

Grundlagen zur Berechnung der Fahrgastwechselzeit

Report

Author(s):

Weidmann, Ulrich

Publication date:

1995-06

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001539958>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

IVT Schriftenreihe 106

Grundlagen zur Berechnung der Fahrgast- wechselzeit

Dr. Ulrich Weidmann
dipl. Bauing. ETH/SIA

Schriftenreihe des IVT Nr. 106
Zürich, Juni 1995

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines	3
1.1	Einführung	3
1.2	Einstiegsverhältnisse in Vergangenheit und Gegenwart	3
1.3	Stand der Erkenntnisse und eigene Untersuchungen	15
1.4	Definition der wichtigsten Begriffe	18
2	Eigenschaften und Verhalten der Fahrgäste	21
2.1	Eigenschaften	21
2.2	Bewegung und Leistungsfähigkeit	22
2.3	Gehgeschwindigkeit	32
2.4	Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen	36
3	Die Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre	41
3.1	Modelle und Einflussgrößen	41
3.2	Erwartungswert und Streuung	51
3.3	Abhängigkeit von den Einflussfaktoren	55
3.4	Berechnung der Fahrgastwechselzeit an Einzeltüren	63
4	Die Fahrgastwechselzeit eines Kurses	65
4.1	Modelle und Einflussgrößen	65
4.2	Erwartungswert und Streuung	69
4.3	Abhängigkeit von den Einflussfaktoren	71
4.4	Berechnung der Fahrgastwechselzeit eines Kurses	81
5	Die Fahrgastwechselzeit einer Fahrt	82
5.1	Modell und Einflussgrößen	82
5.2	Häufigkeitsverteilung der Fahrgastwechselzahlen	86
5.3	Standardisierte Häufigkeitsverteilung	87
6	Zusammenfassung und Folgerungen	89
6.1	Berechnungsgang, Zusammenfassung der Beziehungen und Beispiel	89
6.2	Folgerungen bezüglich der Systemkomponente Fahrgast	95
6.3	Folgerungen bezüglich der Systemkomponente Anlage	98
6.4	Folgerungen bezüglich der Systemkomponente Fahrzeug	99
6.5	Folgerungen bezüglich der Systemkomponente Betrieb	107
	Literaturnachweis	120
	Verzeichnis der wichtigsten Abkürzungen	125

1 Allgemeines

1.1 Einführung

Zur Beanspruchung einer öffentlichen Verkehrsleistung bewegt sich ein Fahrgast zur Fahrzeugtüre, durchquert diese und sucht sich im Fahrzeug einen Platz, am Ende der Fahrt verlässt er das Fahrzeug wieder - allein im schweizerischen öffentlichen Verkehr über 13 Millionen Mal pro Tag. Rund 11 % der Beförderungszeit im Nahverkehr wird durch diesen sogenannten Fahrgastwechsel verursacht. Der einzelne Fahrgastwechsel ist mithin zwar ein einfacher, kurzer und unspektakulärer Vorgang. Dessen Häufigkeit lässt ihn aber zu einem relevanten Teilprozess der Produktion werden, was eine diesbezügliche Optimierung des Systems öffentlicher Verkehr verlangt.

Der Fahrgastwechsel ist in vielfältiger Weise mit den Systemkomponenten verknüpft. Als passive Abhängigkeit unterliegt er den Charakteristiken und dem Verhalten der Fahrgäste, der Konzeption und den Abmessungen der festen Anlagen und der Bauart der Fahrzeuge. Er wirkt mit seinem Zeitbedarf und dessen Streuung seinerseits aktiv auf den Betriebsablauf ein. Die Optimierung des Fahrgastwechsels ist deshalb nur mit einer Gesamtbetrachtung möglich, was mit der vorliegenden Arbeit versucht wird.

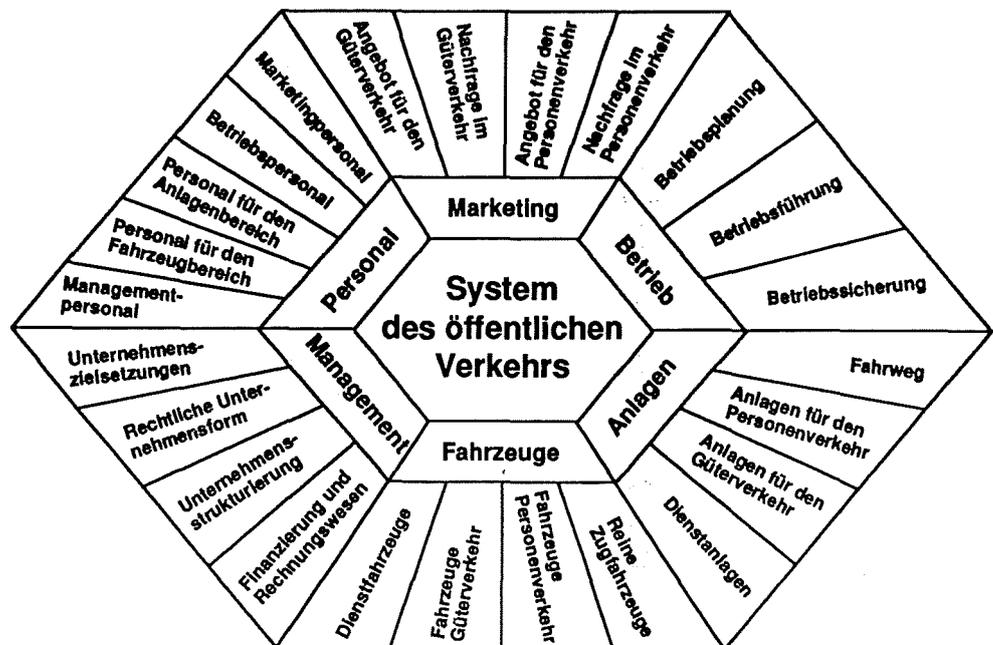


Abb. 1

Die Komponenten des Systems öffentlicher Verkehr.

1.2 1.21

Einstiegsverhältnisse in Vergangenheit und Gegenwart Überblick

Trotz ihres unbestrittenen Stellenwertes im Betriebsgeschehen zieht sich die Fahrgastwechselzeit nicht gerade wie ein roter Faden durch die Theorie des öffentlichen Verkehrswesens. Im Gegenteil: Sie bildete während Jahrzehnten ein Randgebiet der Forschung. Qualitativ erkannt wurde die Bedeutung des Fahrzeugkonzeptes und der Anlagengestaltung für die Fahrgastwechselzeit immerhin bereits im letzten Jahrhundert. Fahrgastwechsel-optimierte Einstiegskonzepte und Perrons lassen sich in reicher Zahl finden. Gleichzeitig zeugt die Geschichte aber vor allem davon, dass günstige Einstiegsverhältnisse anderen Zielgrößen geopfert wurden. Die Anlagenbauer waren meist bestrebt, die Perronhöhen aus wirtschaftlichen und öfters auch betrieblichen Gründen (Karrenüberfahrten) möglichst niedrig zu halten. Den Fahrzeugkonstrukteuren wiederum entstanden am wenigsten Schwierigkeiten bei hohem Wagenboden, welcher bei elektrischen Personentriebwagen auf bis zu 1360 mm über SOK zu liegen

kam. Allzulange wurde eine Einstiegshöhe von rund einem Meter als tragbar und von einem halben Meter als unvermeidlich erachtet. Da Wagenbodenhöhe und Perronhöhe zudem vorwiegend sektoriell optimiert wurden, sieht man sich heute einer Vielzahl diesbezüglicher Kombinationen gegenüber.

Tab. 1

Einstiegssituationen in Abhängigkeit von Perronhöhe und Wagenbodenhöhe.

	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	Treppeneinstieg aufwärts konventionelle Trams und Busse Vorortbahnen Hauptbahnen Nebenbahnen
Mittelflur 600 mm	Treppeneinstieg abwärts selten	ebener Einstieg selten	Treppeneinstieg aufwärts Mittelflurtrams Mittelflurbusse
Niederflur 300 mm	Treppeneinstieg abwärts selten	Treppeneinstieg abwärts Doppelstock- wagen DR	ebener Einstieg Niederflurtrams Niederflurbusse Vorortswagen FS

1.22

Einstiegsgestaltung bei Eisenbahnen und Vorortbahnen

1.22.1

Perronhöhen bei Eisenbahnen und Vorortbahnen

Auf dem Eisenbahnnetz existierten während vieler Jahre Bahnhöfe ohne nennenswerte Perrons. Die Technische Einheit im Eisenbahnwesen von 1887 bestimmte erstmals eine Mindesthöhe von 210 mm. In der Schweiz waren jahrzehntelang 250 mm gebräuchlich, heute sind es bei den SBB je nach den Verhältnissen 350 oder 550 mm. In Deutschland wurden mit 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 (wichtige Stadtbahnhöfe) und 960 mm (S-Bahn-Bereiche) festgeschrieben. Die Deutsche Reichsbahn (Ost) legte zu Beginn der Siebzigerjahre als neue Standardhöhen 300 mm, 550 mm sowie 760 mm fest. Bei den italienischen Bahnen sind Perronhöhen von nur 250 mm üblich.

1.22.2

Fahrzeuggestaltung bei Eisenbahnen und Vorortbahnen

Die Reisezugwagen entwickelten sich in Europa nach dem Vorbild der Postkutsche, indem mehrere Fahrgastzellen mit je eigenem Einstieg auf einem Fahrgestell vereinigt wurden. Der Durchgangswagen mit Mittelgang und Endelstieg aus den USA war dagegen eine eigenständige Schöpfung. Die Abteillwagen waren insbesondere in Grossbritannien und Frankreich während des ganzen 19. Jahrhunderts gebräuchlich. Deren Nachteile wie die aus Lichtraumgründen auf 2650 mm begrenzte Breite, die schlechte Tragwirkung des Wagenkastens und die fehlenden Zirkulationsmöglichkeiten im Fahrzeug überwogen letztlich aber gegenüber dem Vorteil eines raschen Fahrgastwechsels, weshalb sich schliesslich die Durchgangs- und Seitengangwagen durchsetzten. In der Schweiz wurden Abteillwagen nur von den Westschweizer Bahnen

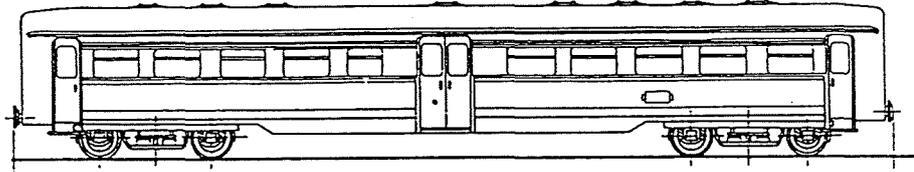


Abb. 5

Vierachsiger Durchgangswagen der DR mit Mittel- und Endeinstieg, gebaut ab 1936 [18].

Doppelstockfahrzeuge für den Vorortverkehr entstanden ab 1857 in Frankreich, Indien, Deutschland und Österreich, haben sich aber erst nach dem Ersten Weltkrieg in grösserem Ausmass verbreitet. Bemerkenswerterweise verliess die Preussische Eisenbahnverwaltung diese beim Berliner Vorortverkehr bereits 1882 infolge zu langer Fahrgastwechselzeiten zugunsten eines Abstellwagens mit Wagenbodenhöhe 770 mm. Die zwei typischen neueren Entwicklungslinien sind Doppelstockwagen mit hohem Endeinstieg (NS, SNCF, SBB) und solche mit Einstieg in das untere Geschoss (ex-DR, USA). Eine Sonderbauart stellen die Doppelstockgliederzüge der ex-DR dar. Doppelgeschossige Perrons, welche den Fahrgastwechsel bei Doppelstockwagen beschleunigen würden, haben das Stadium von Ideenskizzen bisher nicht verlassen, wurden aber bereits 1909 für die Berliner Stadtbahn in Betracht gezogen!

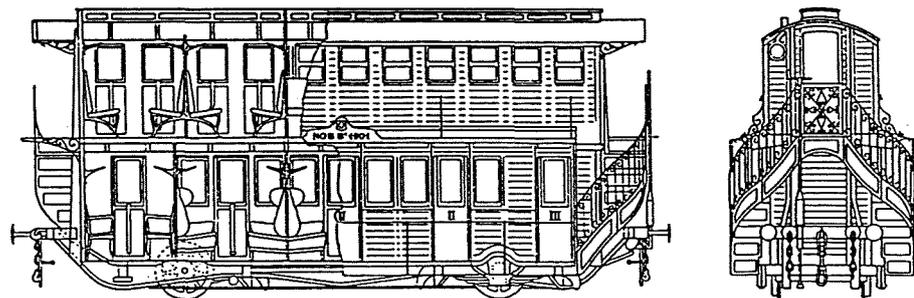


Abb. 6

Doppelstockwagen der Schweizerischen Nordostbahn, gebaut 1875 (Abbildung: SIG).

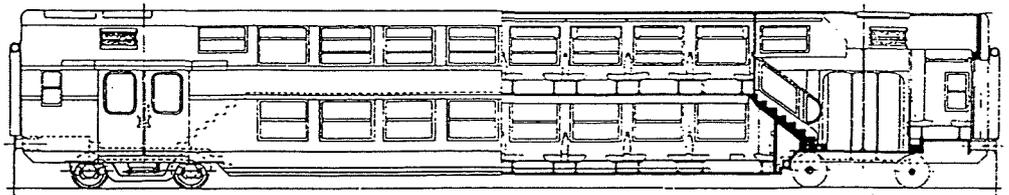


Abb. 7

Doppelstockwagen der SNCF mit Endeinstieg, gebaut ab 1975 [56].

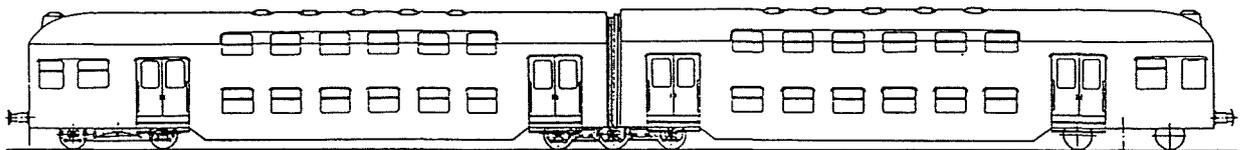


Abb. 8

Doppelstock-Gliederzug der DR, gebaut ab 1954 [18].

Bis in die jüngste Zeit ist keine konsequente Bestrebung zur Verringerung der Wagenbodenhöhe von Eisenbahnfahrzeugen zu erkennen. Exemplarisch zeigen dies die Personentriebwagen und Reisezugwagen der SBB seit etwa 1925. Gewisse Fortschritte zur Mitte des Jahrhunderts wurden später zugunsten besserer Fahrwerke wieder rückgängig gemacht.

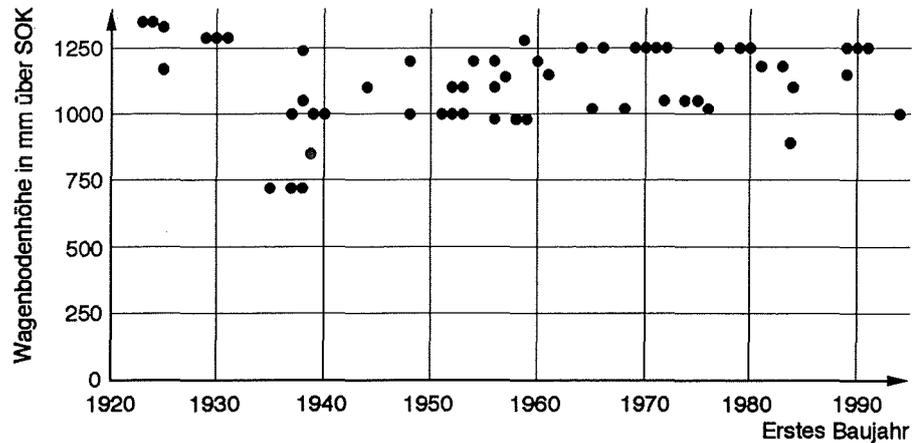


Abb. 9

Wagenbodenhöhen der Personentriebwagen und Reisezugwagen der SBB nach Baujahr.

1.23

Einstiegsverhältnisse bei U-Bahnen

1.23.1

Perronhöhen bei U-Bahnen

Als sich die Einwohnerzahlen der Städte Europas und der USA zur Mitte des vergangenen Jahrhunderts sehr dynamisch entwickelten, war der Anlass zum Bau städtischer Hochleistungssysteme gegeben, der aber nur zögernd einsetzte. Den Untergrundbahnen stellten sich zum ersten bauliche Schwierigkeiten entgegen und zum zweiten eignete sich der Dampftrieb nicht. Die dampfbetriebene Londoner U-Bahn von 1863 wurde 1890 auf elektrischen Betrieb umgestellt. Auf sie folgten neben bescheidenen Ansätzen in New York und Boston erst 1896 Budapest, 1897 Glasgow und 1900 Paris. U-Bahnen unterscheiden sich durch folgende Merkmale von allen anderen Eisenbahnsystemen:

- Kein Mischbetrieb verschiedener Zugsgattungen
- Kein Mischbetrieb mit anderen Verkehrsmitteln
- Abgeschlossene Netze ohne Zwang zur Kompatibilität mit anderen Systemen

Bereits die älteren Netze waren deshalb sehr funktional konzipiert. Die Freiheit in der Wahl der Perronhöhe gestattete eine solche von 900 bis 1150 mm, sodass sich trotz konventioneller Fahrgestelle ein höhengleicher Einstieg schaffen liess.

1.23.2

Fahrzeuggestaltung bei U-Bahnen

Die Grundrissgestaltung der U-Bahn-Fahrzeuge wird kaum durch Randbedingungen eingeschränkt. Verläuft die Strecke mehrheitlich unterirdisch und bleiben die mittleren Reiseweiten klein, so verlieren einige Nachteile einer hohen Türanzahl, wie Sitzplatzverlust, Wärmeverlust und Störungen durch Klimaeinwirkungen, an Gewicht. Hingegen hat eine kurze Haltezeit oberste Priorität.

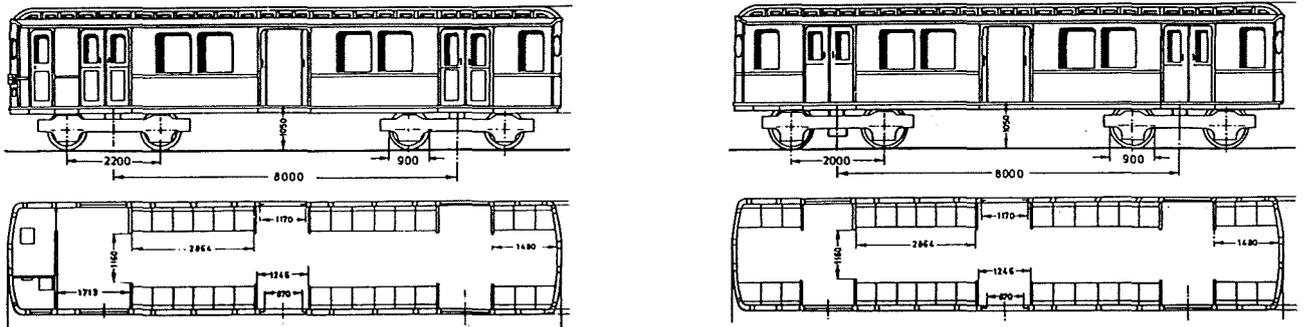


Abb. 10

Triebwagen des Typs B1T (links) und Beiwagen des Typs B1B (rechts) der Berliner U-Bahn, Baujahre 1924-1926 beziehungsweise 1927-1928 [49].

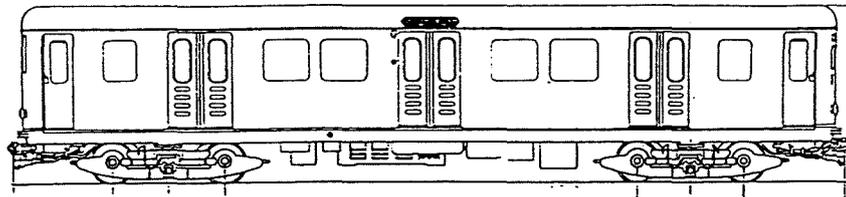


Abb. 11

Triebwagen C1 der U-Bahn Stockholm mit Längssitzen, gebaut ab 1949 (Abbildung: SL).

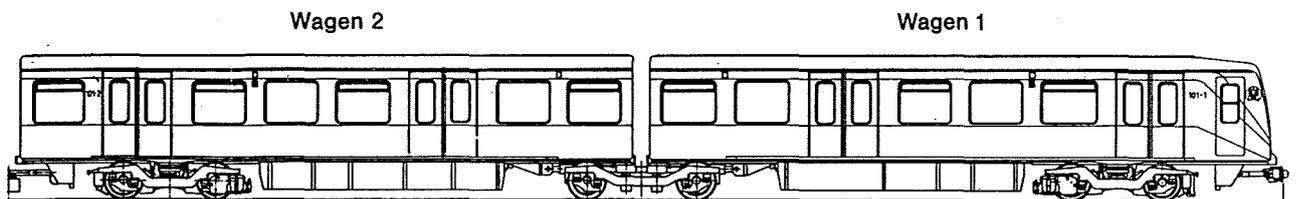


Abb. 12

Viertelliger Triebwagen der U-Bahn Hamburg (Abbildung: ABB).

Besondere Umstände führten dazu, dass dennoch eine U-Bahn den ersten Niederflurtriebwagen verzeichnet: Die U-Bahn Budapest von 1896 sollte möglichst nahe an der Strassenoberfläche verkehren, denn der Bauaufwand musste klein gehalten und ein bestehender Abwassersammelkanal gekreuzt werden. Dies zwang zu Fahrzeugen mit Schwannenhalsträger und extrem tiefem Wagenboden auf nur 500 mm über SOK. Diese Fahrzeuge wurden erst 1973 durch 23 neue niederflurige Gliederzüge ersetzt.

