auf}	Spezifischer Energieverbrauch bei Aufenthalt [J/s]
W_{Bew}	Spezifischer Energieverbrauch zur Bewegung [J/s]
$W_{Bew,h}$	Spezifischer Energieverbrauch bei horizontaler Bewegung [J/s]
$W_{Bew,v}$	Spezifischer Energieverbrauch bei vertikaler Bewegung [J/s]
x	Laufkoordinate längs der Fahrtrichtung [m]
y	Laufkoordinate quer zur Fahrtrichtung [m]
ϕ	Öffnungswinkel des Einzugsgebietes einer Tür [-]
K	Bestimmte Grösse der relativen Fahrgastwechselzahl [-]
$\sigma_{h,fm}$	Standardabweichung der mittleren Fahrgastwechselzeit [s/P]
$\sigma_{L,s}$	Standardabweichung der spezifischen Türleistungsfähigkeit [sm/P]
σ_L	Standardabweichung der effektiven Leistungsfähigkeit des Türsystems [P/s]
$\sigma_{h,fs}$	Standardabweichung der spezifischen Fahrgastwechselzeit [sm/P]
τ	Bestimmter Wert der spezifischen Fahrgastwechselzeit [sm/P]

A.33 Verschiedene Abkürzungen

ABB	ASEA-Brown Boveri
ACMV	Ateliers des Constructions Métalliques de Vevey
ATAC	Azienda Tranvie ed Autobus del Comune di Roma
BBC	Brown, Boveri & Cie
BLT	Baselland Transport AG
BO	Bau- und Betriebsordnung
BO Kraft	Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr
BO Strab	Verordnung über den Bau und Betrieb der Strassenbahnen
BOGESTRA	Bochum-Gelsenkirchener Strassenbahnen AG

BR	Baureihe
BVB	Basler Verkehrs-Betriebe
CGTE	Compagnie Genevoise des Tramways Electriques
DB	Deutsche Bundesbahn
DR	Deutsche Reichsbahn
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
FGW	Fahrgastwechsel
FS	Ferrovie dello Stato di Italia
FW	Frauenfeld-Wil-Bahn
HHA	Hamburger Hochbahn AG
HEAG	Verkehrsbetriebe Darmstadt
ICE	Inter City Express
IVT	Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau an der ETH Zürich
LHB	Linke-Hoffmann-Busch
LOS	Level of Service
KVG	Kasseler Verkehrs-Gesellschaft AG
MAN	Maschinenfabrik Augsburg/Nürnberg
NPZ	Neuer Pendelzug
NS	Nederlandse Spoorwegen
ÖPNV	Öffentlicher Personen-Nahverkehr
RAS-Ö	Richtlinien für die Anlage von Strassen - Teil: Anlagen des öffentlichen Personennah- verkehrs
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SEMITAG	Société d'Economie Mixte des Transports en Agglomération Grenobloise
SIG	Schweizerische Industriegesellschaft Neuhausen
SL	Storstockholms Lokaltrafik
SL	Standardlinienbus
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français
SOK	Schienenoberkante
SWP	Schindler Waggons Pratteln
TN	Compagnie des Tramways de Neuchâtel
TPG	Transports Publics Genevois
UIC	Union Internationale des Chemins de fer
VBZ	Verkehrsbetriebe Zürich
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
VEB	Volkseigener Betrieb (ex-DDR)
VÖV	Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe
VST	Vereinigung Schweizerischer Transportunternehmungen des öffentlichen Verkehrs

A.4 Tabellen zu den Systemkomponenten
A.41 Abgrenzung und Beschreibung der Levels-of-Service im Fußgängerverkehr