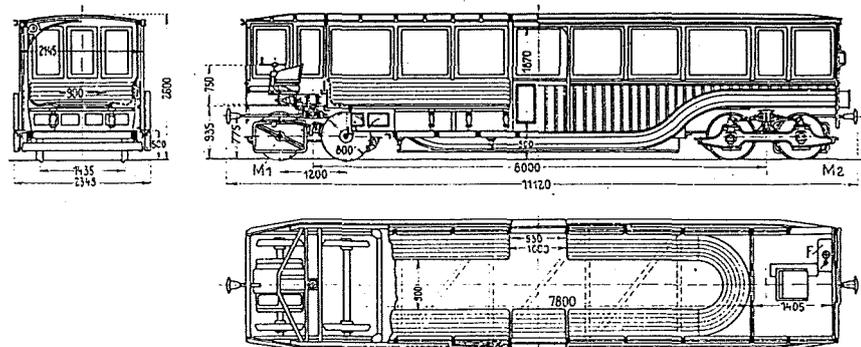


Abb. 13

Triebwagen der U-Bahn Budapest aus dem Jahre 1896 [113].

1.24

Einstiegsgestaltung bei Strassenbahnen und Stadtbahnen

1.24.1

Perronhöhen bei Strassenbahnen und Stadtbahnen

Haltestelleninseln von Strassenbahnen wurden bisher mit Höhen von 100 bis 160 mm ausgeführt. Die Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung erlauben in der Schweiz 180 mm, in den Normalien der Verkehrsbetriebe Zürich werden davon allerdings nur 130 mm ausgenützt. Die RAS-Ö, Strassenbahn, der BRD nennen dagegen nur 50 mm. Höhere Werte gestattete die ostdeutsche BO Strab mit ursprünglich 350 mm und später 250 mm. Erst mit der jüngsten Einführung von Niederflurfahrzeugen werden grössere Perronhöhen von 200 bis 250 mm realisiert.

Stadtbahnen sind bezüglich Perronhöhe ebenfalls stark gebunden. Hochperrons im Strassenraum leiden unter Akzeptanzschwierigkeiten, da sie mit voller Höhe in Erscheinung treten. Eine Gleisabsenkung im Haltestellenbereich wurde bisher nur in Frankfurt am Main angewandt. Die Zurückhaltung ist auf die ungünstige Fahrdynamik und die grosse Entwicklungslänge der Gefällswchsel zurückzuführen.

1.24.2

Fahrzeuggestaltung bei Strassenbahnen und Stadtbahnen

Bei Strassenbahnen sind ein- und mehrteilige Fahrzeuge mit sehr unterschiedlichen Türanordnungen üblich. Die Vielfalt der Konstruktionen wird durch die engen Kurvenradien und die diversen Abfertigungsarten hervorgerufen. Fahrzeuge mit End- oder Mitteleinstieg werden seit der Einführung des Fahrgastflusses und dem Aufkommen von Gelenkwagen nicht mehr beschafft. Doppelstöckige Fahrzeuge, welche in Grossbritannien aufgrund des Anhängerverbotes und zur Vermeidung von Stehplätzen verbreitet waren (15'000 Fahrzeuge im Jahre 1925), sind praktisch verschwunden. Dem grossen Sitzplatzangebot stand die stark verlängerte Fahrgastwechselzeit gegenüber.

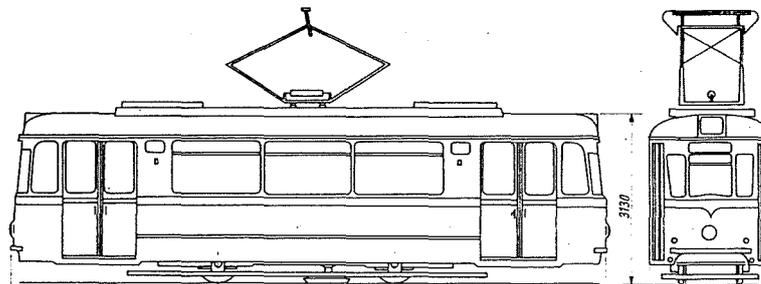


Abb. 14

Endeinstiegswagen T2-57 des VEB Waggonbau Gotha, gebaut 1957 bis 1961 [118].

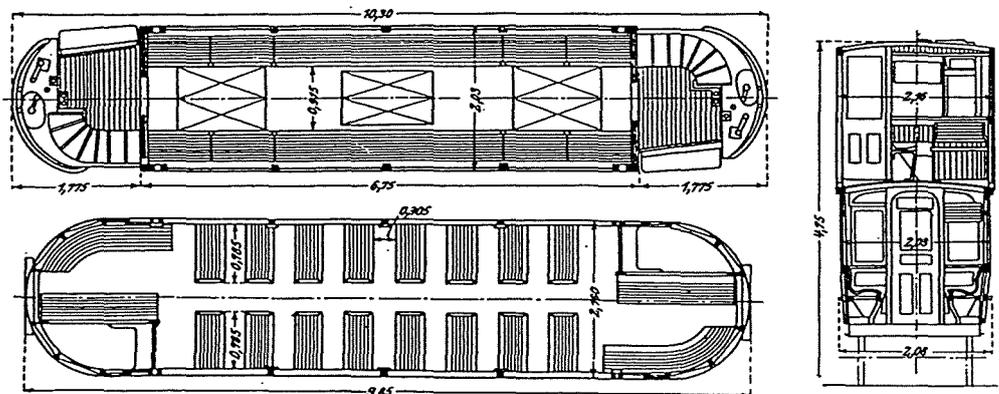


Abb. 15

Doppelgeschossiger Strassenbahnwagen von London, Zwanzigerjahre [109].

Bis zur Verbreitung der Niederflurfahrzeuge erforderten die Einstiegshöhen stets zwei bis drei Trittstufen. Wie bei den Vollbahnfahrzeugen ist insgesamt während Jahrzehnten keine spürbare Verbesserung der Einstiegsverhältnisse zu beobachten, trotz gelegentlicher diesbezüglicher Überlegungen:

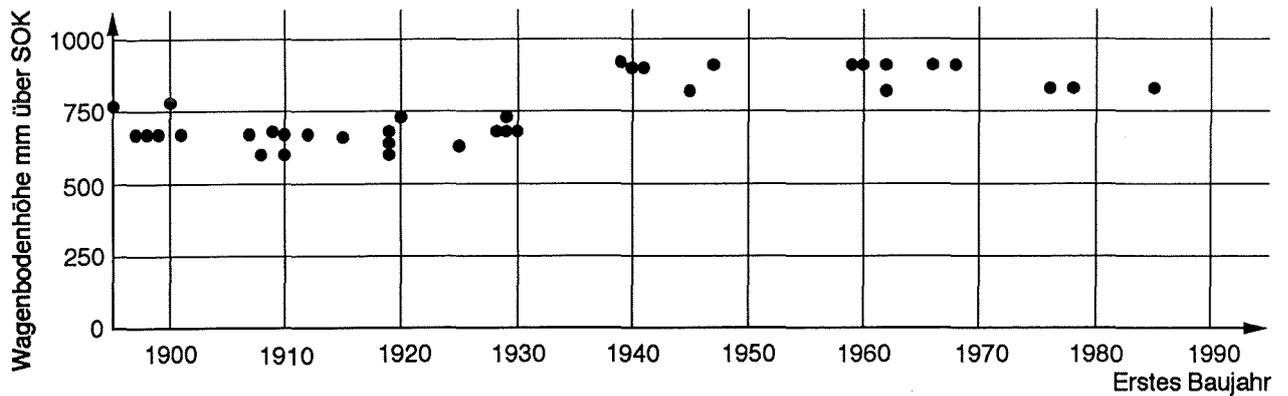


Abb. 16

Wagenbodenhöhe der Strassenbahnfahrzeuge der Verkehrsbetriebe Zürich nach Baujahr.

Der wohl früheste Niederflurwagen wurde 1891 für die Pferdebahn Wien gebaut. Die ersten schweizerischen Niederflurfahrzeuge waren die zwei Tramwagen der Bergbahn Rheineck-Walzenhausen von 1909 und der Niederflurzug 401/451 mit Mitteleinstieg der Basler Strassenbahnen von 1914. Um den ersten Weltkrieg wurden in den USA einige hundert Niederflurtramwagen eingesetzt. 1912 beschafften New York über 200 und Brooklyn hundert sowie 1916 bis 1920 die Bostoner Strassenbahn 405 Niederflurwagen. In der Zwischenkriegszeit wurden Niederflurfahrzeuge in Europa ebenfalls stark diskutiert und in der Folge einzelne Typen, vornehmlich mit Mitteleinstieg, in Betrieb gesetzt. Zu erwähnen sind etwa die Mittelflurtriebwagen der Serie Ce 2/4 156 - 165 der CGTE Genf von 1920, die beiden Niederflurtriebwagen 1376 und 1377 der Strassenbahn Leipzig von 1926, die grosse Leipziger Niederflur-Beiwagenserie 2001 - 2104 mit Baujahr 1926 bis 1928 sowie der Essener Montos-Wagen von 1932 mit lenkbaren Einzelradfahrwerken. Der Mitteleinstieg versprach zwar technische Vereinfachungen und erleichterte dem Kondukteur die Überwachung des Fahrgastwechsels. Er zwang diesen aber beim Billetverkauf zum ständigen Treppensteigen im Wagen.

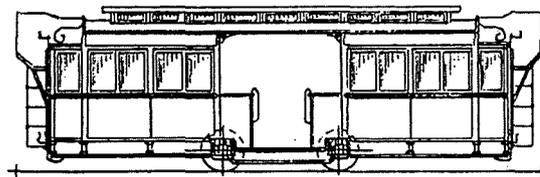


Abb. 17

Niederflurwagen 204 der Wiener Tramway-Gesellschaft für Pferdebetrieb von 1891 [44].

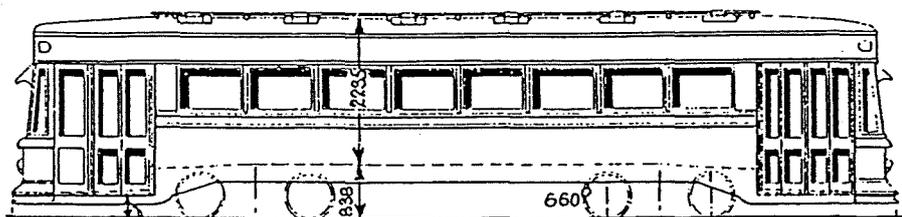


Abb. 18

Tramwagen von Wilmington mit Tiefeinstieg bei den Endplattformen [40].

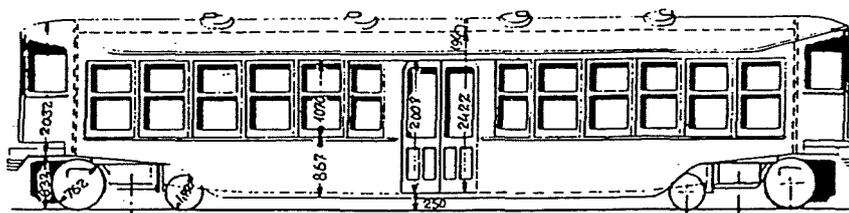


Abb. 19

Niederflur-Mitteleinstiegswagen der New York Railway Co, gebaut 1912 [1].

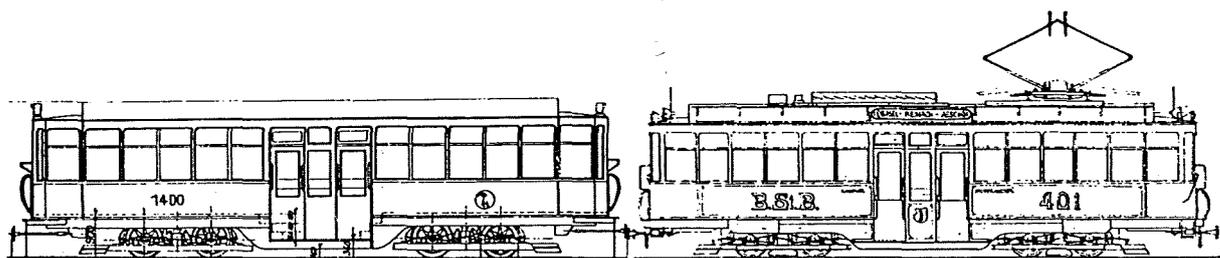


Abb. 20

Niederflurzug 401/451 der Basler Strassenbahn von 1914 [6].

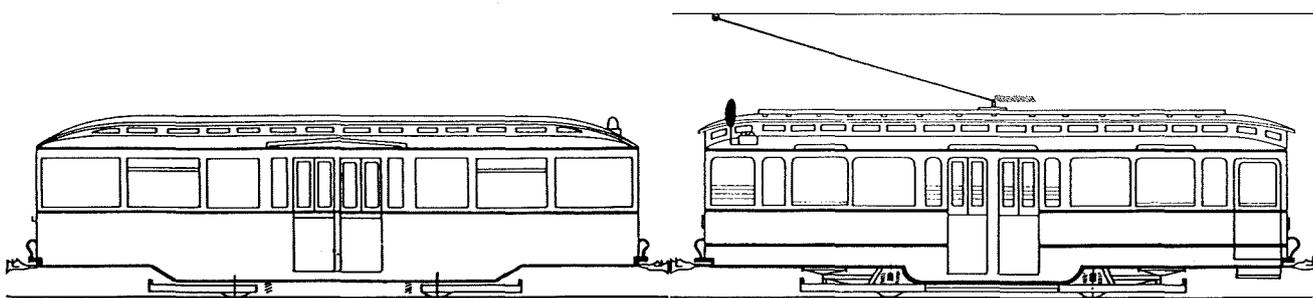


Abb. 21

Niederflurzug 1376/2001 der Strassenbahn Leipzig von 1926 [118].

Nach dem Zweiten Weltkrieg war der Fahrzeugbau bezüglich der Einstiegsverhältnisse wenig innovativ; einzig in den Vierziger- und Fünfzigerjahren wurden Versuche mit Kleinradfahrwerken angestellt. Von 1944 liegen aus der Schweiz unrealisierte Projekte für leichte Mittelflurwagen vor. 1948 wurde in Italien die Normierung eines vierachsigen Tramwagens mit hinterem Kleinradlaufgestell geprüft und ein entsprechender Prototyp gebaut. Die ungünstigen Traktionseigenschaften hoffte man durch kürzere Haltezeiten auszugleichen. Das gleiche Konzept verfolgten die drei Triebwagen Be 2/4 der Basler Verkehrsbetriebe von 1952 und die Rotterdamer Gelenkwagen von 1956.

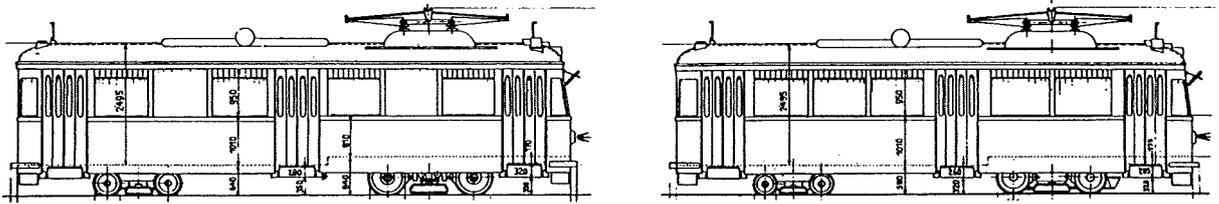


Abb. 22

Projekte der BBC aus dem Jahre 1944 für leichte Mittelflurtriebwagen Be 2/4 mit Kleinraddrehgestell [28].

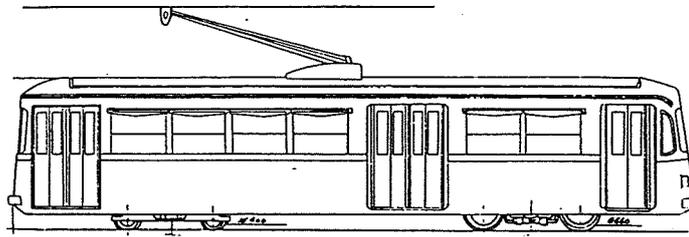


Abb. 23

Triebwagen der A.T.A.C. Roma mit hochflurigem Motor- und niederflurigem Laufdrehgestell, gebaut 1948 [119].

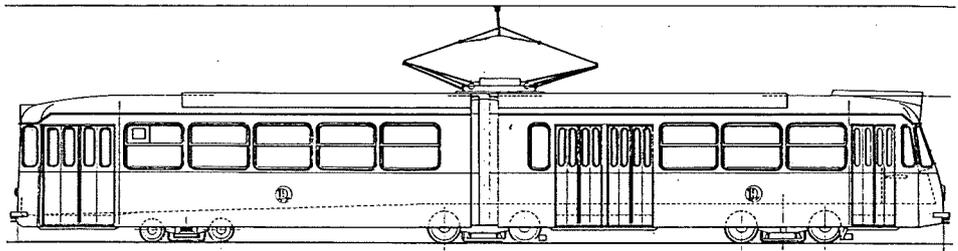


Abb. 24

Gelenktriebwagen der Strassenbahn Rotterdam von 1956 [76].

Erst in den Achzigerjahren intensivierte sich die Entwicklung von Niederflur-Strassenbahnen wieder. Pioniere waren die Genfer Verkehrsbetriebe, welche 1984 den ersten Niederflurtramwagen einer neuen Generation in Betrieb setzten. Es folgte 1987 das Niederflurstrassenbahnsystem Grenoble mit vollkommen ebenem Einstieg. Mittlerweile wurden gegen 1300 Niederflurstrassenbahnwagen gebaut oder bestellt. Dabei sind drei Gruppen zu unterscheiden:

- | | |
|----------|---|
| 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). |

Ein grosser Nachteil der Gruppe 3 und teilweise auch der Gruppe 2 besteht darin, dass kaum mehr Freiheitsgrade in der Zahl und Anordnung der Einstiege bestehen.

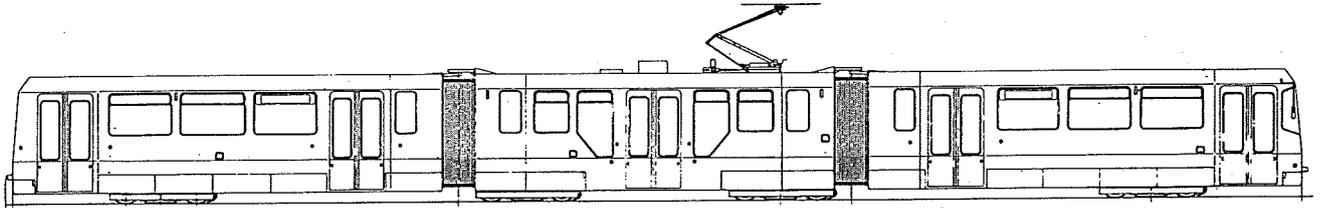


Abb. 25

Niederflurgelenktram Gruppe 1 der Strassenbahn Würzburg, gebaut 1988 (Abbildung: LHB).

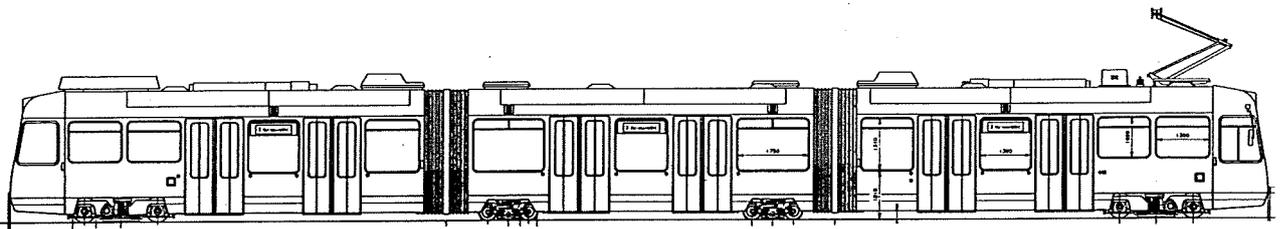


Abb. 26

Niederflurgelenktram Gruppe 2 der Verkehrsbetriebe Bern mit kleinen Laufrädern, gebaut 1990 (Abbildung: ACMV).

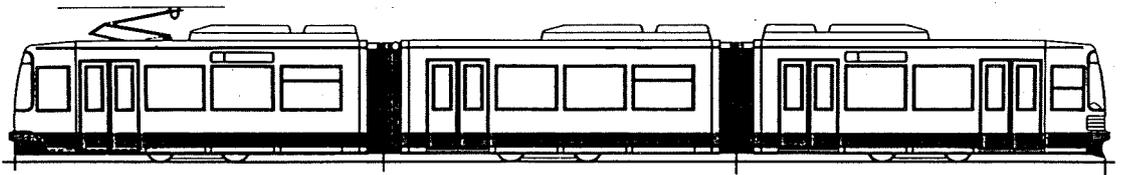


Abb. 27

Niederflurgelenktram Gruppe 3, Typ Bremen (Abbildung: MAN).

Elemente von U-Bahn- und Strassenbahnfahrzeugen vereinigen Stadtbahnen in sich: Einerseits sind sie auf hohe Geschwindigkeiten und raschen Fahrgastwechsel ausgerichtet, andererseits aber unterliegen sie durch bescheidenere Streckenparameter grösseren Restriktionen bezüglich Wagenkastenlänge und -breite. Häufig ist daher wie bei Strassenbahnen der Gelenkwagen anzutreffen, bei welchem aber das für U-Bahnen typische Nahverkehrsmodul mit doppelstüriger Tür und beidseits einem bis zwei Abteilen angewandt wird. Bei Billettverkauf durch den Fahrer ist ein zusätzlicher Einstieg beim Führerstand notwendig.

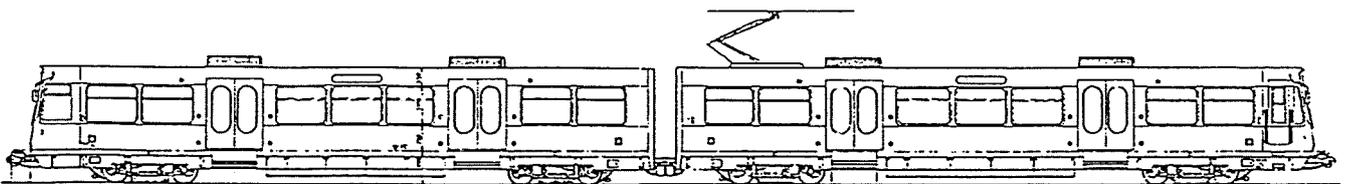


Abb. 28

Doppeltriebwagen der Stadtbahn Stuttgart mit Klapptritten für Niedrigbahnsteige (Abbildung: BBC).

1.25 Einstiegsgestaltung bei Autobussen

1.25.1

Perronhöhe bei Autobussen

Für Busperrons wurden 1978 ein Mindestmass von 140 mm empfohlen und gleichzeitig erste Überlegungen zu einer Anhebung auf 540 mm geäussert. Als zweckmässige Masse ergaben sich aufgrund der damaligen Umstände 320 mm und 520 mm. Anfangs der Achtzigerjahre wurde letzteres im schwedischen Halmstaad tatsächlich erprobt. Es zeigten sich dabei die folgenden Probleme:

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

Die VÖV-Empfehlung 1.15.2 nennt deshalb Perronhöhen von 100 bis 150 mm. Bei den Niederflurbussen mit Kneeling ist eine starke Erhöhung des Perrons nicht mehr notwendig und 180 mm gelten als akzeptabel. Muss das Perron vom Fahrzeug überstrichen werden können, so bleibt dieses Mass auf 160 mm beschränkt.

1.25.2

Fahrzeuggestaltung bei Autobussen

Erst um 1951 löste sich der Autobus vom Lastwagenbau und ebenfalls erst nach dem Zweiten Weltkrieg wurden Gelenkbusse geschaffen, wobei der Malländer Gelenktrolleybus von 1941 eine Pionierrolle spielte. Zunächst entstand eine Vielzahl unterschiedlicher Konzepte. Die überall ähnlichen Anforderungen führten ab 1959 zur Normierung, wobei sich zwei-, drei- und viertürige Standardlinienbusse sowie drei- und viertürige Gelenkbusse herausbildeten. Zweitürige Standard- und dreiftürige Gelenkbusse sind in Deutschland üblich, in der Schweiz werden drei- beziehungsweise viertürige Fahrzeuge bevorzugt und in Italien ist der viertürige Standardbus verbreitet. Doppelstockfahrzeuge haben sich nur in Grossbritannien durchgesetzt. In Ländern mit tiefen Lohnkosten kann der Autobus von einem Kondukteur begleitet werden und die Fahrgäste müssen nicht beim Chauffeur vorbeigeführt werden. Bei gewissen lateinamerikanischen Gelenkbusen ist daher die vorderste Türe hinter der ersten Achse angeordnet. Ähnliche Überlegungen stellen Betrieben an, welche auf den Billettkauf im Fahrzeug verzichten.

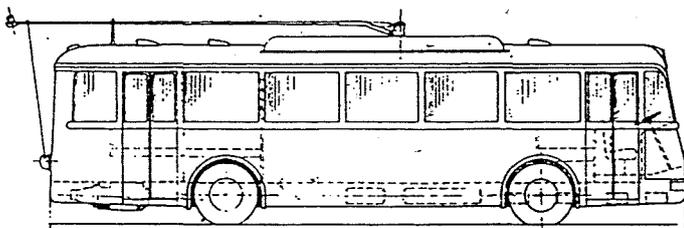


Abb. 29

Zweitüriger Zweiachstrotleybus der CGTE Genève, gebaut 1942 und 1948 [9].

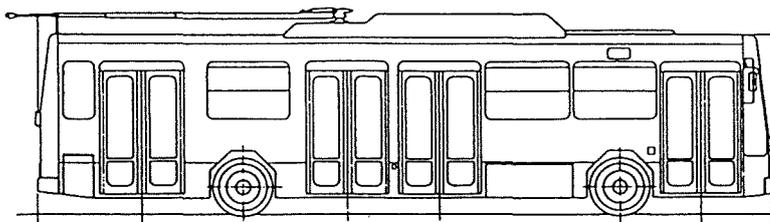


Abb. 30

Viertüriger Zweiachstrotleybus der Malländer Verkehrsbetriebe, FIAT/IVECO/C.G.E., 1983 [35].

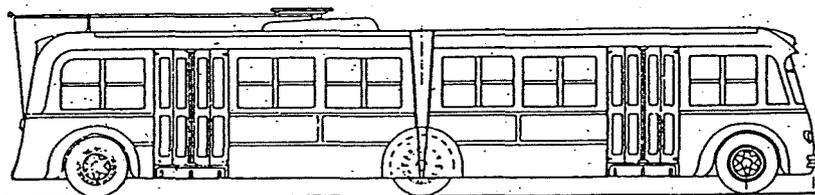


Abb. 31

Gelenktrolleybus mit zwei Türen der Verkehrsbetriebe Mailand, gebaut 1941 [62].

Vorläufer der Niederflrbusse waren die Anderthalbdeck-Busse mit Tiefeinstieg an der hintersten Türe, welche Mitte der Sechzigerjahre in der BRD eine kurze Blüte erlebten. 1975 wurde in Deutschland ein Gelenkbus mit Wagenbodenhöhe 540 mm vorgestellt und im Folgejahr präsentierte NEOPLAN ein Niederflurkonzept mit einer Einstiegshöhe von 300 mm. Erst Ende der Achtzigerjahre aber verbreitete sich die Niederflurtechnik im Autobusbereich endgültig. Die Schwierigkeiten bei der Unterbringung des Antriebs verhalfen zunächst dem Mittelflurbus zu einiger Verbreitung, vor allem in Frankreich. Bei einteiligen Bussen hat sich nunmehr ein mittelfluriges Heck herauskristallisiert. Bei zweitürigen Bussen können damit beide Einstiege im Niederflurbereich angeordnet werden. Bei Gelenkbussen befindet sich der Motor im mittelflurigen Nachläufer. Die Türen des Vorderwagens sind niederflurig. Neue Wege werden mit Radnabenmotoren verfolgt, durch welche sich der gesamte Wagenboden tieferlegen lässt.

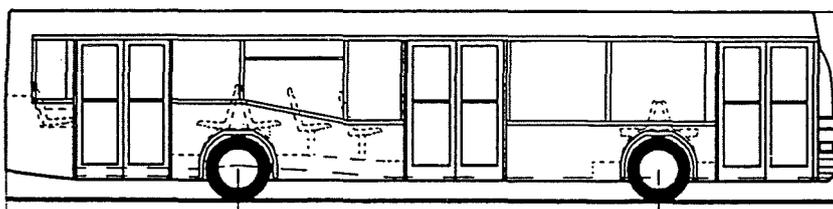


Abb. 32

Niederflur-Standardbus dreitürig (Abbildung: NEOPLAN).

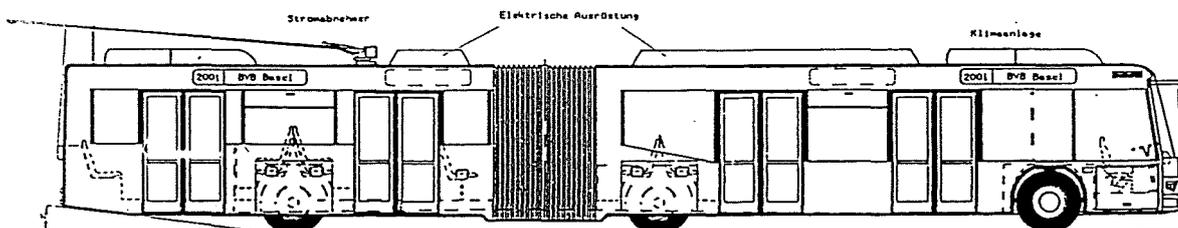


Abb. 33

Niederflurgelenktrolleybus Neoplan, BVB Basel (Abbildung: NEOPLAN).

1.3 1.31

Stand der Erkenntnisse und eigene Untersuchungen Überblick über die bisherigen Untersuchungen

Der Empirie hinkte die wissenschaftliche Erforschung des Fahrgastwechsels hinterher. Sie erfolgte zudem nicht systematisch, sondern wurde von den jeweils drängenden Problemen geprägt. Frühe Überlegungen zur Beförderungszeit stellte 1917 Arthur Müller mit seiner Arbeit über die Optimierung der Haltestellenabstände bei Strassen-

bahnen an. Anlass gaben die Sparmassnahmen des Ersten Weltkrieges, als Haltestellen aufgehoben wurden, um die Beförderungszeit zu verkürzen und den Energieverbrauch zu senken. Untersuchungen zum Fahrgastfluss in Abhängigkeit vom Abfertigungsverfahren wurden etwa gleichzeitig von den stark gewinnorientierten Strassenbahnen in den USA durchgeführt.

Erste genauere konzeptionelle Vorstellungen zur Berechnung der Fahrgastwechselzeit hat Reimer 1947 bis 1953 entwickelt, die leider nicht weiterverfolgt wurden. Verstärkt bearbeitet wurde die Frage in den Sechziger- und frühen Siebzigerjahren mit der vermehrten Anwendung verkehrsingenieurmässiger Denkweisen bei der Betriebsplanung. Nach 1975 finden sich nur noch spärliche Veröffentlichungen. Insgesamt lassen sich die folgenden drei Forschungsrichtungen unterscheiden:

1. Grösse der Fahrgastwechselzeit und Verteilung: Die Fahrgastwechselzeit wird als Zufallsgrösse betrachtet. Weder wird sie mit den Einflussfaktoren in Verbindung gebracht, noch wird der Ablauf analysiert. Diese Untersuchungen dienten der Berechnung von Verkehrsregelungsanlagen. Einen Schwerpunkt dieser Schule bildete in den Siebzigerjahren die DDR.
2. Abhängigkeit der Einsteigezeit von der Art der Abfertigung: Wird der Fahrausweis durch einen stationären Schaffner oder durch den Fahrer verkauft, so bestimmt dieser Vorgang meist die Haltezeit. Somit wurde vor allem eine rationelle und betrugssichere Fahrgastabfertigung angestrebt. Geprüft wurde weiter die betriebliche Zulässigkeit des Fahrausweisverkaufs durch den Fahrer. Besonders intensiv wurde dies in Grossbritannien, den USA und in der BRD während der Sechzigerjahre bearbeitet.
3. Abhängigkeit der Fahrgastwechselzeit von den Eigenschaften des Türsystems: Das Interesse für die Abhängigkeit zwischen der Fahrgastwechselzeit und dem Türsystem wuchs, als neue S- und U-Bahn-Systeme geplant wurden und als man Strassenbahn und Bus auf schaffnerlosen Betrieb umstellte. Zudem wurden ab den Siebzigerjahren rechnergesteuerte Betriebsleitsysteme installiert und damit die Kenntnisse über den Linienbetrieb vertieft. Wichtige Beiträge wurden in der BRD während der Sechzigerjahre sowie in der Schweiz während der Siebziger- und Achzigerjahre geleistet.

Im vorliegenden Zusammenhang ist nur die dritte Forschungsrichtung wesentlich. Die zweite Forschungsrichtung bleibt unberücksichtigt, weil der Fahrausweisverkauf bei hochbelasteten Systemen künftig mit Sicherheit entweder ortsfest oder im Fahrzeug-Innen erfolgen wird. Die erste Forschungsrichtung schliesslich orientiert sich an den Bedürfnissen der Individualverkehrsplanung und liefert keine nutzbaren Erkenntnisse zum Linienbetrieb.

Die 250 vorliegenden Untersuchungen gestatten es nicht, die Fahrgastwechselzeit sowie deren Streuung zu bestimmen. Zum Fahrgastwechsel an einer Türe existieren viele uneinheitliche Einzelangaben. Praktisch unerforscht geblieben ist der Einfluss der Eigenschaften der Fahrgäste und der äusseren Umstände. Der Einfluss des Besetzungsgrades ist noch nicht geschlossen dargestellt worden. Gewisse Aussagen finden sich zur Bewegungsrichtung und zur gegenseitigen Behinderung. Häufigen Gegenstand von Untersuchungen haben die Breite der Türen und die Einstiegshöhe gebildet. Die Angaben zur Streuung der Fahrgastwechselzeiten sind wenig konsistent. Zur Berechnung der Fahrgastwechselzeit eines Kurses werden behelfsmässige Verfahren vorgeschlagen, welche aber auf zu weitgehenden Vereinfachungen beruhen. Schliesslich fehlen Angaben zur Vorausberechnung der Fahrgastwechselzeit einer Fahrt.

1.32

Anlass und Ziele der eigenen Untersuchungen

Bei den Arbeiten der Herren Dr. Walter Berg zu den Gesetzmässigkeiten des Linienbetriebes und dipl. Ing. Helmut Iffländer zu den optimalen Handlungsstrategien im Störfall, ausgeführt am IVT der ETH Zürich, erwiesen sich die mangelhaften Erkenntnisse zum Fahrgastwechsel als besonders hinderlich. Deshalb wurde dem Fahrgastwechsel die hier zusammengefasste Dissertation mit folgenden Zielen gewidmet:

- Betriebsplanung: Ist ein Fahrplan aufgrund der zu erwartenden Ein- und Aussteiger sowie für gegebene Fahrzeuge und Anlagen zu konzipieren, so haben mathematische Beziehungen den Zeitbedarf für den Fahrgastwechsel zu liefern. Der Einfluss unterschiedlicher Fahrzeugtypen auf die Beförderungszeit soll sich quantifizieren lassen.
- Betriebsführung und Betriebsleittechnik: Im Projektstadium sei die Störungsempfindlichkeit unterschiedlicher Fahrzeuge abzuschätzen. Im täglichen Betrieb soll sich die Fahrgastwechselzeit in on-line-Prognoserechnungen aufgrund des aktuellen Besetzungsgrades und der Erfahrungen über den Fahrgastwechsel vorherbestimmen lassen.
- Fahrzeuggestaltung und Haltestelleninfrastruktur: Aus den Abhängigkeiten der Fahrgastwechselzeit sollen sich Anforderungen an die Fahrzeug- und Anlagenkonzeption formulieren und gegen andere Anforderungen abwägen lassen. Die Grundlagen für eine systematische Evaluation sollen erweitert werden.

1.33

Methodik der eigenen Untersuchungen

Ein FahrzeugEinstieg entspricht funktional einem Engpass bei einer Fussgängeranlage. Das Einstiegssystem eines Fahrzeuges stellt eine Parallelschaltung mehrerer Engpässe dar. Ausgangspunkt aller Überlegungen bildeten daher die Fussgänger:

- Eigenschaften der Fussgänger bezüglich Geschlecht, Alter und Grösse
- Bewegungsablauf und Leistungsfähigkeit
- Geschwindigkeitsverhalten
- Leistungsfähigkeit der Fussgängeranlagen

Dies wurde auf den Fahrgastwechsel übertragen und mit den Literaturangaben verglichen. Zur Schliessung der verbleibenden Wissenslücken wurden folgende Methoden eingesetzt:

1. Messungen im Betrieb: Die Messung der Fahrgastwechselzeit wurde manuell durchgeführt. Maximal konnte eine Messperson die Zahl der ein- und aussteigenden Fahrgäste sowie deren Zeitbedarf an einer Türe, die totale Haltezeit und die Zahl der Fahrgäste in bestimmten Fahrzeugsektoren festhalten. Die zur Verfügung stehenden Mittel erlaubten nur die vollständige Beobachtung von Kursen mit bis zu vier Türen (Genf, Grenoble, Basel). Das Messpersonal befand sich mit Ausnahme der Messungen an Intercity-Zügen auf dem Fahrzeug. Insgesamt liessen sich 4789 Fahrgastwechsel mit 45'713 beteiligten Fahrgästen auswerten:

Tab. 2

Überblick über die Messungen im laufenden Betrieb.

Betrieb	Fahrzeugtyp	Datum	Messwerte	Fahrgäste
TPG Genf	Niederflurtram Be 4/6	26./27.10.1988	421	1'934
SEMITAG Grenoble	Niederflurtram Typ 1989	27./28.10.1988	761	4'487
S-Bahn München	Doppelstockwagen NS	12.-14.6.1989	1'307	18'884
S-Bahn München	BR 420 der DB	12.-14.6.1989	548	3'064
BVB Basel	Trolleybus Serie 921 - 922	23.4.1990	226	954
BVB Basel	Gelenkbus MAN-NG 272	23./24.4.1990	505	2'477
BVB Basel	Trolleybus Serie 911 - 920	24.4.1990	294	1'245
S-Bahn Zürich	Doppelstockwagen SBB	16.1.1993	517	6'278
SBB	Einheitswagen IV, IC-Züge	3.-14.6.1993	210	6'390

2. Messungen unter Laborbedingungen: Für Tests der Fahrgastwechseleigenschaften künftiger SBB-Intercity-Doppelstockwagen hat Schindler Waggon eine Fahrzeugmaquette in natürlicher Grösse mit zwei unterschiedlichen Einstiegen erstellt. Daran und an einem Einheitswagen IV der SBB wurden am 24. Juni 1993 Fahrgastwechselbeobachtungen unter Laborbedingungen vorgenommen. Am EW IV und an jedem der beiden Einstiege des Modells wurden je sechs Ein- und sechs Aussteigerversuche mit 35 Personen durchgeführt.

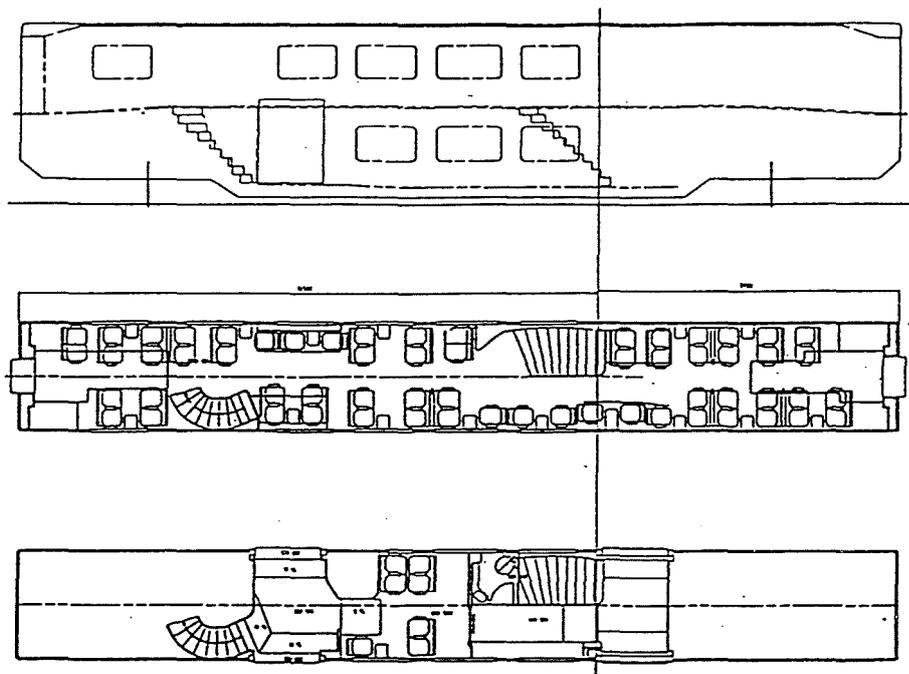


Abb. 34: Maquette in Originalgrösse von SWP für der geplanten Doppelstockwagen der SBB, Einstiegeversuche vom 24. Juni 1993 (Abbildung: Schindler Waggon Pratteln).

3. Berechnungen an einem Computermodell: Im Rahmen einer Semesterarbeit der Abteilung für Informatik der ETH Zürich wurden zwei Studenten mit der Erarbeitung des Computerprogrammes ACoST.NeXT (Advanced Calculation of Service Time auf NeXT.SteP) zur Bestimmung der Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses auf der Basis wahrscheinlichkeitstheoretischer Modelle beauftragt. Dieses musste es erlauben, die Fahrgastwechselzeit einer beliebigen Fahrgastzahl für frei wählbare Fahrzeugtypen und Fahrgastverteilungen zu berechnen. Mit Hilfe von ACoST. NeXT wurde die Abhängigkeit der Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse von deren Parametern untersucht.

1.4
1.41

Definition der wichtigsten Begriffe Fahrzeugauslastung und Grösse des Fahrgastwechsels

- Die Fahrgastzahl ist die Summe der Fahrgäste, welche die Fahrt eines Liniens-kurses benützen und entspricht der Summe aller Einsteiger oder Aussteiger.

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

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 Besetzung eines Fahrzeuges und maximalem Fassungsvermögen.

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

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 Haltestelle oder Türe ein- und aussteigen:

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

wobei F Fahrgastwechselzahl an einer Haltestelle oder Türe [P]

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

$$(4) \quad F_{\text{tot}} = \Sigma F_i = 2 \cdot F_K$$

wobei F_{tot} Gesamtfahrgastwechselzahl [P]

1.42

Belastung des Türsystems

- Die Zahl der Personen, welche in einem Referenzzustand auf eine Türe entfallen, wird als Türbelastung bezeichnet.

$$(5) \quad Q_T = \frac{F_R}{n_{T,K}}$$

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

- Ein zweites Mass für die Beanspruchung des Türsystems stellt die spezifische Türbelastung als Zahl der Personen bezogen auf die zur Verfügung stehende Türbreite dar:

$$(6) \quad Q_{T,s} = \frac{F_R}{\sum l_{T,bi}}$$

wobei $Q_{T,s}$ Spezifische Türbelastung [P/m]
 $l_{T,bi}$ Lichte Breite der Türe l [m]

- Mit der Türbelastung und der Türeistungsfähigkeit kann die relative Türbelastung $Q_{T,rel}$ berechnet werden:

$$(7) \quad Q_{T,rel} = \frac{F_R}{L}$$

wobei $Q_{T,rel}$ Relative Türbelastung [s]
 L Leistungsfähigkeit der Türe oder des Türsystems [P/s]

1.43

Fahrgastwechselzeit und Türleistungsfähigkeit

- Die Fahrgastwechselzeit ist die Zeitdauer, während welcher sich Fahrgäste durch den Querschnitt einer Türe bewegen. Die mittlere Fahrgastwechselzeit als Quotient von Fahrgastwechselzeit und Fahrgastwechselzahl kann auf eine bestimmte Türe oder ein ganzes Fahrzeug bezogen werden:

$$(8) \quad t_{h, fm} = \frac{t_{h, f}}{F}$$

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

$t_{h, f}$ Fahrgastwechselzeit an einer Haltestelle oder Türe [s]

- Die Summe aller Fahrgastwechselzeiten einer Fahrt bildet 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 bestiegen oder verlassen oder eine Türe durchqueren können:

$$(9) \quad L = \frac{1}{t_{h, fm}} = \frac{F}{t_{h, f}}$$

- Bezieht man die Türleistungsfähigkeit auf den lichten Querschnitt der Türe, so erhält man die spezifische Türleistungsfähigkeit.

$$(10) \quad L_s = \frac{1}{t_{h, fs}} = \frac{F}{t_{h, f} \cdot \sum l_{T, bi}}$$

wobei L_s Spezifische Türleistungsfähigkeit [P/sm]

2

Eigenschaften und Verhalten der Fahrgäste

2.1
2.11Eigenschaften
Geschlecht und Alter

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 aber zugunsten der Frauen. In der Altersgruppe von 40 bis 44 Jahren wird der Gleichstand erreicht, in der Altersgruppe zwischen 85 und 89 kommen auf 100 Frauen nur noch 40 Männer.