<p>LOS A 0.00 bis 0.10 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Freie Geschwindigkeitswahl Keine erzwungenen Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fußgänger nicht erforderlich Kein erzwungener Richtungswechsel Keine Behinderung bei Querung eines Fußgängerstromes Keine Behinderung bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Keine Behinderung beim Überholen Keine unbeabsichtigte Berührung</p>
<p>LOS B 0.10 bis 0.30 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Freie Geschwindigkeitswahl Keine erzwungenen Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fußgänger erforderlich Kein erzwungener Richtungswechsel Keine Behinderung bei Querung eines Fußgängerstromes Keine Behinderung bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Keine Behinderung beim Überholen, aber Richtungswechsel nötig Keine unbeabsichtigte Berührung</p>
<p>LOS C 0.30 bis 0.45 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Geschwindigkeitswahl bei Gegenverkehr leicht eingeschränkt Keine erzwungenen Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fußgänger erforderlich Gelegentliche Richtungswechsel nötig, vor allem bei Gegenverkehr Bis zur Hälfte der Querungen eines Fußgängerstromes werden behindert Gelegentliche Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Leichte Behinderung beim Überholen, Richtungswechsel nötig Keine unbeabsichtigte Berührung</p>
<p>LOS D 0.45 bis 0.60 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Geschwindigkeit nicht mehr frei wählbar Vermehrt erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fußgänger erforderlich Richtungswechsel nötig Über die Hälfte der Querungen eines Fußgängerstromes werden behindert Starke Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Starke Behinderung beim Überholen, Richtungswechsel nötig Keine unbeabsichtigte Berührung</p>
<p>LOS E 0.60 bis 0.75 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Geschwindigkeit deutlich eingeschränkt Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fußgänger erforderlich Richtungswechsel nötig Nahezu alle Querungen eines Fußgängerstromes werden behindert Starke Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Überholen schwierig Keine unbeabsichtigte Berührung</p>

<p>LOS F 0.75 bis 1.00 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Massiv eingeschränkte Geschwindigkeitswahl Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fussgänger erforderlich Häufige erzwungene Richtungswechsel Alle Querungen eines Fussgängerstromes behindert Massive Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung, Gegenverkehr nahezu unmöglich Überholen nur bei gegenseitiger Berührung möglich Keine unbeabsichtigte Berührung</p>
<p>LOS G 1.00 bis 1.50 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Keine freie Geschwindigkeitswahl Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fussgänger erforderlich Häufige erzwungene Richtungswechsel Alle Querungen eines Fussgängerstromes behindert, mit gegenseitiger Berührung verbunden Massive Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung, Gegenverkehr nahezu unmöglich, mit gegenseitiger Berührung verbunden Überholen unmöglich Unbeabsichtigte Berührungen</p>
<p>LOS H 1.50 bis 2.00 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Keine freie Geschwindigkeitswahl, Gedränge Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fussgänger erforderlich Häufige erzwungene Richtungswechsel Alle Querungen eines Fussgängerstromes behindert, mit gegenseitiger Berührung verbunden Massive Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung, Gegenverkehr nahezu unmöglich, mit gegenseitiger Berührung verbunden Überholen unmöglich Unbeabsichtigte Berührungen häufig</p>
<p>LOS I 2.00 bis 5.00 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Keine freie Geschwindigkeitswahl, Stillstand bei 5 P/m² Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel, stossweise Fortbewegung Beachtung anderer Fussgänger erforderlich, Verhalten wie in Kolonne Häufige erzwungene Richtungswechsel Querungen unmöglich Gegenverkehr unmöglich Überholen unmöglich Unbeabsichtigte Berührungen unvermeidbar</p>

A.42 Latenzzeiten I und II sowie gesamte feste Haltezeitanteile gemäss verschiedenen Quellen