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. Es ist daher mit einem höheren Anteil mobilitätsbehinderter Menschen im öffentlichen Verkehr bei starkem Wachstum der Altersgruppen zwischen 70 und 90 Jahren zu rechnen.

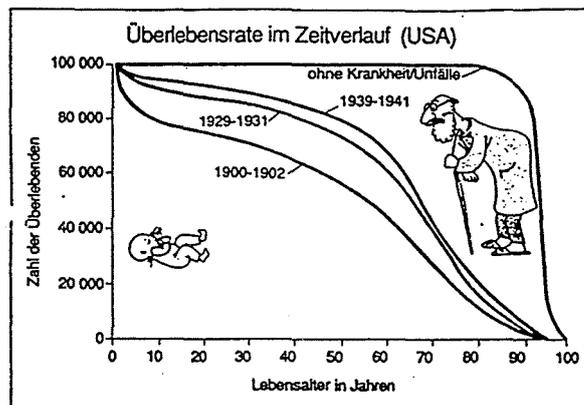


Abb. 35

Überlebensrate von jeweils 100'000 US-Amerikanern in aufeinanderfolgenden Zeiträumen. Die oberste Linie stellt die theoretische Überlebenskurve ohne Krankheiten oder Unfälle dar [67].

2.12

Grösse

Das Grössenwachstum 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 Männer 178,5 cm und Frauen 166,0 cm. Die Grösse ist innerhalb eines Geschlechts normalverteilt mit einer Standardabweichung von 3,3 % der mittleren Körpergrösse. In südlichen und asiatischen Ländern sind die Menschen kleiner als in Mitteleuropa, in Frankreich beispielsweise um 3 %, in Italien 4 %, in Japan 6 %, in Thailand 8 % und in Vietnam 9 %. Erwachsene Mitteleuropäer sind aber auch 1 bis 2 cm grösser als Einwohner von Grossbritannien.

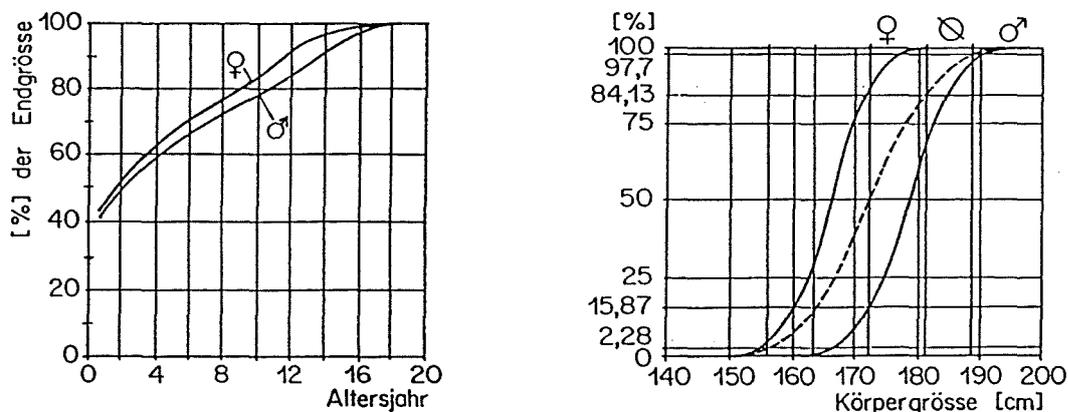


Abb. 36

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

2.13

Statischer Platzbedarf

Die maximale Körperbreite beträgt für mittlere Verhältnisse und ohne Berücksichtigung der Kleidung 0.46 m (27 % der Körpergrösse). Die Körpertiefe beläuft sich auf 0.23 m (13 % der Körpergrösse). Die 97.5 %-Werte liegen bei 0.50 m beziehungsweise 0.27 m. Der Platzbedarf als auf den Boden projizierte Grundfläche des Rumpfes errechnet sich näherungsweise als Ellipse mit der Körperbreite und der Körpertiefe als Hauptachsen. Demnach beträgt der Mindestplatzbedarf rund 0.085 m^2 , was einer Personendichte von 11.8 P/m^2 entspricht. In der Realität kommen die Standfläche der Füße, die Kleidung sowie die nicht ausgefüllten Zwischenräume hinzu. Mit hinreichender Genauigkeit kann davon ausgegangen werden, dass die Projektion des Körperumrisses unter Berücksichtigung der genannten Faktoren eine Fläche von etwa 0.15 m^2 aufweist, was eine Personendichte von 6.6 P/m^2 ergibt.

2.2

2.21

Bewegung und Leistungsfähigkeit**Ablauf und dynamischer Platzbedarf**

Das Bein lässt sich als Pendel idealisieren, mit dessen Eigenfrequenz die Gehgeschwindigkeit und der Energieverbrauch zusammenhängen. Die Durchschnittswerte liegen bei einer Frequenz von etwa 2.1 Hz, einer Schrittlänge von etwa 0.63 m und einer Geschwindigkeit von 1.34 m/s. 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.

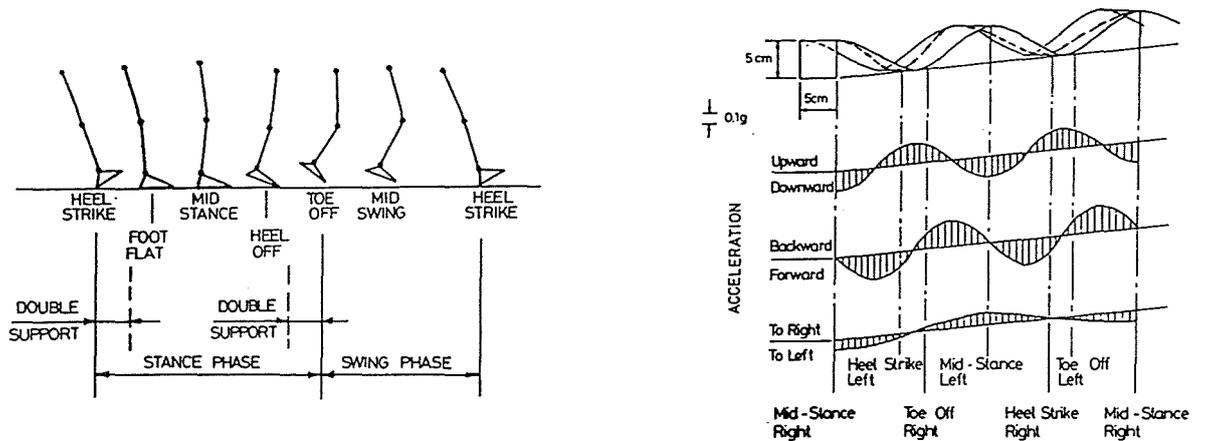


Abb. 37

Links: Phasenverlauf der Bewegung eines Beines. Rechts: Bewegung des Körperschwerpunktes und Verlauf der auf ihn einwirkenden Beschleunigungen und Verzögerungen [51].

Die Fortbewegungsgeschwindigkeit kann durch die Verlängerung der Schritte, die Vergrößerung der Frequenz oder eine Kombination von beidem erhöht werden. Im unteren Geschwindigkeitsbereich vergrößert sich sowohl die Frequenz wie die Schrittlänge, wobei letztere linear mit der Geschwindigkeit wächst. Bei einer Geschwindigkeit von 2.0 m/s ist die Grenze des natürlichen Gehens erreicht und über 2.5 m/s kann nur noch die Frequenz erhöht werden.

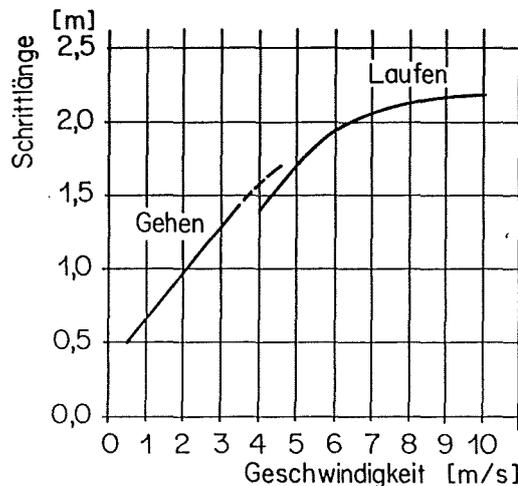


Abb. 38

Schrittlänge in Funktion der Geschwindigkeit beim Gehen und Laufen.

Der für die Fortbewegung benötigte dynamische Platzbedarf ist grösser als der statische:

- Der Körper schwankt in seitlicher Richtung. Für diesen Bewegungsraum, die Fussgängerspür, werden im Mittel 0.71 m genannt, während etwa 0.60 m für Treppen und Rampen angeführt werden. Bei stochastischen Betrachtungen erwies es sich, dass die Gesamtschwankung (inklusive Abweichung von der idealen Bahn) für 85 % der Fussgänger innerhalb von 28.2 cm liegt, es treten aber Werte bis über 60 cm auf. Für die Breite der Fussgänger spielen zusätzlich die Körperproportionen, die Mitnahme von Gepäck und die Begleitung durch Kinder und Hunde eine Rolle:

Tab. 3: 50 %- und 85 %-Fussgängerbreiten in Abhängigkeit von der Gepäckbeförderung sowie der Begleitung durch Kinder und Hunde [77].

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 anfangs genannte Spurbreite ist dagegen für praktische Verhältnisse ungenügend.

In Bewegungsrichtung muss der Fussgänger seine Beine auslenken und bei einem plötzlichen Stopp der vor ihm gehenden Person anhalten können. Mit wachsender Geschwindigkeit muss demnach ein grösserer Längsabstand gegeben sein. Meist werden ein Längsabstand von 1.0 m und eine Fussgängerdichte von rund 1.4 P/m² postuliert. Die wünschbare (und praktisch realisierte) Fussgängerdichte liegt aber darunter, wie noch gezeigt wird.

2.22

Energieverbrauch

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 nur einen beschränkten Einfluss auf den Energieaufwand pro Weglänge. Wesentlicher ist die Schrittfrequenz. Je weiter diese vom Eigenschwingungsbereich des Beines entfernt ist, desto grösser ist der Energieverbrauch. Fussgänger bewegen sich deshalb normalerweise intuitiv mit der Schrittfrequenz des Energieminimums.

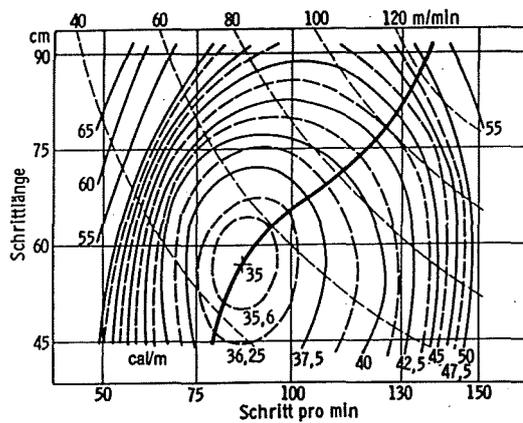


Abb. 39

Energieumsatz beim Gehen in der Ebene in Abhängigkeit von Schrittlänge und Schritt-
frequenz [73].

Der Gesamtenergieumsatz pro Weglänge zeigt je ein Energieminimum für das Gehen und das Laufen bei etwa 1.39 m/s und 3.89 m/s, deren Grösse mit 274 kJ/km beziehungsweise 250 kJ/km nahezu gleich ist. Der Energieverbrauch pro Zeit hängt ungefähr quadratisch mit der Gehgeschwindigkeit zusammen. Im Übergangsbereich vom Gehen zum Laufen bei 2.0 bis 2.5 m/s sind die beiden Fortbewegungsarten energetisch gleichwertig und der Fussgänger ist unschlüssig, welche er wählen soll.

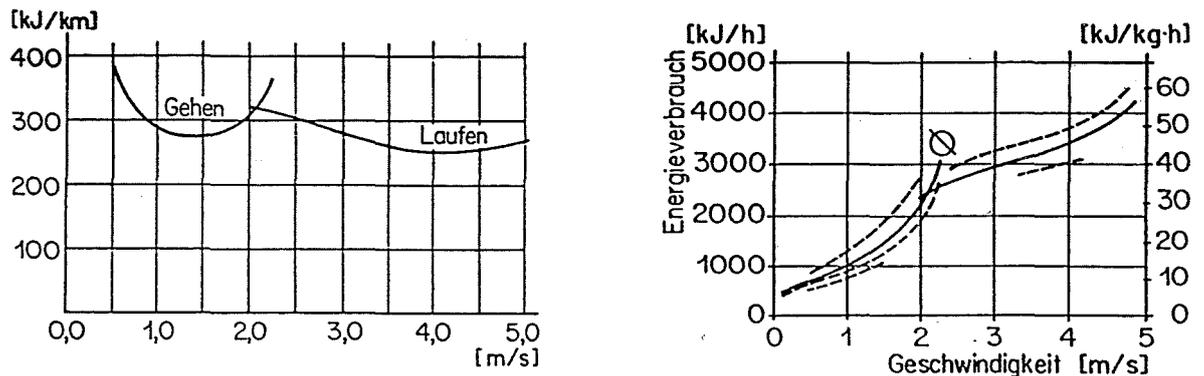


Abb. 40

Links: Energieverbrauch beim Gehen und Laufen. Rechts: Energieverbrauch für eine
Strecke von 1000 m Länge in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (verschiedene
Quellen und Mittelwert der Angaben).

Eine Steigung führt zur Erhöhung des Energiebedarfes, ein Gefälle zu dessen Senkung. Der Energieverbrauch reagiert dabei sehr empfindlich auf das Ausmass der Neigung.

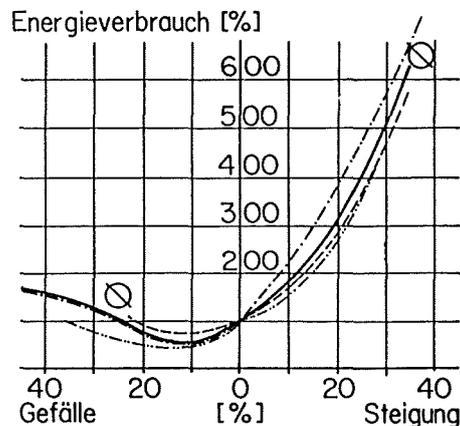


Abb. 41

Energieverbrauch beim Gehen auf Rampen, bezogen auf den Verbrauch in der Ebene
(abgeleitet aus [50] und [73]).

Der Energieverbrauch auf Treppen hängt von deren ergonomischer Gestaltung, namentlich dem Verhältnis zwischen Stufenhöhe und Stufentiefe, ab. Das Energieminimum liegt etwa bei einer Stufenhöhe von 16 cm und einer Stufentiefe von 31 cm.

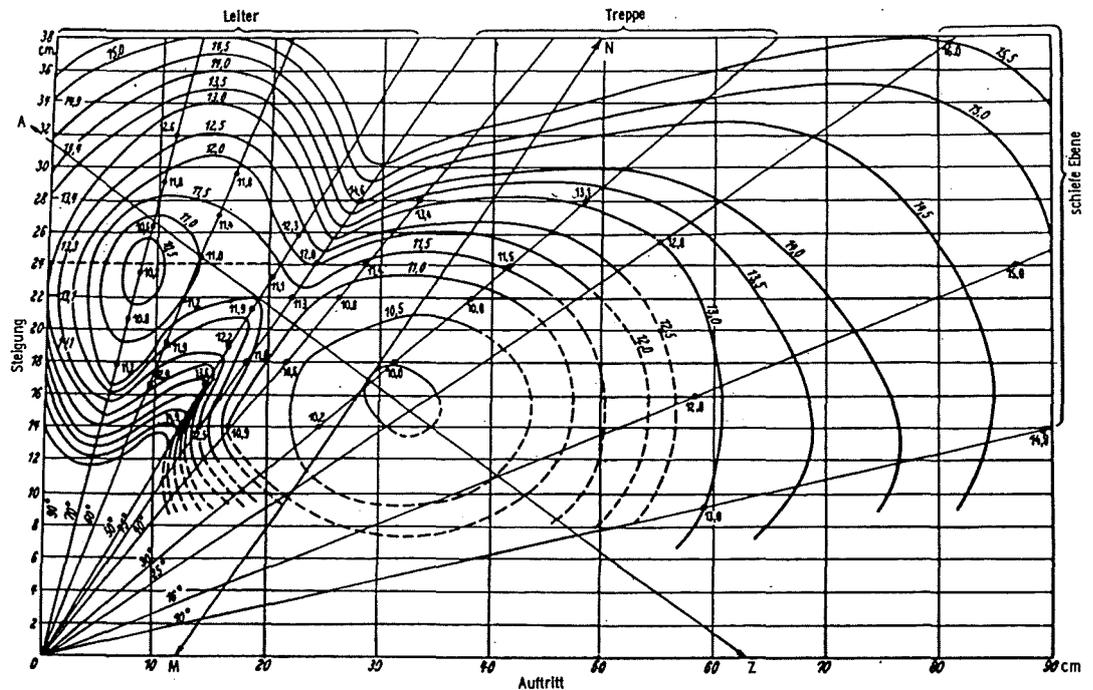


Abb. 42

Energieumsatz für eine Hubarbeit von 1 mkg für Rampe, Treppe und Leiter [cal/mkg]. Die Punkte gleichen Energieumsatzes sind mit einer Linie verbunden (Döll und Lehmann).

2.23

Leistungsfähigkeit

2.23.1

Abhängigkeit vom Geschlecht

Die körperliche Leistungsfähigkeit von Frauen ist deutlich kleiner als jene von Männern. Die Muskelkraft liegt bei etwa 67 %, die körperliche Leistungsfähigkeit [mkg/min] bei 58 % und die Geschwindigkeit in Schnellläufen bei 75 %. Im Spitzensport erzielen Frauen allerdings bis zu 90 % der Leistung von Männern.

2.23.2

Abhängigkeit vom Alter

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 und mit 80 Jahren wird der Stand des 10. Lebensjahres unterschritten. Besonders von dieser Rückentwicklung betroffen ist der Bewegungsapparat.

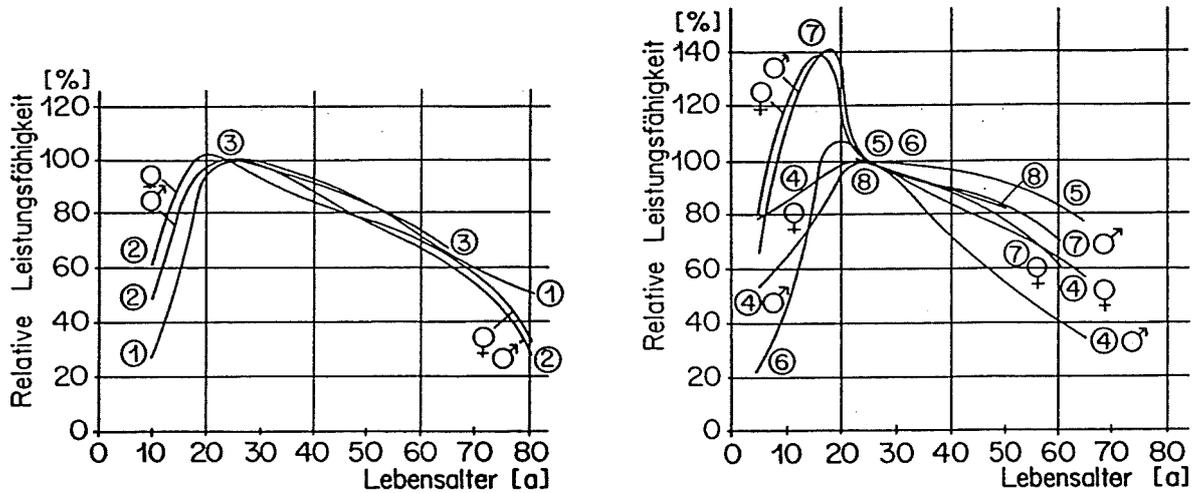


Abb. 43

Körperliche Leistungsfähigkeit in Funktion des Alters. Links: 1 = Vitalkapazität der Lunge [82], 2 = Sauerstoff-Aufnahmevermögen [82], 3 = Maximales Herzschlagvolumen [3]. Rechts: 4 = Trainierbarkeit [82], 5 = Muskelkraft [3], 6 = Körperliche Leistungsfähigkeit [73], 7 = Laufgeschwindigkeit [21], 8 = Montageleistung von Arbeitern [73].

2.23.3

Abhängigkeit von der Tageszeit

Die Leistungsbereitschaft unterliegt im Tagesverlauf einer Periodizität mit folgenden Bereichen:

- Die automatisierten Leistungen liegen bei 40 % der Gesamtleistungsfähigkeit und sind praktisch konstant. Sie können vom Menschen ohne Willensanstrengung erbracht werden.
- Die Nutzung der physiologischen Leistungsbereitschaft erfordert eine mäßige Willensanstrengung. Sie zeigt Maxima am frühen Vormittag und früheren Abend sowie Minima am Nachmittag und in der Nacht.
- Die Einsatzreserven sind im Tagesverlauf nahezu konstant mit einem Maximum am frühen Morgen. Sie umfassen etwa 20 bis 30 % der Leistungsfähigkeit und werden insbesondere im Sport genutzt. Sie können willkürlich freigesetzt werden, wobei die erforderliche Willenskraft mit wachsendem Nutzungsgrad ansteigt.
- Auf die autonom geschützten Reserven hat der Mensch keinen willentlichen Zugriff. Zu ihrer Nutzung ist eine Adrenalinausschüttung infolge von Emotionen und Affekten erforderlich. Der Einsatz von Dopingmitteln im Sport bezweckt diesen Zugriff über eine künstliche Adrenalinausschüttung.