Quelle	Latenzzeit I	Latenzzeit II	feste Haltezeitanteile	Bemerkungen
[34]			10.0	Strassenbahn, Autobus
[34]		4.1		Autobus GB, gemäss [Chapman 1976]
[34]		4.6		Autobus GB, gemäss [Chapman 1975]
[34]		5.5		Autobus, nach [Bly 1974]
[34]		6.6		Messungen VST Schweiz
[34]		4.1		Autobus, nach [Fishwick 1970]
[34]			6.9	Zweiwagen-Strassenbahn [Dörfler]
[34]			5.22	Zweiwagen-Strassenbahn [Dörfler]
[34]			7.1	Dreiwagen-Strassenbahn [Dörfler]
[34]			7.1	Strassenbahn, nach [Brändli]
[92]			4.1	Autobus
[90]			1.0-6.5	Autobusse GB, verschiedene Abfertigungssysteme
[91]		3.5		Autobus Newcastle
[113]	0.98	14.24	15.22	S-Bahn Frankfurt, BR 420
[281]		3.0-5.0		Strassenbahn
[298]			7.5(-9.5)	Strassenbahnen
[298]			9.15-14.56	S-Bahn Stuttgart, BR 420
[328]			6.0-9.0	Stadtbahn BRD
[425]			7.0-10.0	Strassenbahn, Bus
[426]			7.0-10.0	Strassenbahn
[449]	2.0-5.0	2.0-5.0	4.0-10.0	Autobus USA
[505]			4.0	Autobus USA, keine Behinderung
[505]			9.3	Autobus USA, Behinderung IV
[541]		8.0		Strassenbahn Dresden
[543]			11.5	Strassenbahn Halle
[546]		5.0		Strassenbahn, Autobus
[548]		7.0		Strassenbahn
[548]		5.0		Autobus
[559]			11.3	Trolleybus BVB, Serie 911 ff.
[559]			10.5	Trolleybus BVB, Serie 921 f.
[559]			9.3	Niederflurbus MAN-NG 272
[590]		6.0		Strassenbahn Berlin
[590]		5.1		Autobus Berlin
[590]		4.0		Trolleybus Berlin
[590]		5.2		S-Bahn Berlin

Latenzzeit I: Zeit zwischen Anhalteruck und Beginn des Fahrgastwechsels

Latenzzeit II: Zeit zwischen Ende des Fahrgastwechsels und Anfahruck

Feste Haltezeitanteile: Summe von Latenzzeit I und Latenzzeit II

A.5 Tabellen zu den bisherigen Erkenntnissen über den Fahrgastwechsel

A.51 Zeitbedarf für verschiedene Abfertigungsarten

Abfertigungsprinzip Abfertigungsverfahren Genauere Spezifikation	Zeit- bedarf [s/P]	Quelle
Verkauf des Fahrausweises durch Fahrer, Entwertung durch Automaten im Fahrzeug	2.3	[496]
Verkauf und Entwertung des Fahrausweises durch Fahrer		
Abfertigung ohne Ausgabe von Fahrausweisen	4.8	[186]
Einheitsgeldbetrag, Taxmarke oder eine Münze, Zahlbüchse	2.0-3.0	[186]
	2.6-3.0	[449]
	2.0	[270]
	3.0	[269]
	2.0-3.0	[269]
Mehrere Geldmünzen, Zahlbüchse	3.0-4.0	[269]
	3.0	[232]
	5.6	[186]
Fahrausweisverkauf und Entwertung durch Fahrer, ohne Rückgeld		
Vorgedruckte Fahrausweise, keine Registrierkasse	-	-
Vorgedruckte Fahrausweise, Registrierkasse	-	-
Fahrausweisverkauf mit Billettdrucker	-	-
Fahrausweisverkauf mit Umsteigeberechtigung	-	-
Fahrausweisverkauf und Entwertung durch Fahrer, mit Rückgeld		
Vorgedruckte Fahrausweise, keine Registrierkasse	4.0	[582]
	4.1	[92]
	2.6	[270]
Vorgedruckte Fahrausweise, Registrierkasse	5.9	[376]
	6.0	[269]
Fahrausweisverkauf mit Billettdrucker	5.5	[496]
Verkauf von Fahrausweisen mit Umsteigeberechtigung	6.0-8.0	[269]
	6.0-8.0	[186]
	8.0	[232]
	9.0	[34]
	9.0	[125]
	5.4	[186]
Fahrausweiserwerb im Vorverkauf, Entwertung im Fahrzeug		
Entwertung von Billetten für Einzelfahrten		
Entwertung durch Fahrer	3.0	[125]
	4.0	[232]
Entwertung durch Automat beim Einstieg	3.0	[232]
	2.9	[125]
	1.8	[34]
Entwertung von Billetten mit Umsteigeberechtigung		
Entwertung durch Fahrer	4.0-6.0	[269]
Entwertung durch Automat beim Einstieg	9.1	[186]
Entwertung von Mehrfahrtenkarten		
Entwertung durch Fahrer	2.9	[34]
Entwertung durch Automat	-	-
Nur Kontrolle der Fahrgäste durch den Fahrer	1.5	[125]

A.52 Mittlere Fahrgastwechselzeit gemäss verschiedenen Quellenangaben

Ohne anderslautenden Hinweis sind die in der folgenden Tabelle zusammengefassten Literaturangaben Mittelwerte für Ein- und Aussteiger sowie für Spitzen- und Nebenverkehrszeiten.

Quelle	t _{FGW} [s/P]	b _L [m]	d _h [m]	Bemerkungen, genauere Spezifikation
1. Ohne Höhendifferenz				
1.1 Einspurige Türen				
[26]	1.04	0.96	0.16	BR 470 der DB, Hamburger S-Bahn
[113]	1.11	1.00	(0.10)	BR 420 der DB, Hochperron
[113]	0.98	0.96	0.16	BR 470 der DB, Hamburger S-Bahn
[124]	0.80	0.70	0.00	Längsbewegung 0.2 m/s, Modellversuch
[124]	0.64	0.90	0.00	Längsbewegung 0.2 m/s, Modellversuch
[376]	2.00	(0.70)	0.10	Stadtbahnwagen BOGESTRA
[408]	1.00	(1.00)	(0.10)	Stadtschnellbahn, keine Spezifikation
[411]	1.00	0.90	(0.10)	Stadtschnellbahn, keine Spezifikation
[425]	1.20	0.65	0.00	keine Spezifikation
[433]	1.06	0.96	(0.10)	BR 470 der DB, S-Bahn-Hamburg, 15 Pers.
[599]	0.94	(1.00)	(0.00)	U- und S-Bahnen, keine Spezifikation
1.2 Zweispurige Türen				
[124]	0.54	1.40	0.00	Längsbewegung 0.2 m/s, Modellversuch
[425]	1.00	1.10	0.00	keine Spezifikation
[433]	1.02	1.07	(0.10)	DT1 der Hamburger U-Bahn
[433]	0.91	1.21	(0.10)	DT3 der Hamburger U-Bahn
[433]	0.85	1.21	(0.10)	DT3 der Hamburger U-Bahn
[433]	0.90	1.30	(0.10)	U-Bahn München
[434]	0.85	1.21	(0.10)	DT3 der Hamburger U-Bahn
1.3 Dreispurige Türen				
[471]	0.63	1.90	(0.10)	Modellversuche Variante 35, Zürcher S-Bahn
2. Mit Höhendifferenz				
2.1 Einspurige Türen				
[33]	1.90	0.80	0.76	Autobus Büssing VBZ Zürich, Türe 3
[33]	1.45	0.82	0.68	Gelenkbus Saurer VBZ Zürich, Türe 3
[34]	1.49	0.80	0.75	Tramwagen VBZ Zürich
[34]	1.40	(0.75)	(0.75)	Nur Aussteiger, Autobus
[34]	1.20	(0.75)	(0.75)	Nur Aussteiger, Autobus
[48]	3.00	(0.75)	(0.75)	Stadtbahnwagen der BOGESTRA
[67]	2.30	(0.80)	(0.90)	Tramwagen VBZ Zürich
[67]	1.49	(0.80)	(0.75)	Tramwagen VBZ Zürich
[92]	1.40	(0.75)	(0.75)	Nur Aussteiger, Autobus GB
[130]	3.60	(0.90)	(0.85)	Fernreisezugwagen DR, Perron <720 mm
[130]	2.70	(0.90)	(0.50)	Fernreisezugwagen DR, Perron >720 mm
[232]	1.90	(0.75)	(0.75)	Autobus, keine Spezifikation
[269]	2.00	(0.75)	(0.75)	Nur Einsteiger, Autobus USA
[281]	1.90	0.65	(0.75)	Strassenbahn München
[320]	2.76	1.00	0.68	Reisezugwagen Bghw der DR, Perron 380 mm
[320]	1.86	1.00	0.30	Reisezugwagen Bghw der DR, Perron 760 mm
[320]	2.71	0.89	0.87	Reisezugwagen Bm der DR, Perron 380 mm