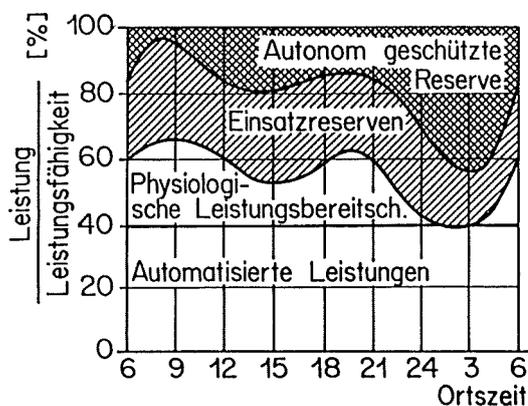


Abb. 44

Tagesperiodik der Leistungsbereitschaft (nach Graf, Handbuch der gesamten Arbeitsmedizin).

2.23.4

Abhängigkeit vom Klima

Der Organismus muss seine Körpertemperatur in einem engen Regelbereich halten. Das Klima beeinflusst das Gleichgewicht im Wärmehaushalt über folgende Größen:

- Umgebungstemperatur: Solange die Umgebungstemperatur unter jener des Körpers liegt, wird über die Konvektion Energie abgegeben, liegt sie darüber, so nimmt der Körper Energie auf. Die ausgetauschte Energiemenge ist proportional zur Temperaturdifferenz. Der Wind beeinflusst die Ausdehnung der ruhenden Grenzschicht über der Haut und damit das Wärmeübertragungsvermögen.

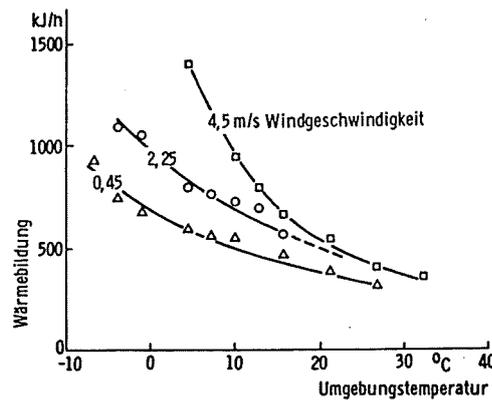


Abb. 45: Energieumsatz nach einstündigem Sitzen in unterschiedlicher Umgebungstemperatur ([73] nach Wenzel und Pieraski).

- Wärmestrahlung: Zwischen dem Menschen und festen Körpern erfolgt ein Energieausgleich über langwellige Strahlung. Der Wärmeübergang ist nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz proportional zur vierten Potenz der Oberflächentemperaturen.
- Luftfeuchtigkeit: Eine hohe Luftfeuchtigkeit behindert die Schweißverdunstung und verschlechtert damit den Wärmehaushalt. Entscheidend ist die Differenz zwischen den Wasserdampfdrücken von Haut und Luft.

Bei durchschnittlichen Verhältnissen (Umgebungstemperatur 20 bis 22°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.

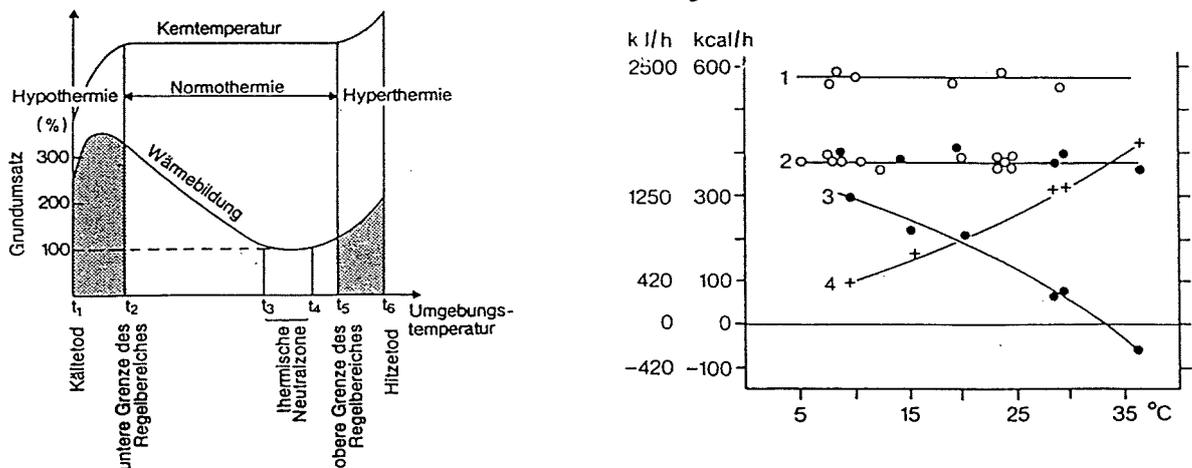


Abb. 46

Links: Körpertemperatur und Wärmebildung des Menschen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur; Windstille, 50 % Luftfeuchtigkeit; thermische Neutralzone für unbedeckte, ruhende Menschen: 28 - 31° C ([86] nach Hensel, Brück, Raths). Rechts: Wärmeaustausch einer nackten Versuchsperson während der Arbeit (Leistung 150 Watt). 1: Gesamter Energieumsatz. 2: Wärmeproduktion. 3: Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung. 4: Wärmeabgabe durch Verdunstung [3].

Die Wärmetauschköglichkeiten weisen spezifische Arbeitsbereiche auf, indem die Schweißbildung bei steigender Temperatur eine verkleinerte Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion kompensiert. Meist ist das Klima gegeben, sodass der Mensch die Temperatur durch die Bekleidung und durch die Anpassung seiner Leistung innerhalb des Regelbereiches halten muss. Mit zunehmender Aussentemperatur sinkt daher die Leistungsfähigkeit.

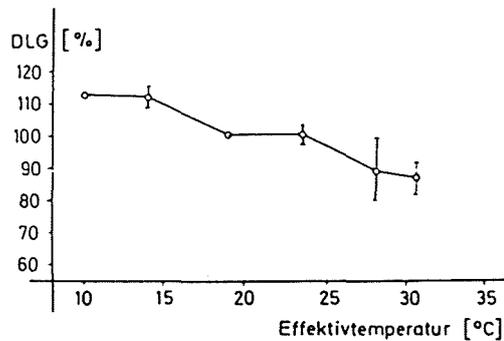


Abb. 47

Abnahme der Dauerleistungsgrenze mehrerer Versuchspersonen in Abhängigkeit von der Effektivtemperatur [82].

2.24

Mobilitätsbehinderungen

2.24.1

Überblick

Alle Fahrgäste, welche nicht über die Beweglichkeit und Leistungsfähigkeit einer gesunden, erwachsenen Person verfügen, werden als Mobilitätsbehinderte bezeichnet:

1. **Reisebehinderungen:** Eine Reisebehinderung entsteht zum Beispiel durch Gepäck, Fahrräder, Kinderwagen oder Hunde. Schwierigkeiten bei der Benutzung öffentlicher Verkehrsmittel haben ferner werdende Mütter sowie Orts-, Sprach- und Systemunkundige.
2. **Altersbehinderungen:** Altersbehinderungen sind die reduzierten körperlichen Fähigkeiten als Folge des Alters. Diese Behindertenkategorie umfasst sowohl die kleinen Kinder als auch die Betagten.
3. **Behinderungen im engeren Sinn:** Behinderte im engeren Sinn verfügen nicht über die aufgrund ihres Alters zu erwartenden körperlichen Fähigkeiten, indem wesentliche Funktionen seit Geburt, infolge Krankheit oder durch Unfall geschwächt sind.

Die Behinderten im engeren Sinn setzen sich aus den Körperbehinderten, den Sehbehinderten, den Hörbehinderten und den geistig Behinderten zusammen. Bezüglich des Fahrgastwechsels sind vorwiegend die Körperbehinderten von Belang.

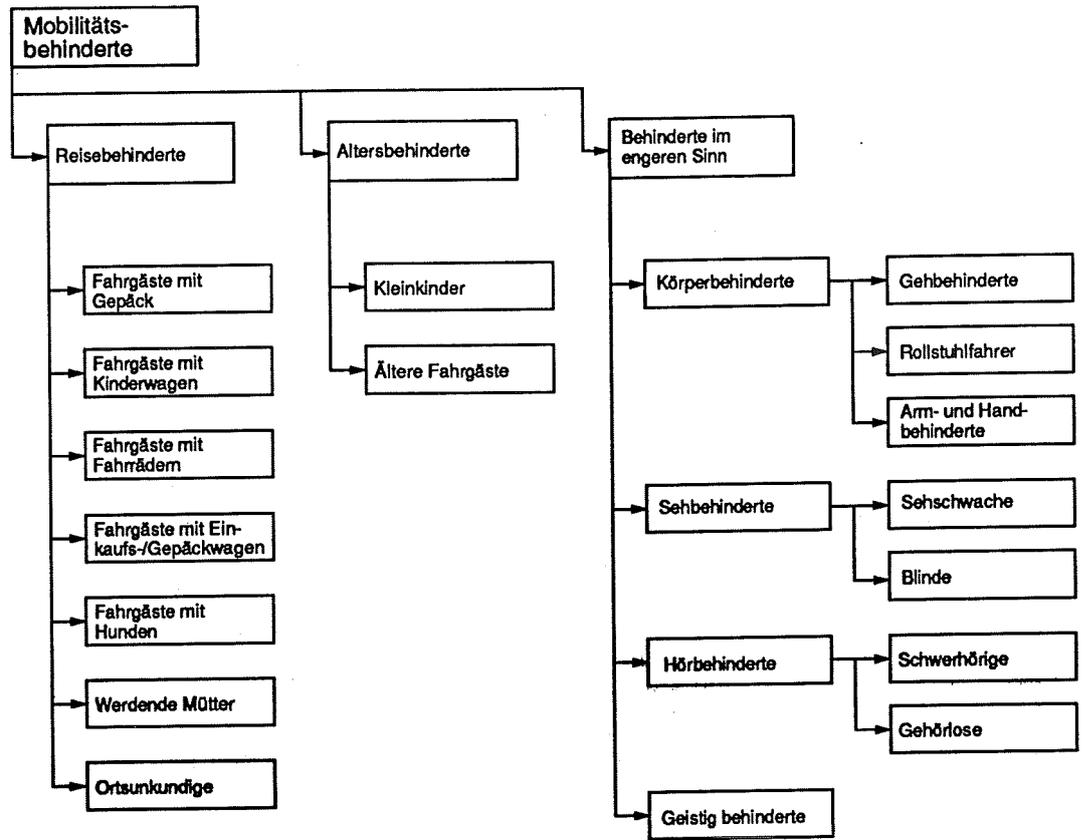


Abb. 48

Systematik der mobilitätsbehinderten Fahrgäste.

2.24.2

Bewegungseinschränkungen

Kindern wird die Benützung öffentlicher Verkehrsmittel dadurch erschwert, dass die Masse der Fahrzeugtreppen nicht auf sie abgestimmt sind. Setzt man die Behinderungsgrenze bei einer Körpergröße von 120 cm an, so sind Kinder unter etwa sieben Jahren als altersbehindert zu betrachten. Im höheren Lebensalter tritt eine zunehmende leistungs- und beweglichkeitsbedingte Behinderung auf und parallel dazu steigt der Anteil der altersbehinderten Personen exponentiell an. 30 % der älteren Fahrgäste sind bereits bei einer Höhendifferenz von 150 mm auf einen Handgriff angewiesen und sogar 70 % sind es bei 300 mm. 20 % sind unfähig, eine Stufe von 300 mm zu überwinden.

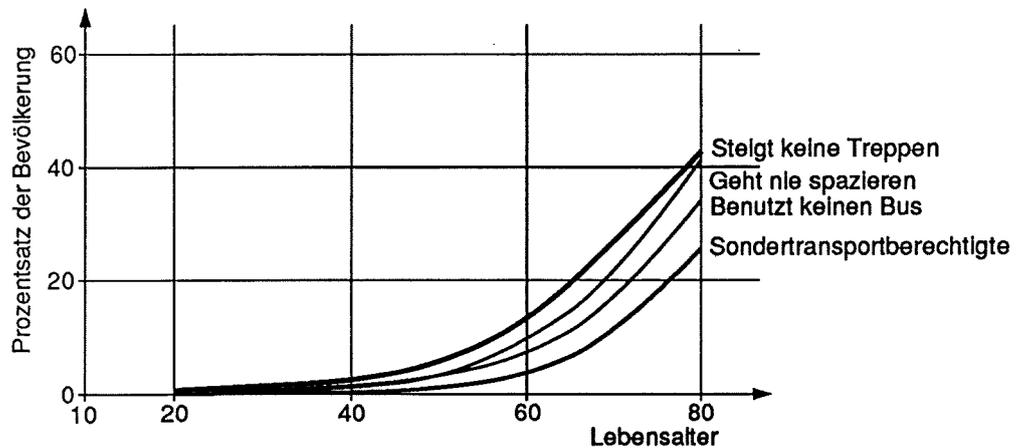


Abb. 49

Mobilitätsbehinderungen bei verschiedenen Alterskategorien (nach [31]).

Rollstuhlfahrer können Höhendifferenzen und Spaltbreiten von 30 mm ohne Hilfe bewältigen. Dies ist gleichzeitig das Minimum, welches Blinde als Absatz zu erkennen vermögen. Mit Unterstützung durch eine Drittperson können Hindernisse bis zu 120 mm ohne grössere Schwierigkeiten überwunden werden.

2.24.3

Anteil der Mobilitätsbehinderten

Zur Abschätzung des Anteils der Mobilitätsbehinderten im öffentlichen Verkehr können etwa folgende Anhaltspunkte dienen:

1. **Reisebehinderte:** An einem Werktag führen gegen drei Viertel der Fahrgäste im Nahverkehr ein oder zwei Gepäckstücke mit. Grösse und Art des Gepäcks wird vom Verkehrszweck bestimmt, wobei sperriges Gepäck überwiegend mit dem Privatauto oder mit dem Taxi befördert wird. An Einkaufstagen werden in Strassenbahnen 12 % der Fahrgäste mit grossen Gepäckstücken beobachtet, im Individualverkehr sind es aber 18 % und in Taxis 28 %. Der Kinderwagenanteil bewegt sich um 0.5 %.

Tab. 4

Gepäckbeförderung durch Fussgänger und Fahrgäste, Mitführen von Kinderwagen (kleines Gepäck: Handtasche; mittleres Gepäck: Einkaufstasche; grosses Gepäck: Reisekoffer; 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 %	[77]
Nahverkehr	99.5 - 99.8 %				0.2 - 0.5 %	[96], [97]
Nahverkehr	23.0 - 33.0 %	64.0 - 76.0 %		1.5 - 5.9 %	0.1 - 0.7 %	[63]
Bahnfernverkehr	69.0 %			31.0 %	0.0 %	[110]

2. **Altersbehinderte:** Die Häufigkeit der Alterskategorien unterscheidet sich je nach Einzugsgebiet eines Verkehrsbetriebes und wandelt sich zudem permanent. Im Nahverkehr wurden die folgenden Anteile beobachtet:

- < 30 Jahre 43.2 %
- 30 bis 50 Jahre 36.5 %
- > 50 Jahre 20.3 %

Die Angaben sind leider bereits rund zwanzig Jahre alt. Selther dürfte der Prozentsatz älterer Menschen infolge ihres zunehmenden Anteils an der Bevölkerung, ihrer steigenden Mobilität und der Motorisierung der jüngeren Bevölkerungsteile angewachsen sein.

3. **Behinderte im engeren Sinn:** Rund 3 % der bundesdeutschen Bevölkerung gehören zu den Gehbehinderten. Schwer Gehbehinderte, welche einen Sondertransportdienst erfordern, machen 2 % aus. Etwa 0.8 % sind gänzlich von der Verkehrsteilnahme ausgeschlossen. Der Anteil der Rollstuhlfahrer wird auf 0.3 bis 0.5 % geschätzt.

Insgesamt und unter Berücksichtigung kombinierter Behinderungen ist die Beweglichkeit von 45.2 % der Fahrgäste zumindest leicht eingeschränkt. Als mobilitätsbe-

hindert sind Personen mit grossem Gepäck, Menschen unter 7 und über 80 Jahren sowie Gehbehinderte und Rollstuhlfahrer zu betrachten, was einen Mobilitätsbehindertenanteil von 16.9 % ergibt.

Tab. 5

Schätzung der Antelle der Fahrgäste mit eingeschränkter Beweglichkeit, 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 %		

Alle Fahrgäste = 100.0 %

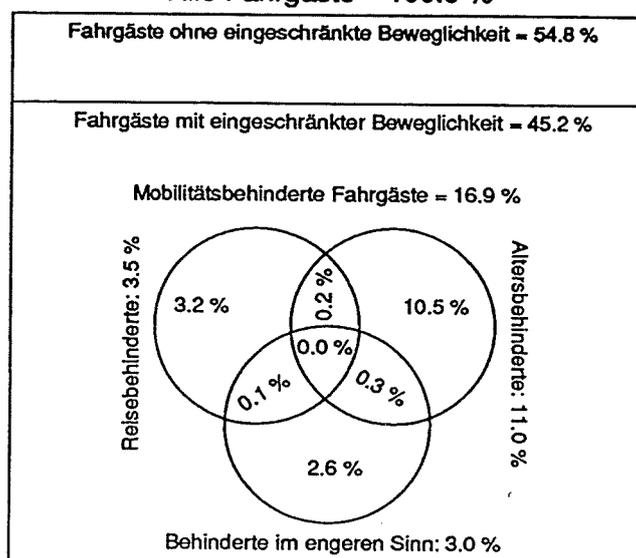


Abb. 50

Anteil der mobilitätsbehinderten Fahrgäste nach Hauptkategorien und Kombinationen [104].

2.3

2.31

Gehgeschwindigkeit

Abhängigkeit von den Fussgängereigenschaften

Die Gehgeschwindigkeit von Männern ist im Mittel um 11 % höher als jene von Frauen, was gut mit den Differenzen in der Körpergrösse und der körperlichen Leistungsfähigkeit übereinstimmt. Dies ergibt für Männer 1.41 m/s und für Frauen 1.27 m/s. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit vom Alter entspricht weitgehend jener der körperlichen Leistungsfähigkeit:

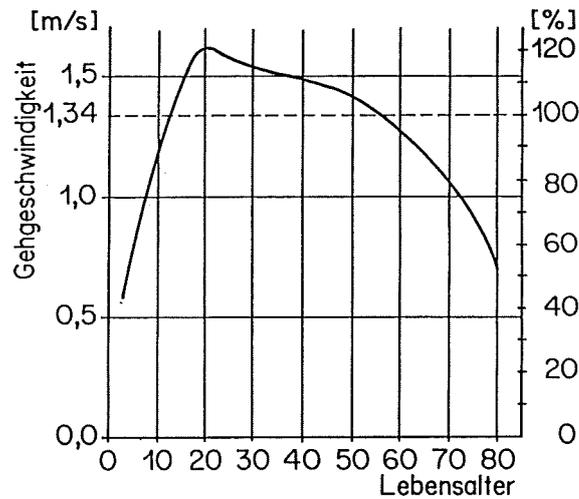


Abb. 51

Fussgängergeschwindigkeit in Funktion des Lebensalters.

2.32

Abhängigkeit von den Begleitumständen

Die Fussgängergeschwindigkeit unterscheidet sich je nach den vier Verkehrszwecken Pendlerverkehr, Einkaufsverkehr, Nutzverkehr und Freizeitverkehr zum ersten aufgrund typischer Verhaltensweisen (Eile/Musse) und zum zweiten aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung der Fussgängerkollektive (alt/jung, Männer/Frauen):

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

Eine Tageszeitabhängigkeit der Geschwindigkeit entsteht aus der schwankenden physischen Leistungsfähigkeit und der variierenden Zusammensetzung der Fussgängergruppen:

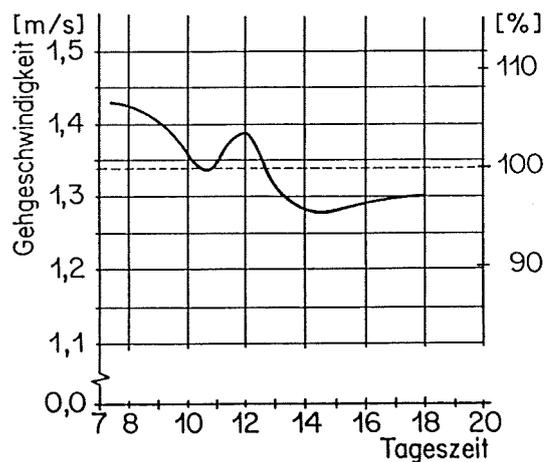


Abb. 52

Geschwindigkeitsverlauf der Fussgänger im Tagesgang.

Die Beobachtungen zur Fussgängergeschwindigkeit in Funktion des Klimas bestätigen die postulierte Leistungsabnahme mit steigender Temperatur, indem sie einen Geschwindigkeitsabfall aufzeigen:

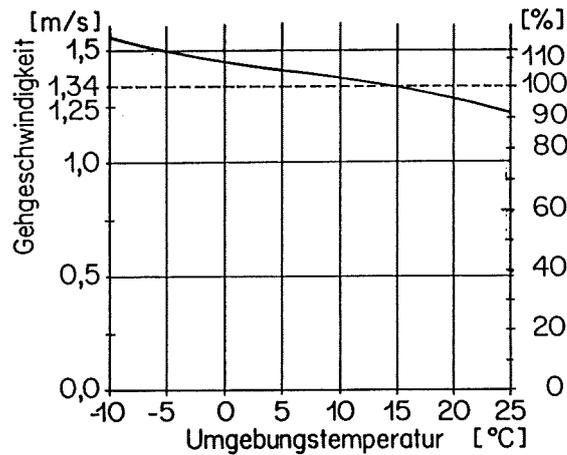


Abb. 53

Fussgängergeschwindigkeit in Funktion der Umgebungstemperatur zwischen -10 und $+25^\circ\text{C}$.

2.33

Abhängigkeit von den Eigenschaften der Anlagen

Infolge der Zunahme des Energieverbrauches sinkt die Geschwindigkeit auf Rampen mit wachsender Steigung ab:

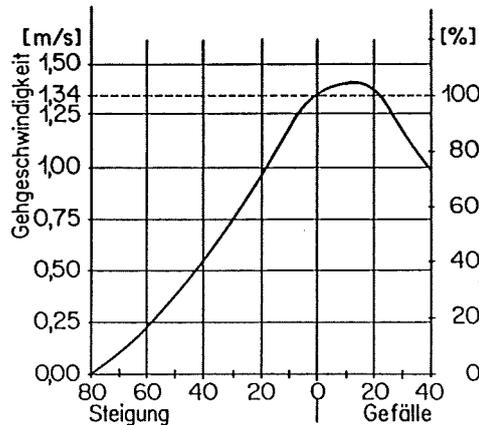


Abb. 54

Geschwindigkeit der Fussgänger in Funktion der Rampenneigung. Die Neigungsbereiche über $\pm 20\%$ haben keine praktische Bedeutung.

Auf üblichen Treppen beträgt die mittlere Horizontalgeschwindigkeit $v_{F,h} = 0.65\text{ m/s}$, die mittlere Vertikalgeschwindigkeit $v_{F,v} = 0.33\text{ m/s}$ und die Schrittzahl 2.10 Schritte/s . Die Geschwindigkeit ist beim Aufwärtsgen um 6.5% tiefer, beim Abwärtsgen um 6.5% höher als im Durchschnitt:

• Aufwärtsgen	$v_{F,h} = 0.61\text{ m/s}$	$v_{F,v} = 0.31\text{ m/s}$	1.97 Schritte/s
• Abwärtsgen	$v_{F,h} = 0.69\text{ m/s}$	$v_{F,v} = 0.35\text{ m/s}$	2.24 Schritte/s

2.34

Einfluss der Fussgängerdichte

Die zunehmende Fussgängerdichte reduziert sich die Fussgängergeschwindigkeit zwischen 0.5 und 2.0 P/m^2 entscheidend, während die Geschwindigkeitsabnahmen bis 0.5 P/m^2 und über 2.0 P/m^2 schwächer bleiben. Über 5.4 P/m^2 brechen alle Fussgängerbewegungen ab.

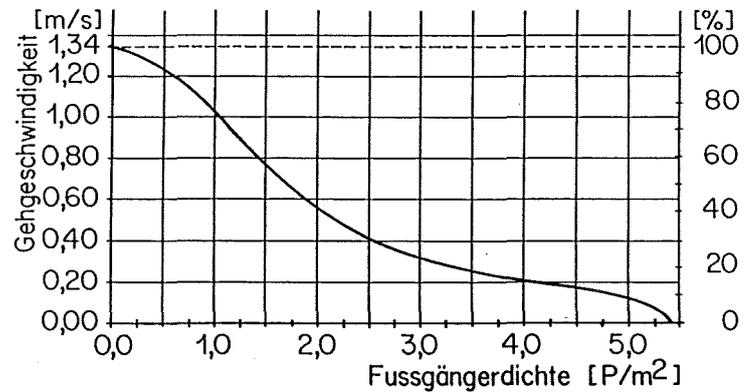


Abb. 55

Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit von der Fussgängerdichte in der Ebene.

Auf Treppen geht die Geschwindigkeit bei kleiner Fussgängerdichte (bis etwa $1.0 P/m^2$) weniger stark zurück als in der Ebene, da die Fussgänger kleinere dynamische Zusatzräume verlangen. Die obere Grenze der Fussgängerbewegung liegt hingegen ebenfalls bei etwa $5.4 P/m^2$.

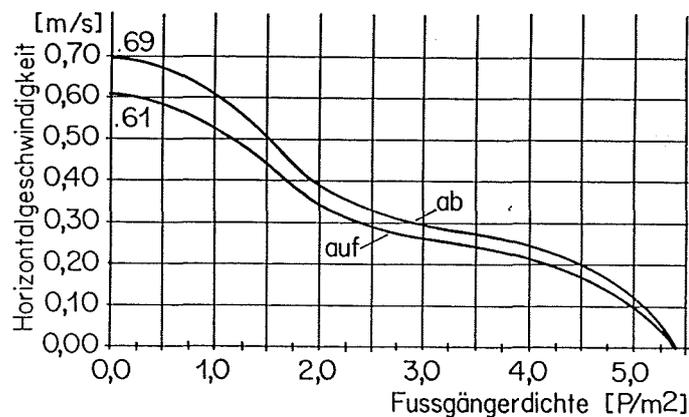


Abb. 56

Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit von der Fussgängerdichte auf Treppen.

2.35

Streuung der Geschwindigkeit

Die Fussgängergeschwindigkeiten zeigen eine Normalverteilung mit einer Standardabweichung σ von 0.26 m/s oder 19.3% des Mittelwertes.

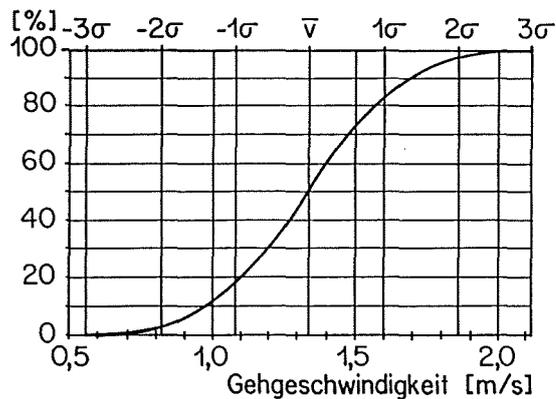


Abb. 57

Summenkurve der Fussgängergeschwindigkeiten.

2.4 2.41

Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen Grundlagen

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

$$(11) \quad F = D \cdot v_F(D) \cdot B_N \cdot t$$

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], ergibt sich aus der Bruttobreite B _g abzüglich eines Verlustes B _H infolge von Hindernissen oder Wand-einflüssen
	t	Beobachtungszeit [s]

Das Produkt aus Fussgängerdichte und -geschwindigkeit ist die spezifische Leistungsfähigkeit und nennt die Anzahl der Fussgänger, welche pro Zeiteinheit einen Querschnitt von 1 m Breite passieren können:

$$(12) \quad L_S = D \cdot v_F(D)$$

2.42

Leistungsfähigkeit in der Ebene

Die aus dem Individualverkehr stammende Funktion von Kladek beschreibt den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Dichte von Fussgängerbewegungen treffend:

$$(13) \quad v_i = v_{F,f} \cdot \left(1 - e^{(-\gamma \cdot \left[\frac{1}{D} - \frac{1}{D_{\max}} \right])} \right)$$

wobei	v _{F,i}	Geschwindigkeit bei einer bestimmten Dichte [m/s]
	v _{F,f}	Geschwindigkeit bei voller Freizügigkeit [m/s]
	γ	Elchkonstante [P/m ²]
	D	Fussgängerdichte [P/m ²]
	D _{max}	Fussgängerdichte, bei welcher eine Bewegung unmöglich wird [P/m ²]

Mit $v_{F,f} = 1.34 \text{ m/s}$, $D_{\max} = 5.4 \text{ P/m}^2$ sowie dem Kurvenverlauf von $v_{F,i}$ gemäss 2.34 ergibt sich γ zu 1.913 P/m^2 und (13) zu:

$$(14) \quad v_i = 1.34 \cdot \left(1 - e^{(-1.913 \cdot \left[\frac{1}{D} - \frac{1}{5.4} \right])} \right)$$

Durch Umformung wird daraus der Ausdruck für die spezifische Leistungsfähigkeit in Funktion der Geschwindigkeit:

$$(15) \quad L_s = \frac{v_i}{\frac{1}{5.4} - \frac{\ln\left(1 - \frac{v_i}{1.34}\right)}{1.913}}$$

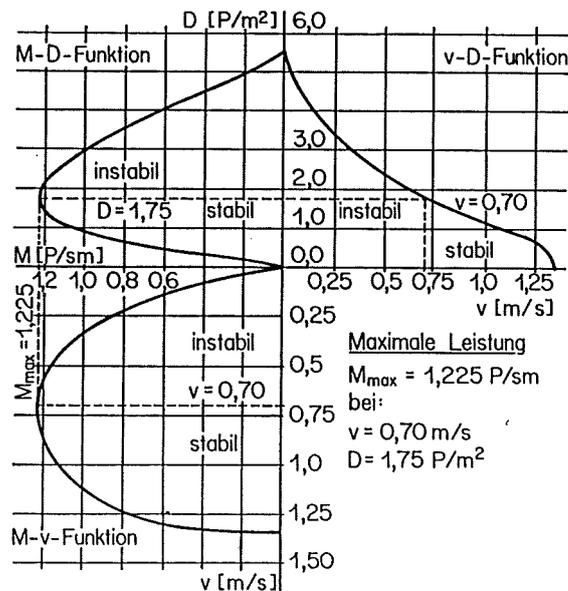


Abb. 58

Fundamentaldiagramm für Fussgängerverkehrsanlagen, Richtungsverkehr; M entspricht der spezifischen Leistungsfähigkeit L_s .

Die maximale Leistungsfähigkeit liegt bei etwa 1.23 P/sm und wird bei einer Dichte von 1.75 P/m^2 sowie bei einer Geschwindigkeit von 0.70 m/s erreicht. Bei entgegengesetzten Fussgängerströmen verursacht die Behinderung der Fussgänger einen Leistungsabfall:

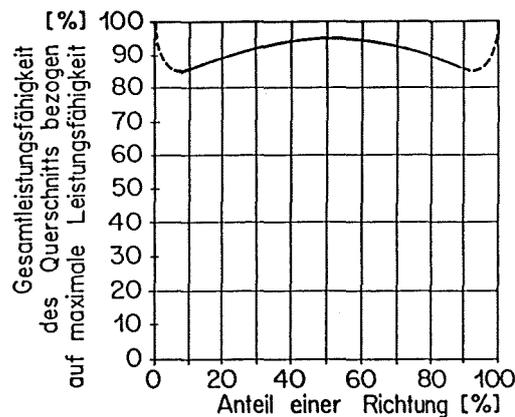


Abb. 59

Prozentuale Leistungsfähigkeit eines Querschnitts bei Gegenverkehr, bezogen auf die Leistungsfähigkeit bei einseitig gerichtetem Fußgängerstrom (nach [58]).

2.43

Leistungsfähigkeit auf Treppen

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

$$(16) \quad v_{F,hauf} = 0.610 \cdot \left(1 - e^{(-3.722 \cdot \left[\frac{1}{D} - \frac{1}{5.4} \right])} \right)$$

$$(17) \quad v_{F,hab} = 0.694 \cdot \left(1 - e^{(-3.802 \cdot \left[\frac{1}{D} - \frac{1}{5.4} \right])} \right)$$

wobei $v_{F,hauf}$ Horizontalkomponente der Fußgängergeschwindigkeit beim Aufwärtsgen in Abhängigkeit von der Fußgängerdichte [m/s]
 $v_{F,hab}$ Horizontalkomponente der Fußgängergeschwindigkeit beim Abwärtsgen in Abhängigkeit von der Fußgängerdichte [m/s]

Analog zur Bewegung in der Ebene wird der Zusammenhang zwischen spezifischer Leistungsfähigkeit und Geschwindigkeit zu:

$$(18) \quad L_{s,auf} = \frac{v_i}{\frac{1}{5.4} - \frac{\ln\left(1 - \frac{v_i}{0.610}\right)}{3.722}}$$

$$(19) \quad L_{s,ab} = \frac{v_i}{\frac{1}{5.4} - \frac{\ln\left(1 - \frac{v_i}{0.694}\right)}{3.802}}$$

wobei $L_{s,auf}$ Spezifische Leistungsfähigkeit beim Aufwärtsgen [P/sm]
 $L_{s,ab}$ Spezifische Leistungsfähigkeit beim Abwärtsgen [P/sm]

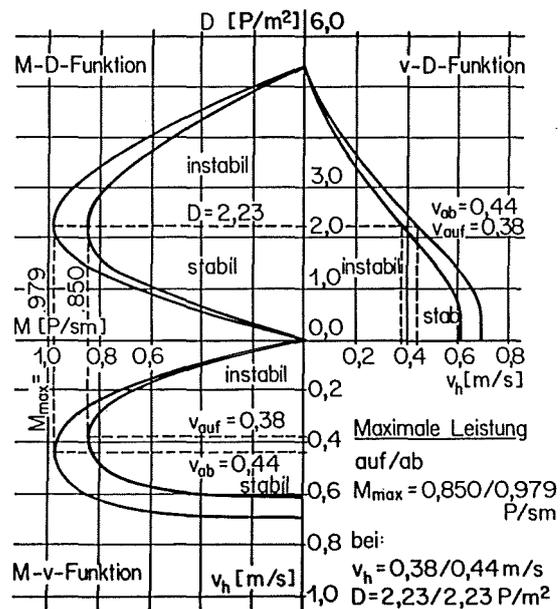


Abb. 60

Fundamentaldiagramm für Treppen, Richtungsverkehr; M entspricht der spezifischen Leistungsfähigkeit L_s .

Die Fußgängerdichte bei maximaler Leistungsfähigkeit liegt für das Auf- wie für das Abwärtsgehen bei 2,23 P/m². Die maximale spezifische Leistungsfähigkeit beträgt aufwärts 0,850 P/sm und abwärts 0,979 P/sm bei Geschwindigkeiten von 0,38 m/s beziehungsweise 0,44 m/s. Treppen sind somit um 25 % weniger leistungsfähig als ebene Fusswege.

2.44

Zulässige Belastungen von Fussgängeranlagen

Die Bemessung von Fussgängeranlagen darf nicht auf der maximalen Leistungsfähigkeit basieren, da diese erst bei unangenehm hohen Fußgängerdichten erreicht wird. Vielmehr sind Komfortbetrachtungen mittels folgender Kriterien nötig:

- | | |
|----|---|
| 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 |

In der folgenden Zusammenstellung werden mit Hilfe der Kriterien neun charakteristische Qualitätsstufen, die Levels-of-Service (LOS) A bis I, unterschieden, welche eine bestimmte Benützungsgüte der Fussgängeranlage definieren. Es zeigt sich, dass Benützungsgüte und Geschwindigkeit im tiefen Dichtebereich besonders empfindlich auf kleine Dichteänderungen reagieren.

- Einstieg ohne Kapazitätsrestriktionen im Zu- oder Nachlauf
- Einstieg mit Kapazitätsrestriktion im Zulauf
- Einstieg mit Kapazitätsrestriktion im Nachlauf
- Einstieg mit Kapazitätsrestriktionen im Zu- und Nachlauf

Kapazitätsrestriktionen sind sämtliche Einflüsse, welche die Leistungsfähigkeit des Einstiegssystems limitieren. Die Kapazitätsrestriktion im Zulauf besteht darin, dass sich die Fahrgäste zuerst zur Türe bewegen müssen, sodass unmittelbar nach dem Öffnen der Türe noch nicht die volle Leistungsfähigkeit ausgeschöpft werden kann. Die Behinderung des Nachlaufes ist abhängig von der Fahrgastdichte im Fahrzeug oder auf dem Perron.

3.11.3

Die Fahrgastwechselzeit als stochastische Grösse

Das stochastische Einstiegsmodell ohne äussere Kapazitätsrestriktion unterscheidet sich vom deterministischen Modell zunächst nur dadurch, dass die Breite des Durchganges nicht einem ganzzahligen Vielfachen der Fahrgastbreite entspricht.

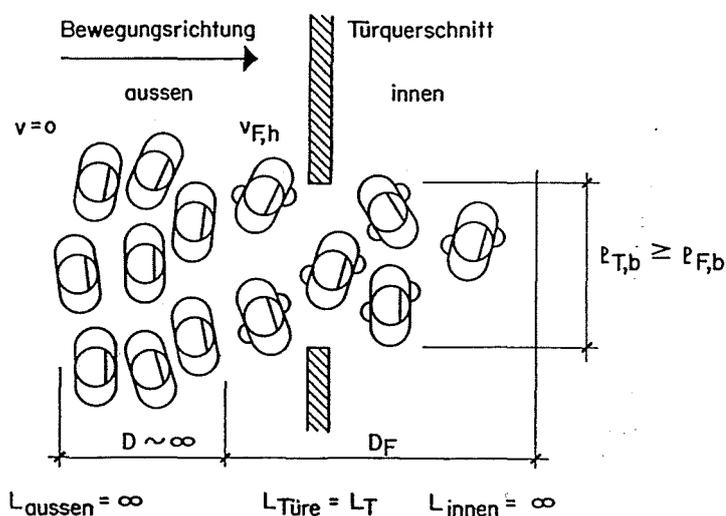


Abb. 62

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

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

$$(21) \quad t_{h,fi} = \frac{F}{L_T} = \frac{F}{D_F \cdot v_{F,h} \cdot l_{T,b}}$$

wobei D_F Dichte des Fahrgaststromes [P/m^2]

Die Leistungsfähigkeit des Querschnittes hängt somit linear von der Breite ab und die Fahrgastwechselzeit lässt sich mit der früher definierten spezifischen Leistungsfähigkeit (Produkt aus Dichte und Geschwindigkeit) ausdrücken:

$$(22) \quad t_{h,fi} = \frac{F_i}{l_{T,bi} \cdot L_{s,i}}$$

Die spezifische Türleistungsfähigkeit $L_{s,i}$ wiederum und die spezifische Fahrgastwechselzeit $t_{h,fsi}$ [ms/P] als deren Kehrwert sind stochastische Grössen. Die Zufallsvariable $T_{h,fsi}$ der spezifischen Fahrgastwechselzeit kennzeichnet sich durch einen Erwartungs-

wert $t_{h,fsi}$, eine Standardabweichung $\sigma_{h,fsi}$, eine Verteilungsfunktion $P_{T,i}(\tau)$ und eine Dichte $p_{T,i}(x)$. Der Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit $t_{h,fi}$ lautet damit:

$$(23) \quad t_{h,fi} = \frac{F_i}{l_{T,bi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot p_{T,i}(x) dx$$

wobei $t_{h,fsi}$ Spezifische Fahrgastwechselzeit an der Türe i [ms/P]
 $p_{T,i}(x)$ Dichte der spezifischen Fahrgastwechselzeit [ms/P]

3.12 Modelle mit Kapazitätsrestriktionen

3.12.1

Einstieg mit Kapazitätsrestriktion im Zulauf

Die Fahrgäste sind mit der Fahrgastdichte $D_{F,W}$ auf der Wartefläche verteilt. Die zugeordnete Warteraumfläche einer Türe wird begrenzt durch Gebäudeteile, Einrichtungs- und Ausstattungsgegenstände sowie durch die Einzugsgebiete benachbarter Türen.

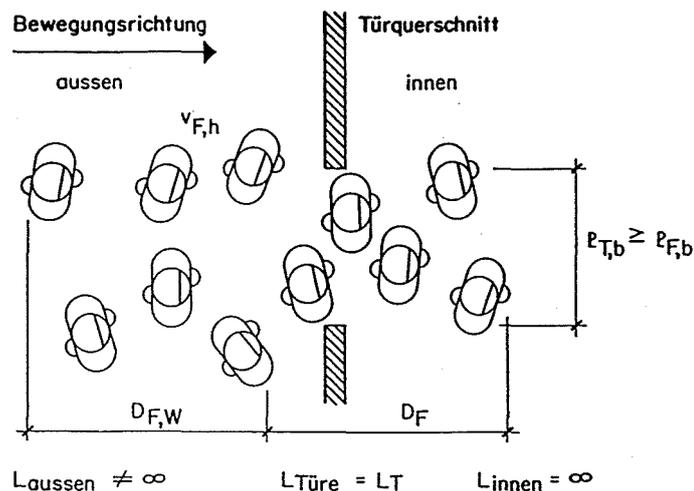


Abb. 63

Fahrgäste warten mit einer bestimmten Dichteverteilung auf einer Wartefläche und müssen sich zuerst zur Türe bewegen.

Für die Zahl der Fahrgäste in einem bestimmten Abstand vom Einstieg gilt:

$$(24) \quad F_{ri,k} = \int_{l_{r,i}}^{l_{r,k}} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} D_{F,W}(l_r, \Phi) \cdot l_r d\Phi dl_r$$

wobei $F_{ri,k}$ 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]

Daraus und aus der Gehgeschwindigkeit ergibt sich die Zuströmfunktion. Die Zahl der Fahrgäste F_i ist gleich dem zeitlichen Integral über die Zuströmfunktion. Sind die Geschwindigkeiten einigermaßen identisch, so lassen sich die Isochronen der Zeit $t_{z,i}$ berechnen, innerhalb derer die Fahrgäste zur Türe gelangen.

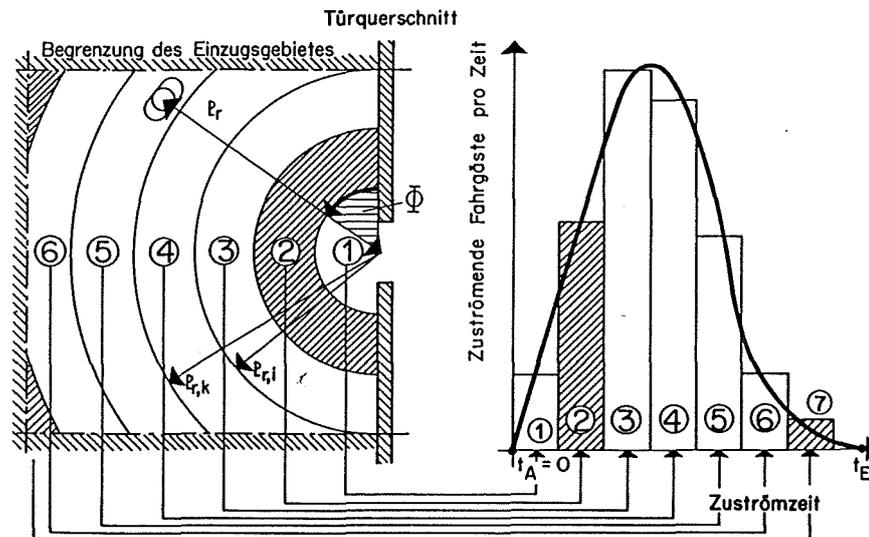


Abb. 64

Links: Isochronen und Begrenzung des Einzugsgebietes einer Fahrzeuggestüre; Definition der Grössen. Rechts: Verlauf des Zustromes der Fahrgäste zu einer Türe.