[320]	1.98	0.89	0.49	Reisezugwagen Bm der DR, Perron 760 mm
[376]	3.00	(0.70)	0.86	Stadtbahnwagen BOGESTRA
[376]	2.60	(0.70)	0.58	Stadtbahnwagen BOGESTRA
[376]	2.40	(0.70)	0.46	Stadtbahnwagen BOGESTRA
[425]	2.00	0.65	(0.75)	keine Spezifikation
[449]	1.93	(0.75)	0.75	Autobus, Einfachtüre
[469]	1.75	0.72	(0.70)	RABDe 12/12, SBB
[469]	1.70	0.72	(0.70)	Einheitswagen I/II, SBB
[486]	1.43	0.72	0.73	Einheitswagen I der SBB, Aussteiger
[486]	1.85	0.72	0.73	Einheitswagen I der SBB, Einsteiger
[584]	2.28	0.89	0.49	Fernverkehrswagen Büm DB, Perron 760 mm
2.2 Zweispurige Türen				
[26]	0.94	1.49	0.34	Nahverkehrswagen der DB
[26]	1.03	1.49	0.72	Nahverkehrswagen der DB
[26]	1.06	1.49	0.85	Nahverkehrswagen der DB
[26]	1.01	1.54	0.65	BR 427 der DB
[26]	0.84	1.54	0.27	BR 427 der DB
[33]	1.10	1.25	0.56	Autobus Büssing VBZ Zürich, Türe 2
[33]	0.89	2x0.82	0.68	Gelenkbus Saurer VBZ Zürich, Türe 2
[33]	0.69	1.29	0.68	Gelenkbus Saurer VBZ Zürich, Türe 4
[33]	1.05	1.25	0.71	Gelenktrolleybus FBW VBZ Zürich, Türe 2
[33]	1.13	1.25	0.61	Gelenktrolleybus FBW VBZ Zürich, Türe 3
[33]	1.16	1.25	0.61	Gelenktrolleybus FBW VBZ Zürich, Türe 4
[33]	1.04	1.22	0.76	Gelenktramwagen Serie 1601 VBZ Zürich
[33]	0.96	1.26	0.68	Gelenktramwagen Serie 2001 VBZ Zürich
[34]	0.83	1.24	0.67	Nur Aussteiger, Anhänger VBZ 711 ff.
[34]	1.01	1.24	0.67	Nur Einsteiger, Anhänger VBZ 787 ff.
[34]	1.25	(1.25)	(0.67)	Nur Einsteiger, Messungen VST
[34]	1.00	1.20	0.75	Tram VBZ Zürich
[67]	1.95	(1.25)	(0.90)	Tramwagen VBZ Zürich
[67]	1.42	(1.25)	(0.75)	Tramwagen VBZ Zürich
[170]	0.93	1.49	0.34	Nahverkehrswagen der DB, FGW 15 Personen
[170]	0.82	1.54	0.27	BR 427 der DB, FGW 15 Personen
[269]	1.11	(1.30)	(0.75)	Nur Aussteiger, Autobus USA
[269]	1.08	(1.30)	(0.75)	Nur Aussteiger, Autobus USA
[320]	1.50	1.20	0.77	Doppelstockwagen der DR, Perron 380 mm
[320]	1.11	1.20	0.39	Doppelstockwagen der DR, Perron 760 mm
[320]	1.44	1.60	0.77	Doppelstockgliederzug DR, Perron 380 mm
[320]	1.30	1.60	0.39	Doppelstockgliederzug DR, Perron 760 mm
[425]	1.70	1.10	(0.75)	keine Spezifikation
[449]	1.15	(1.25)	(0.75)	Autobus
[470]	1.58	1.60	(0.75)	RABDe 8/16, SBB
[470]	1.62	1.30	(0.75)	Personenwagen Emmental-Burgdorf-Thun-Bahn
[486]	0.81	2x0.63	0.75	Leichtstahlwagen SBB, Aussteiger
[468]	0.99	2x0.63	0.75	Leichtstahlwagen SBB, Einsteiger
[496]	1.40	(1.25)	(0.75)	Strassenbahn Hannover
[496]	1.60	(1.25)	(0.50)	Stadtbahn Köln
[600]	1.17	Türe 3	...	Tramwagen Zürich, Serie 1351 ff. und 1501 ff.
2.3 Dreispurige Türen				
[38]	0.70	1.80	0.50	Doppelstockwagen SNCF, Perron 390-550 mm
[469]	0.74	1.90	(0.25)	Doppelstockwagen-Versuche der SBB