Die folgende Abbildung zeigt einige typisierte Fahrgastverteilungen mit ihren Zuströmfunktionen und Fahrgastwechselzahlen. Durch Kombination der Typen 1 bis 4 mit den Typen 5 bis 7 lassen sich verschiedenartige Fahrgastverteilungen approximieren. Beispielsweise vermögen die wenigsten Fahrgäste abzuschätzen, wo die Türen eines einfahrenden Kurses zum Stehen kommen. Zudem wahren sie einen Sicherheitsabstand von der Perronkante. Diese Fahrgäste müssen zunächst einen Weg zur Türe zurücklegen. Die geeigneten Zuströmfunktionen 3 oder 4, kombiniert mit 6 oder 7, zeigen, dass dadurch eine Verzögerung des Einsteigevorganges auftritt.

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	$D_{F,1} = \text{const.}$	$\pi \cdot D_{F,1} \cdot v_{F,h}^2 \cdot t$		$\frac{\pi}{2} \cdot D_{F,1} \cdot v_{F,h}^2 \cdot t_q^2$
②		wie ⑤ bis ⑦	$D_{F,2} \cdot \left(1 - \frac{L_r}{L_{r,g}}\right)$	$\frac{\pi \cdot D_{F,2} \cdot v_{F,h}^2}{t_q} \cdot (t_q \cdot t - t^2)$		$\frac{\pi}{6} \cdot D_{F,2} \cdot v_{F,h}^2 \cdot t_q^2$
③		wie ⑤ bis ⑦	$D_{F,3} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{L_{r,g}} \cdot L_r\right)$	$\pi \cdot v_{F,h}^2 \cdot D_{F,3} \cdot t \cdot \sin\left(\frac{\pi}{t_q} \cdot t\right)$		$D_{F,3} \cdot v_{F,h}^2 \cdot t_q^2$
④		wie ⑤ bis ⑦	$D_{F,4} \cdot \frac{L_r}{L_{r,g}}$	$\pi \cdot v_{F,h}^2 \cdot D_{F,4} \cdot \frac{t^2}{t_q}$		$\frac{\pi}{3} \cdot D_{F,4} \cdot v_{F,h}^2 \cdot t_q^2$
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. 65

Typisierte Fahrgastverteilungen, zugehörige Zuströmfunktionen und Fahrgastwechselzahlen.

Die pro Zeiteinheit zuströmende Fahrgastmenge ist der Türeistungsfähigkeit gegenüberzustellen: Ist der Zustrom genau gleich gross wie die Türeistungsfähigkeit, so wird diese voll ausgeschöpft. Übersteigt der Zustrom die Verarbeitungskapazität, so tritt ein Rückstau auf. Ist der Zustrom jederzeit kleiner, so wird die Türeistungsfähigkeit nie ausgenützt:

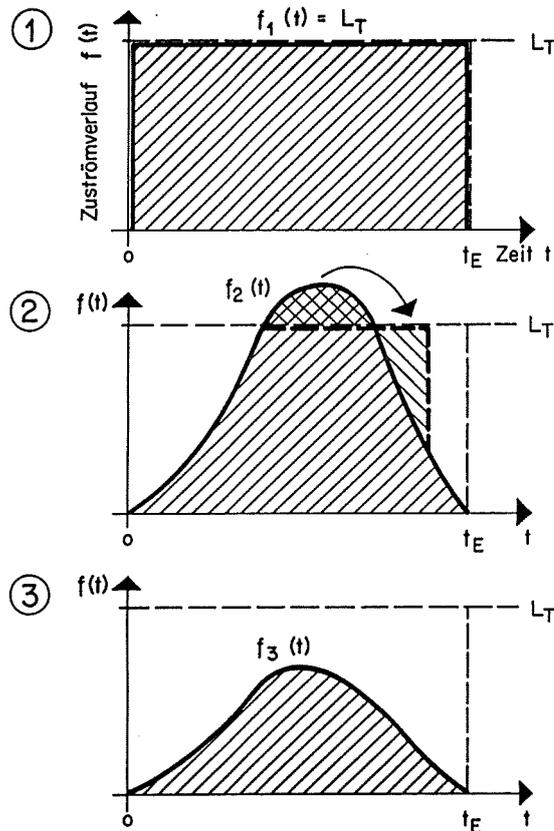


Abb. 66

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.

Für das Ende des Fahrgastwechsels bei Rückstau ist der Fahrgastzustrom dann massgebend, wenn die Warteschlange abgebaut ist, bevor der letzte Fahrgast bei der Türe eintrifft. Bei grosser Warteschlange endet der Fahrgastzustrom, bevor der Fahrgastwechsel abgeschlossen ist. Somit ist die effektiv erzielte Leistungsfähigkeit einer Fahrzeugtüre nicht nur von deren baulichen Gestaltung, sondern auch von den Zuflussverhältnissen im Allgemeinen und der Grösse des Fahrgastwechsels im Besonderen abhängig. Insgesamt ist die Leistungsfähigkeit bei grossen Fahrgastwechselzahlen höher als bei kleinen.

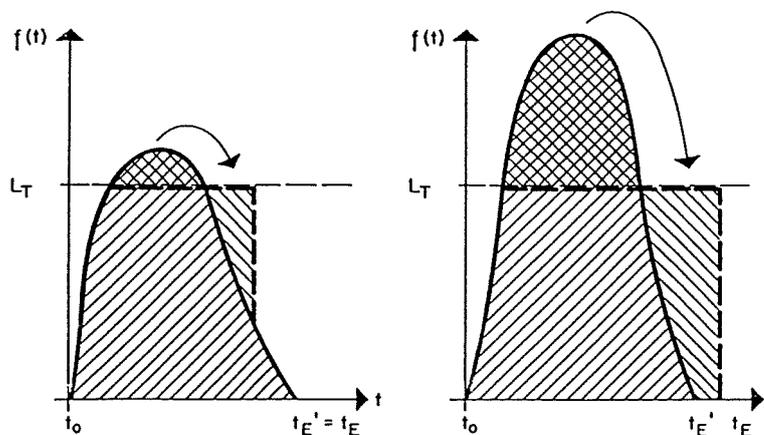


Abb. 67

Fahrzeugelinstieg mit Rückstau. Links: Fahrgastzustrom ist massgebend für das Ende des Fahrgastwechsels. Rechts: Rückstau ist massgebend für die Fahrgastwechselzeit.

3.12.2

Einstieg mit Kapazitätsrestriktion Im Nachlauf

Wird die Nachlaufkapazität allein durch die Gesamtleistungsfähigkeit der Fahrzeugänge und der allfälligen Treppen in andere Geschosse bestimmt, so ist die dadurch verursachte Kapazitätsbeschränkung konstant. Werden die Stehplatzbereiche als Durchgangs- und Stauräume gleichzeitig genutzt, so werden die Flächen mit fortschreitendem Einsteigevorgang von stehenden Fahrgästen beansprucht, sodass die Nachlaufkapazität progressiv herabgesetzt wird.

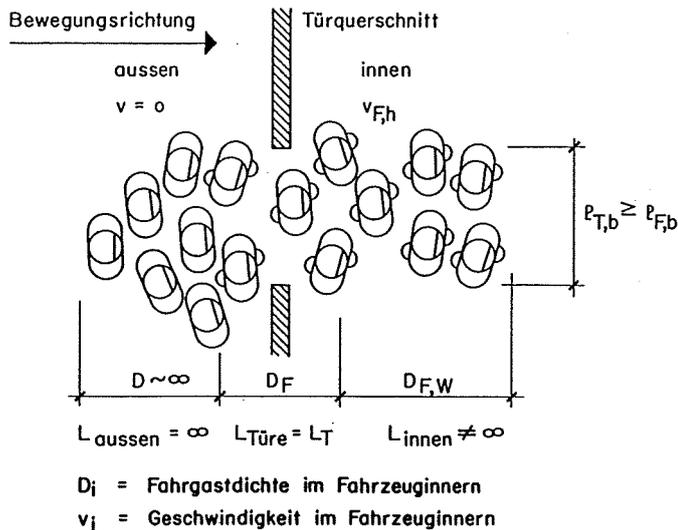


Abb. 68

Einstelgeverlauf mit unbeschränkter Kapazität im Zulauf und beschränkt-variabler Kapazität im Nachlauf.

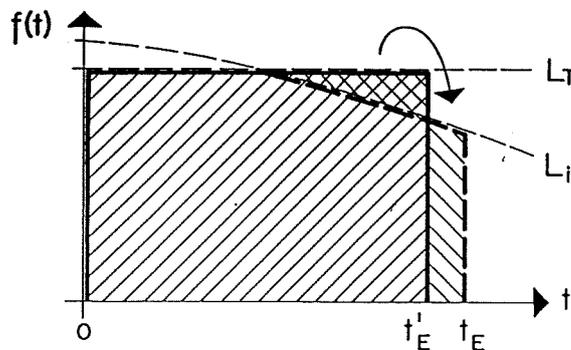


Abb. 69

Gegenüberstellung von Türlistungsfähigkeit und Leistungsfähigkeit des Nachlaufes L_i bei beschränkter und abnehmender Nachlaufkapazität, Rückstaubildung.

3.12.3

Einstieg mit Kapazitätsrestriktion Im Zu- und Nachlauf

Sind weder Zu- noch Nachlauf in Ihrer Kapazität unbegrenzt, so tritt eine Kombination der beiden Fälle mit dreifacher Beschränkung durch Zulaufkapazität, Türkapazität und Nachlaufkapazität auf. Der Durchsatz des Systems Fahrzeugeinstieg wird durch die restriktivste der drei Kapazitäten limitiert. Im Nahverkehr verläuft das Aussteigen dank breiter Türen schnell und ist meist abgeschlossen, bevor sich allzu viele Einsteiger um die Tür versammelt und die Nachlaufkapazität auf dem Perron massgeblich herabgesetzt haben. Hingegen wird die Nachlaufkapazität im Fahrzeug durch Stehplatzfahrgäste eingeschränkt. Im Fernverkehr benötigt das Aussteigen wegen enger Türen und der Behinderung durch Gepäck mehr Zeit, sodass sich die Einsteiger um die Tür gruppieren können. Da die Gänge nicht als Stehplatzflächen verwendet werden, ist dagegen die Nachlaufkapazität im Fahrzeug kaum eingeschränkt.

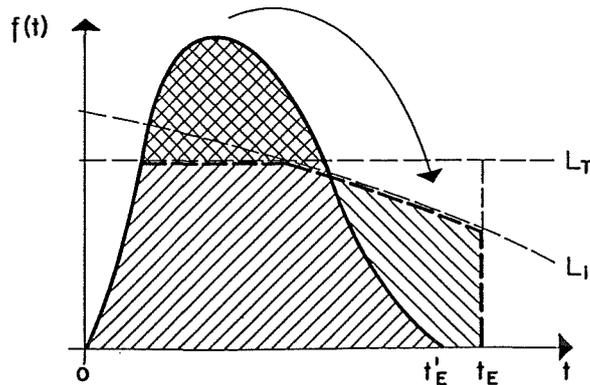


Abb. 70

Gegenüberstellung von Zulaufkapazität, Türleistungsfähigkeit und Nachlaufkapazität bei beschränkter Zulaufkapazität und abnehmender Nachlaufkapazität; Rückstau.

3.12.4

Einstieg mit Gegenverkehr

Bei Gegenverkehr lassen sich die vielfältigen Ablaufformen folgendermassen eingrenzen:

- **Grenzfall 1:** Der Fahrgastwechsel erfolgt in beiden Richtungen gleichzeitig, Bewegungsflächen und Türquerschnitt teilen sich auf die beiden Richtungen auf. Der reduzierten Kapazität entsprechend erstreckt sich der Abschluss des Fahrgastwechsels. Die Ströme behindern sich, solange nicht einer der beiden versiegt.

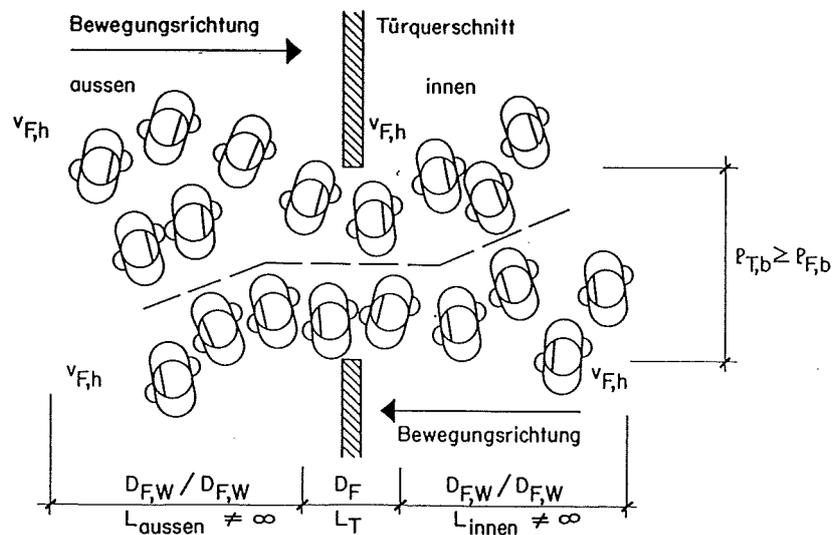


Abb. 71: Fahrzeugelinstieg mit Gegenverkehr bei gleichzeitigem Fahrgastwechsel in beiden Richtungen.

- **Grenzfall 2:** Der Fahrgastwechsel verläuft nacheinander in den zwei Richtungen. Beiden Richtungen dient je die volle Türleistungsfähigkeit, doch setzt der zweite Fahrgastwechsel erst ein, wenn der erste abgeschlossen ist. Der Aussteigevorgang, welcher als erster abläuft, wird durch die Einsteiger konstant behindert. Die Einsteiger betreten ein leeres Fahrzeug und erst der Rückstau führt zu einer Verzögerung.

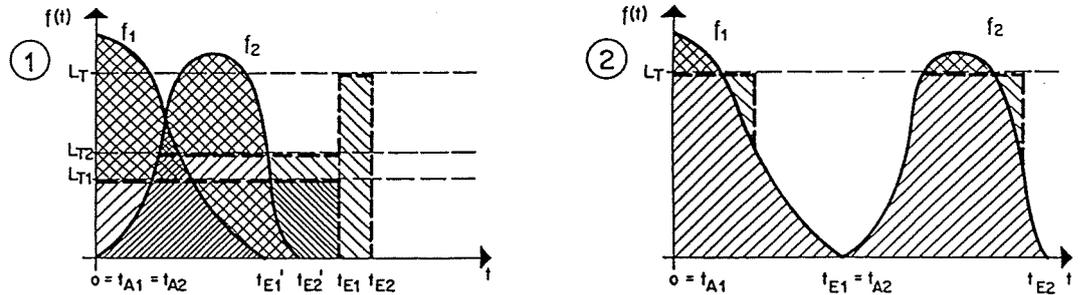


Abb. 72

Fahrgastwechsel mit Gegenverkehr und beschränkter Kapazität im Zu- und Nachlauf. Fall 1: Gleichzeitiger Ablauf von Einsteigen und Aussteigen. Fall 2: Getrennter Ablauf von Einsteigen und Aussteigen.

3.13

Überblick über die Einflussfaktoren

Die Einflüsse auf die Fahrgastwechselzeit an einer Türe lassen sich gliedern nach den Eigenschaften der Fahrgäste, den Begleitumständen des Fahrgastwechsels sowie der Einstiegs- und Perrongestaltung. Während sich die Eigenschaften der Fahrgäste von Individuum zu Individuum unterscheiden, betreffen die Begleitumstände alle Fahrgäste einer beteiligten Gruppe in gleicher Weise. Die Einstiegsgestaltung schliesslich beeinflusst den Fahrgastwechsel unabhängig von der Zusammensetzung der Fahrgastgruppe und der äusseren Bedingungen. Viele Einflüsse hängen miteinander zusammen und wirken deshalb auch indirekt über mitbestimmte Faktoren auf die Fahrgastwechselzeit ein.

Tab. 8

Einflussfaktoren auf die Fahrgastwechselzeit einer Einzeltüre.

Eigenschaften der Fahrgäste	Begleitumstände des Fahrgastwechsels	Einstiegs- und Bahnsteiggestaltung
Geschlecht Alter Grösse Gesundheitszustand Erholungsgrad Charakter, Temperament Stimmungslage Zeitdruck Gepackbelastung Körperliche Behinderungen Gewohnheiten Vertrautheit mit dem System	Verkehrszweck Jahreszeit Wochentag Tageszeit Klima Witterung Höhenlage über Meer Besetzungsgrad des Kurses Bewegungsrichtung Gegenseitige Behinderung Fahrgastwechselzahl	Bahnsteighöhe Wagenbodenhöhe Türbreite Abflussmoglichkeiten Perron Fahrgastfluss im Fahrzeug Spaltbreite Perron-Trittbrett Einstiegswinkel, Ergonomie Festhaltungsmoglichkeiten Beleuchtung Oberflächenzustand

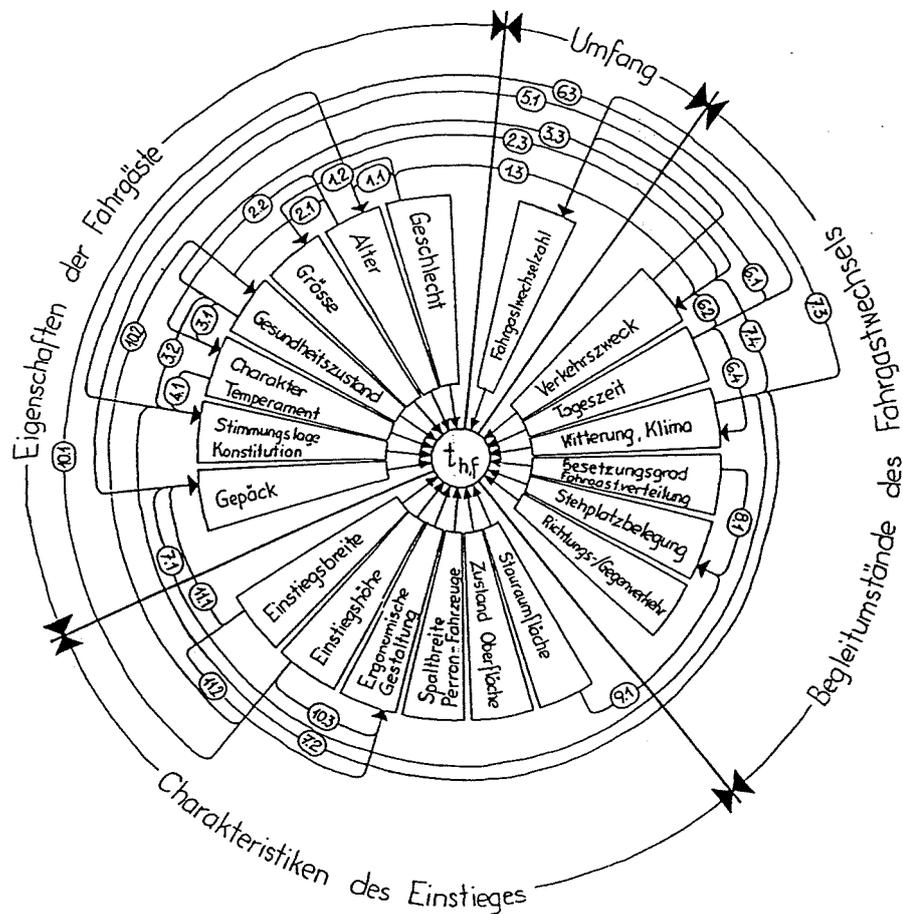


Abb. 73

Einflussfaktoren auf die Fahrgastwechselzeit an einer Einzeltüre und gegenseitige Abhängigkeiten:

1. Frauen leben länger als Männer, sind aber kleiner und weniger kräftig. Das Geschlecht beeinflusst somit Alter (1.1) und Körpergröße (1.2). Noch immer unterscheidet sich die Berufstätigkeit von Frau und Mann, 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 Freizeitverkehr.
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 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).
6. Aufgrund der Tageszeit schwankt zunächst das Fahrgastaufkommen (6.1) und gleichzeitig verschieben sich die Verkehrszwecke (6.2). Abhängig sind zudem infolge tagesperiodischer Leistungsschwankungen die Stimmungs-

- lage und körperliche Konstitution (6.3). Schliesslich variieren die Umgebungstemperatur beziehungsweise das Aussenklima tageszeitlich (6.4).
7. *Witterung und Klima sind für eine unterschiedliche Belastung der Fahrgäste durch Gepäck, namentlich durch Regenschirme, mitverantwortlich (7.1). Sie beeinflussen die Stimmungslage und 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 Bahnsteig bestimmt bei gegebener Fahrgastwechselzahl die Fahrgastdichte (9.1) und damit die Behinderung des Fahrgastwechsels.*
 10. *Die Einstiegs Höhe 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. Je kleiner die Höhendifferenz ist, desto ergonomisch günstiger lässt sich der Einstieg gestalten (10.3).*
 11. *Je nach Einstiegsbreite der Türen kann ein Kinderwagen verladen werden oder nicht (11.1). Ausserdem wird die ergonomische Gestaltung durch die Breite der Türe beeinflusst (11.2).*

Die Grösse der Streuung der Fahrgastwechselzeit ist abhängig von der Unregelmässigkeit des Fahrgastwechselforganges:

1. **Inhomogene Zusammensetzung der Fahrgastgruppen:** Je inhomogener eine Fahrgastgruppe zusammengesetzt ist, desto grösser wird die Streuung.
2. **Dichte des Fahrgaststromes:** Die Zeltlücken am Einstieg können nur dann restlos ausgenützt werden, wenn der Zustrom während des gesamten Fahrgastwechsels nie massgebend wird. Je kleiner die Fahrgastwechselzahl ist, desto mehr hängt die Ausschöpfung der Türleistungsfähigkeit von Zufälligkeiten ab, zum Beispiel davon, ob sich die wenigen Fahrgäste gerade in der Nähe der Türe befinden. Beim Aussteigen kann die Kapazität der Wege im Fahrzeuginnern die Stetigkeit des Fahrgaststrom stören, indem die Fahrgastkolonne infolge unterschiedlicher Geschwindigkeiten auseinandergezogen wird. Bei kleinen Fahrgastwechselzahlen ist daher mit höheren Streuungen zu rechnen als bei grösseren Fahrgastwechseln.