(...) Die Werte in Klammern sind geschätzt

A.6 Tabellen zu den eigenen Messreihen

A.61 Regressionsgleichungen der spezifischen Türleistungsfähigkeiten

Fahrzeug, Spezifikation	Spezifische Türleistungs- fähigkeit in Funktion der Fahrgastwechselzahl [P/sm]	Spezifische Türleistungs- fähigkeit in Funktion der spezifischen Türbelastung [P/sm]
SBB, Einheitswagen IV, Winterthur P55	$L_S = 0.4309 \cdot F^{0.1593}$	$L_S = 0.4158 \cdot Q_{T,S}^{0.1593}$
SBB, Einheitswagen IV, Bern P30	$L_S = 0.4739 \cdot F^{0.0946}$	$L_S = 0.4640 \cdot Q_{T,S}^{0.0946}$
NS, Doppelstockwagen, München P950	$L_S = 0.3841 \cdot F^{0.1469}$	$L_S = 0.4221 \cdot Q_{T,S}^{0.1469}$
NS, Doppelstockwagen, München P750	$L_S = 0.3923 \cdot F^{0.1666}$	$L_S = 0.4366 \cdot Q_{T,S}^{0.1666}$
SBB, Doppelstockwagen/T1900 P55	$L_S = 0.2073 \cdot F^{0.2856}$	$L_S = 0.2490 \cdot Q_{T,S}^{0.2856}$
SBB, Doppelstockwagen/T1900 P25	$L_S = 0.2065 \cdot F^{0.2460}$	$L_S = 0.2418 \cdot Q_{T,S}^{0.2460}$
SBB, Doppelstockwagen/T1400 P55	$L_S = 0.3739 \cdot F^{0.1572}$	$L_S = 0.3942 \cdot Q_{T,S}^{0.1572}$
SBB, Doppelstockwagen/T1400 P25	$L_S = 0.4224 \cdot F^{0.0645}$	$L_S = 0.4316 \cdot Q_{T,S}^{0.0645}$
DB, BR 420, München P950	$L_S = 0.7125 \cdot F^{0.0961}$	$L_S = 0.7125 \cdot Q_{T,S}^{0.0961}$
DB, BR 420, München P750	$L_S = 0.7408 \cdot F^{0.0679}$	$L_S = 0.7408 \cdot Q_{T,S}^{0.0679}$
TPG, Niederflurtram Be 4/6	$L_S = 0.5412 \cdot F^{0.0264}$	$L_S = 0.5443 \cdot Q_{T,S}^{0.0264}$
SEMITAG, Niederflurtram	$L_S = 0.6583 \cdot F^{0.0439}$	$L_S = 0.6659 \cdot Q_{T,S}^{0.0439}$
BVB, Gelenktrolleybus 911 ff., T2	$L_S = 0.6107 \cdot F^{0.0093}$	$L_S = 0.6119 \cdot Q_{T,S}^{0.0093}$
BVB, Gelenktrolleybus 911 ff., T3/4	$L_S = 0.6371 \cdot F^{0.0014}$	$L_S = 0.6373 \cdot Q_{T,S}^{0.0014}$
BVB, Gelenktrolleybus 921 f.	$L_S = 0.5568 \cdot F^{0.0565}$	$L_S = 0.5646 \cdot Q_{T,S}^{0.0565}$
MAN, Niederflurgelenkbus NG 272, T2	keine Angabe möglich	keine Angabe möglich
MAN, Niederflurgelenkbus NG 272, T3	$L_S = 0.5461 \cdot F^{0.0586}$	$L_S = 0.5525 \cdot Q_{T,S}^{0.0586}$

A.62 Spezifische Türleistungsfähigkeiten für bestimmte Grössen des Fahrgastwechsels

Betrieb und Fahrzeugtyp	$L_{s,5}$ [P/sm]	$L_{s,10}$ [P/sm]	$L_{s,20}$ [P/sm]	$L_{s,50}$ [P/sm]
SBB, Einheitswagen IV, Bahnhof Winterthur	0.56	0.62	0.69	0.80
SBB, Einheitswagen IV, Bahnhof Bern	0.55	0.59	0.63	0.69
NS, Doppelstockwagen, S-Bahn München/P950	0.49	0.54	0.60	0.68
NS, Doppelstockwagen, S-Bahn München/P750	0.51	0.58	0.65	0.75
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich, T1900/P55	0.33	0.40	0.49	0.63
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich, T1900/P25	0.31	0.36	0.43	0.54
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich, T1400/P55	0.48	0.54	0.60	0.69
SBB, Doppelstockwagen, S-Bahn Zürich, T1400/P25	0.47	0.49	0.51	0.54
DB, BR 420, S-Bahn München/P950	0.83	0.89	0.95	1.04
DB, BR 420, S-Bahn München/P750	0.83	0.87	0.91	0.97
TPG Genf, Niederflurtram Be 4/6	0.56	0.58	0.59	0.60
SEMITAG Grenoble, Niederflurtram	0.71	0.73	0.75	0.78
BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 911 ff.	0.62	0.62	0.63	0.63
BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 911 ff.	0.64	0.64	0.64	0.64
BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 921-922	0.61	0.63	0.66	0.69
MAN, Prototyp-Niederflurgelenkbus NG 272	0.68	0.68	0.66	0.61
MAN, Prototyp-Niederflurgelenkbus NG 272	0.60	0.62	0.65	0.69

Erklärung

$L_{s,5}$ Spezifische Leistungsfähigkeit bei einer Fahrgastwechselzahl von 5 Personen

Lebenslauf von Ulrich Alois Benedikt Weidmann

<i>Geburtsdatum</i>	21. März 1963	
<i>Geburtsort</i>	Chur	
<i>Bürgerort</i>	Einsiedeln, Kanton Schwyz	
<i>Wohnorte</i>	1963-1964	Chur
	1964-1967	Flüelen
	1967-1969	Brunnen
	1969-1972	Schwyz
	1972-1994	Zürich
	1994-	Kehrsatz
<i>Ausbildung</i>	1970-1972	Primarschule in Schwyz
	1972-1976	Primarschule in Zürich
	1976-1983	Literargymnasium Rämibühl Zürich, Maturität des Typus B
	1983-1987	Studium des Bauingenieurwesens an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich mit Vertiefung in Verkehrsingenieurwesen und Wasserbau, 1987 Diplom als dipl. Bauingenieur ETH
<i>Berufstätigkeit</i>	1988-1994	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau IVT der ETH Zürich unter Prof. Heinrich Brändli
	1994-	Ingenieur in der Betriebsdirektion der Generaldirektion der Schweizerischen Bundesbahnen, Abteilung Strategien und Konzepte
<i>Arbeiten</i>	1988-1994	Dissertation "Der Fahrgastwechsel im öffentlichen Personenverkehr". Referent: Prof. Heinrich Brändli, Inhaber des Lehrstuhles für öffentlichen Verkehr am IVT, Zürich; Korreferent: Dr. Adolf Müller-Hellmann, Geschäftsführer Technik des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen, Köln
	1988-1994	Mehrere praktische Gutachten zum Fahrgastwechsel
	1988-1994	Mitarbeit in der Lehre, insbesondere Koordination der Vorlesungsüberarbeitung im Bereich öffentlicher Verkehr
	1988	Betriebssimulation der SBB-Strecke Zürich-Meilen-Rapperswil mit dem Computerprogramm RWS
	1989	Betriebsstudie für die Linie St.Gallen-Gais-Appenzell der Appenzeller Bahnen
	1990	Grundlagen für ein Gesetz zur Förderung des öffentlichen Verkehrs im Kanton Appenzell Ausserrhoden
	1991-1994	Gesetz, Verordnung und Leitbild zur Förderung des öffentlichen Verkehrs im Kanton Appenzell Ausserrhoden, Mitarbeit in Kommission und Redaktion des Leitbildes
	1993	Bericht zur Zukunft der Bergbahn Rheineck-Walzenhausen
<i>Publikationen</i>	Alle bisherigen Publikationen befassten sich mit dem Fahrgastwechsel und sind im Literaturverzeichnis aufgeführt.	