3.2

3.21

3.21.1

Erwartungswert und Streuung

Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit

Abhängigkeit von der spezifischen Türbelastung

Die 105 Werte zur spezifischen Türleistungsfähigkeit aus der Literatur und den eigenen Messungen belegen die theoretisch postulierte Abhängigkeit von der spezifischen Türbelastung $Q_{T,S}$. Die Messresultate führten auf eine Regressionskurve des Verlaufs $a \cdot x^b$. Ist eine Türe mit $Q_{T,S} = 50 \text{ P/m'}$ hoch beansprucht, so werden gemäss Tabelle 9 rund drei Viertel der maximalen Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen erreicht. Die Personendichte beträgt dabei 0.8 P/m^2 bei ebenen Einstiegen und 1.1 P/m^2 bei Treppen. Dies entspricht den LOS E bis F. Hier sind Gegenverkehr und Überholen unmöglich. Bewegungsfreiheit und Geschwindigkeitwahl sind stark eingeschränkt, es treten aber noch keine unbeabsichtigten gegenseitigen Berührungen auf, was der praktischen Erfahrung entspricht. Selbst bei sehr starkem Fahrgastwechsel wird die Leistungsfähigkeit von Engpässen nicht erreicht.

Tab. 9 Vergleich der spezifischen Türleistungsfähigkeit mit jener von Fussgängeranlagen.

Anlagentyp	Spezifische Leistungsfähigkeit			Verhältnisse	
	Literatur (Mittelwert)	Messungen (bei 50 P/m')	Fussgänger (Maximum)	Literatur : Fussgänger	Messungen : Fussgänger
Ebener Einstieg	0.97 P/sm	0.93 P/sm	1.23 P/sm	78.9%	75.6%
Treppe	0.66 P/sm	0.69 P/sm	0.91 P/sm	72.5%	75.8%
Durchschnitt	-	-	-	75.7%	75.7%
L_S (Treppe) in [%] von L_S (eben)	68.0%	74.2%	74.0%	-	-

3.21.2

Abhängigkeit von den Türabständen

Die spezifische Leistungsfähigkeit hängt mit den Türabständen der Fahrzeuge zusammen. Je kleiner diese sind, desto schneller sind die Fahrgäste beim Durchgang (steile Zuströmfunktion, Fall 2 im Modell). Die effektive Türleistungsfähigkeit ist dadurch bei kleinen Türabständen höher als bei grossen.

Der Kurvenverlauf der spezifischen Leistungsfähigkeit, welcher bei einer relativen Türbelastung von 50 P/m' etwa 76 % der maximalen Leistungsfähigkeit einer Fussgängeranlage ergibt, liess sich aus den Messungen bestimmen. Da die Zahl der untersuchten Fahrzeuge beschränkt ist, konnten nur zwei Kategorien gebildet werden:

- Fahrzeuge mit grossen Türabständen über etwa 10 m: Einheitswagen IV der SBB, Doppelstockwagen der NS, Doppelstockwagen der SBB.
- Fahrzeuge mit kleinen Türabständen unter etwa 10 m: BR 420 der DB, Be 4/6 der TPG, Niederflurstrassenbahn der SEMITAG, Trolleybusse der BVB, Gelenkbus von MAN.

Die folgende Tabelle fasst die resultierenden Bestimmungsgleichungen für die spezifische Leistungsfähigkeit zusammen. Diese werden später um zusätzliche Einflussgrössen zu erweitern.

Tab. 10

Spezifische Türleistungsfähigkeiten in Funktion der spezifischen Türbelastung.

Türabstände Einstiegshöhe	Grosse mittlere Türabstände (über 10 m)	Kleine mittlere Türabstände (unter 10 m)
Ebene Einstiege	$L_S = 0.488 \cdot Q_{T,S}^{0.1651}$ (25)	$L_S = 0.781 \cdot Q_{T,S}^{0.0450}$ (26)
Treppeneinstiege (Höhendifferenz 650 mm oder drei Treppenstufen)	$L_S = 0.361 \cdot Q_{T,S}^{0.1651}$ (27)	$L_S = 0.578 \cdot Q_{T,S}^{0.0450}$ (28)

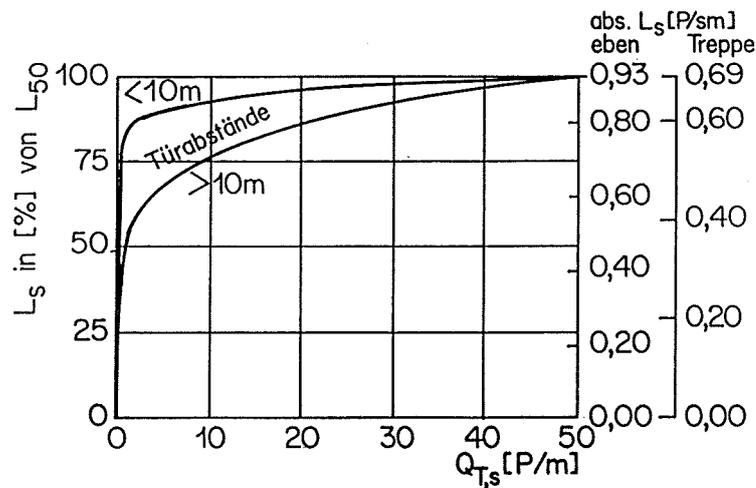


Abb. 74

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.

3.22

Streuung der Fahrgastwechselzeiten

Die spezifischen Türleistungsfähigkeiten sind praktisch normalverteilt. Damit muss deren Kehrwert, die mittlere Fahrgastwechselzeit, linksschief sein, was die meisten Messungen bestätigen. Die Standardabweichung der spezifischen Türleistungsfähigkeit liegt bei 27.3% des Erwartungswertes, jene der mittleren Fahrgastwechselzeit bei 28.9% . Zum Vergleich beträgt die Streuung der Fussgängergeschwindigkeiten 19.3% . Mit hin streut die spezifische Türleistungsfähigkeit nicht nur infolge unterschiedlicher Fahrgastgeschwindigkeiten.

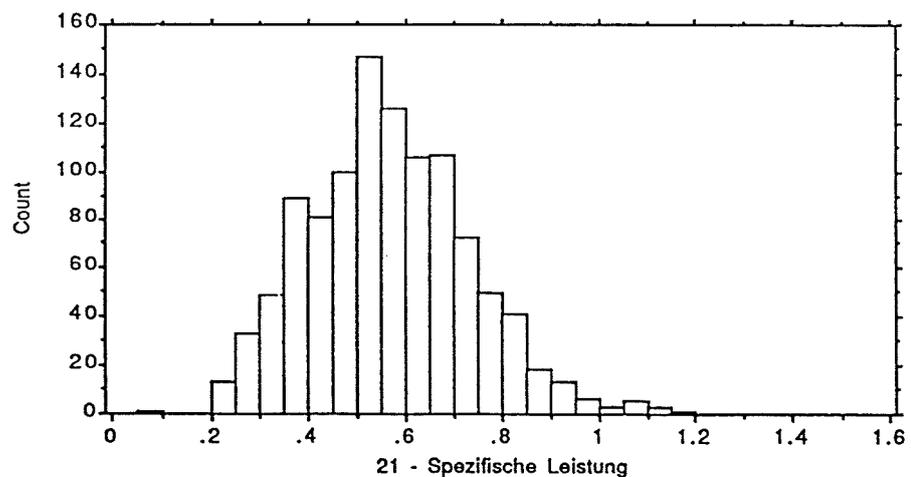


Abb. 75

Histogramm der spezifischen Türleistungsfähigkeit des Doppelstockwagens der NS im Einsatz bei der S-Bahn München, Perron 950 mm.

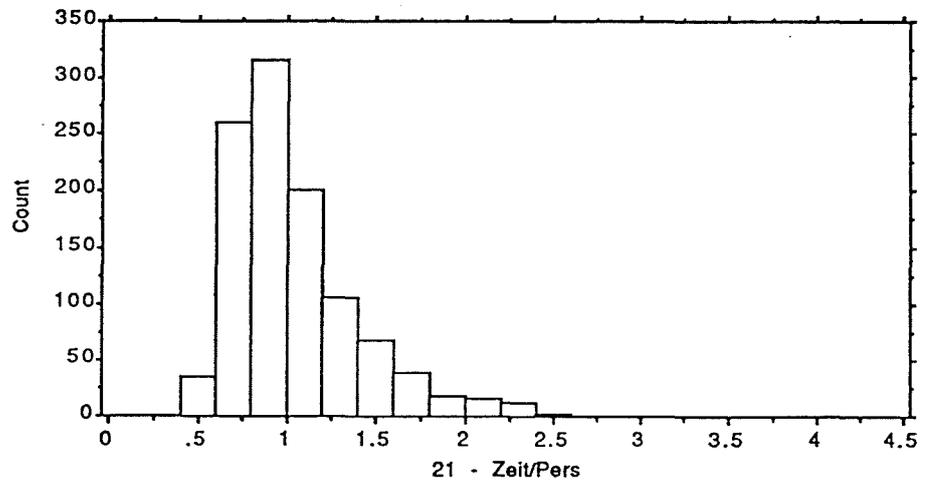


Abb. 76

Histogramm der mittleren Fahrgastwechselzeit des Doppelstockwagens der NS im Einsatz bei der S-Bahn München, Perron 950 mm.

Ein Einfluss der Einstiegshöhe auf die Grösse der Streuung ist nicht nachweisbar. Hin-gegen wächst diese mit der Türbreite gemäss folgender Beziehung an:

(29)

$$\sigma_{L,s} = 1.5186 + 29.1628 \cdot l_{T,b} - 6.7181 \cdot l_{T,b}^2$$

wobei $\sigma_{L,s}$ Standardabweichung der spezifischen Leistungsfähigkeit in [%] des Erwartungswertes

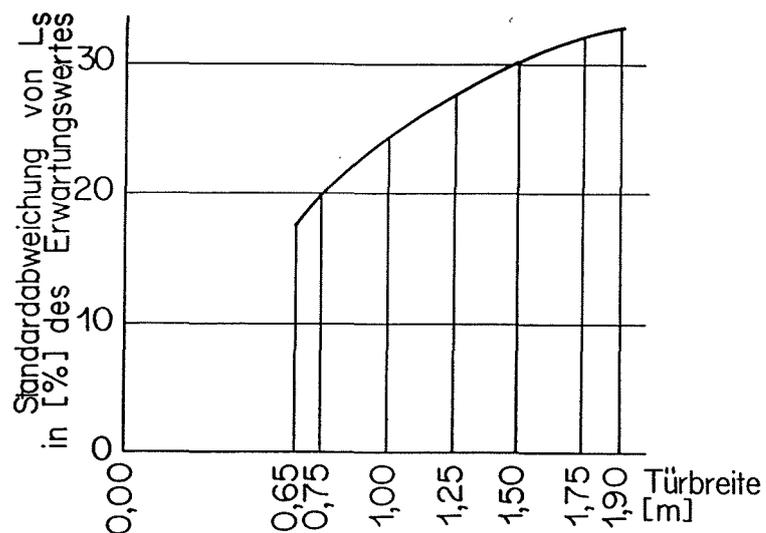


Abb. 77

Korrelation zwischen Türbreite und Standardabweichung von L_s .

3.3

3.31

Abhängigkeit von den Einflussfaktoren

Eigenschaften der Fahrgäste

3.31.1

Geschlecht

Die im Durchschnitt um 11 % höhere Gehgeschwindigkeit lässt für Männer und Frauen unterschiedliche Fahrgastwechselzeiten erwarten. Untersucht wurde der Punkt aber bisher nicht. Lediglich zur Verteilung der Geschlechter finden sich Angaben: Im Fernverkehr wurde ein Anteil von 56.1 % Männern und 43.9 % Frauen beobachtet. Im Nahverkehr lag der Männeranteil in Düsseldorf und Frankfurt mit 59 % beziehungsweise 52 % ebenfalls höher als der Frauenanteil. Trotz grösserem Anteil der Frauen an der Bevölkerung ist dies plausibel, zieht man die traditionell stärkere innerhäusliche Betätigung der Frau in Betracht. Diese bereits eine Generation zurückliegenden Erhebungen dürften allerdings durch die Entwicklung der Motorisierung und durch die verstärkte Berufstätigkeit der Frau überholt sein.

3.31.2

Alter

Ist es bei Kindern unter etwa sieben Jahren vor allem die Körpergrösse, welche eine kleinere Bewegungsgeschwindigkeit verursacht, so sind es im höheren Alter die schwindenden Körperkräfte. Gemäss der einzigen Arbeit zum Einfluss des Alters auf die Fahrgastwechselzeit unterscheiden sich die Fahrgastwechselzeiten der Altersgruppen "15 bis 25 Jahre" und "über 55 Jahre" kaum spürbar. Allerdings waren an den zugrundeliegenden Modellversuchen keine sehr alten Menschen beteiligt. Aus der Altersabhängigkeit der Gehgeschwindigkeit leitet sich immerhin ein Hinweis zur Fahrgastwechselzeit ab:

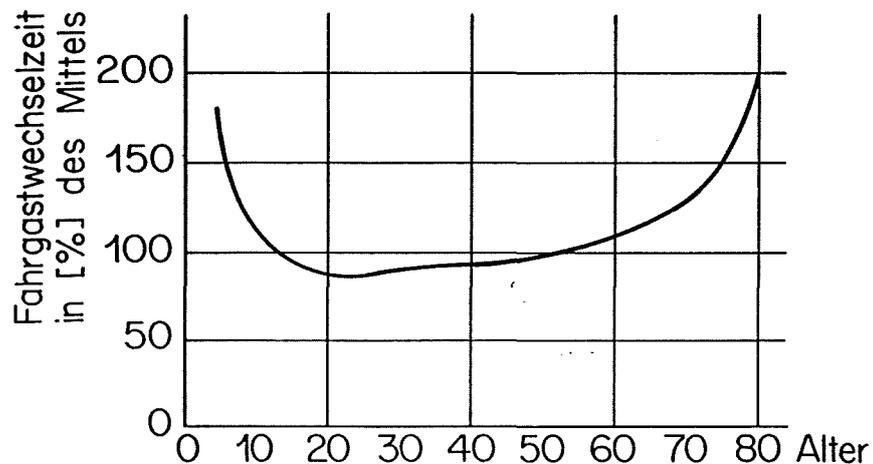


Abb. 78

Fahrgastwechselzeit in Funktion des Lebensalters als Prozentsatz des Mittelwertes, abgeleitet aus dem Kehrwert der Gehgeschwindigkeit.

3.31.3

Belastung durch Gepäck

Obwohl rund 30 % der Fahrgäste mit mittlerem bis grossem Gepäck unterwegs sind, lassen sich keine allgemeingültigen Angaben zum Einfluss auf die Fahrgastwechselzeit machen. Erkennbar ist immerhin, dass sich die Fahrgastwechselzeit bei sehr grossem Gepäckanteil verdreifachen kann, wie [41] anhand der Aussteigezeiten bei Autobussen zeigt:

- 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

3.31.4**Körperliche Behinderungen**

Die Formen körperlicher Behinderungen sind sehr vielfältig. Die Fahrgastwechselzeit von Gehbehinderten und Rollstuhlfahrern liegt um ein Vielfaches über jenem der Nichtbehinderten, ohne dass genauere Angaben möglich wären. Die Einflüsse werden durch die Streuungsmasse der Türleistungsfähigkeit teilweise erfasst.

3.32**Begleitumstände des Fahrgastwechsels****3.32.1****Verkehrszweck**

Weder liessen sich Angaben zur Abhängigkeit der Fahrgastwechselzeit vom Verkehrszweck finden, noch konnten die Messungen diesbezüglich ausgewertet werden. Anhaltspunkte liefert die Fussgängergeschwindigkeit, welche folgende Abweichungen von der mittleren Gehgeschwindigkeit zeigt:

•	Pendlerverkehr	+ 11 %
•	Einkaufsverkehr	- 13 %
•	Nutz- und Werkverkehr	+ 20 %
•	Touristik- und Freizeitverkehr	- 18 %

Diese Werte können in erster Näherung auch bei der spezifischen Leistungsfähigkeit eingesetzt werden.

3.32.2**Tageszeit**

Die Tageszeit beeinflusst die Fahrgastwechselzeit zweifach:

- Tageszeitabhängiger Fahrgastmix: 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 weist ein grösseres Maximum um etwa 8 Uhr sowie ein kleineres um etwa 19 Uhr auf. Dazwischen ist sie deutlich tiefer mit einem Minimum um etwa 15 Uhr.

Mittels folgender vier Indikatoren konnte die Tageszeitabhängigkeit der Türleistungsfähigkeit quantifiziert werden:

- Messfahrten bei den BVB Basel. Diese dauerten nur rund 20 Minuten und erlaubten damit eine tageszeitbezogene Auswertung.

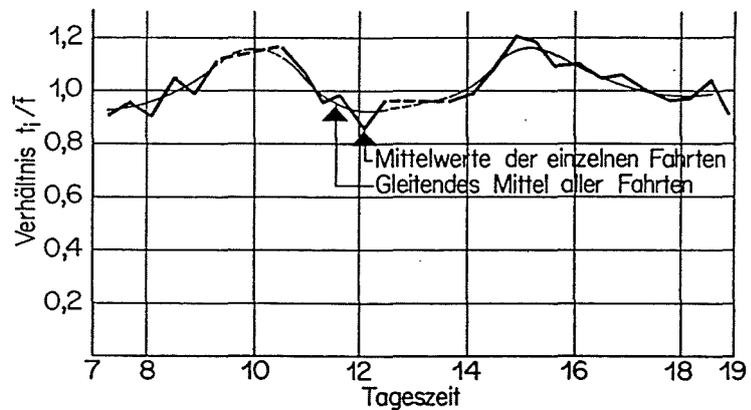


Abb. 79: Tagesganglinie der Fahrgastwechselzeit bei den Messfahrten vom 23. und 24. April 1990 bei den BVB Basel, bezogen auf den Tagesmittelwert.

- Tagesgang der körperlichen Leistungsfähigkeit des Menschen gemäss Abschnitt 2.23.3
- Tagesgang der Fussgängergeschwindigkeiten gemäss Abschnitt 2.32.
- Anteil der Verkehrszwecke im öffentlichen Verkehr im Tagesverlauf, verknüpft mit der Reisezweckabhängigkeit der Türleistungsfähigkeit gemäss Abschnitt 3.32.1.

Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der spezifischen Türleistungsfähigkeit während des Tages als Prozentsatz des Mittelwertes. Dessen Kehrwert ist der Korrekturfaktor für die Fahrgastwechselzeit:

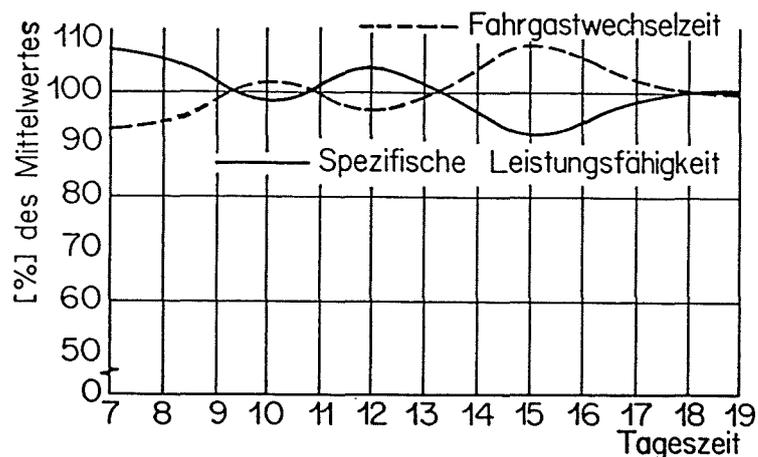


Abb. 80

Tagesgang der spezifischen Türleistungsfähigkeit und der mittleren Fahrgastwechselzeit, dargestellt in Prozenten des Mittelwertes.

3.32.3

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.

3.32.4

Besetzungsgrad des Fahrzeuges

Die Beschreibung der Leistungsminderung der Einstiege infolge hoher Fahrgastdichte im Fahrzeug hängt von folgenden Faktoren ab:

- Der Fahrgastwechsel wird durch die Stehplatzfahrgäste behindert und damit verzögert.
- Bei hoher Stehplatzbelegung befindet sich eine grössere Zahl aussteigewilliger Fahrgäste in Türnähe, was den Fahrgastwechsel beschleunigt. Die maximale Leistungsfähigkeit eines ebenen Fussweges wird erst bei 1.75 P/m^2 erreicht, jene einer Treppe sogar erst bei 2.23 P/m^2 .
- Der Stehplatzbelegungsgrad verändert sich während des Fahrgastwechsels, wobei die Leistungsfähigkeit der Verbindungswege im Fahrzeug massgeblich den Dichteverlauf beeinflusst.

Diese Einflüsse wirken gegenläufig. Insgesamt lassen sie eine Leistungssteigerung bei mittleren und eine Leistungsminderung bei hohen Fahrgastdichten erwarten, was die Messungen bestätigen:

(30)

$$k_D = 1.000 - 0.0986 \cdot D_{F,T} + 0.0374 \cdot D_{F,T}^2$$

wobei k_D Korrekturfaktor zur mittleren Fahrgastwechselzeit beim Auftreten von Stehplatzfahrgästen im Türraum [-]
 $D_{F,T}$ Stehplatzdichte im Türraum, Mittel aus der Dichte vor und nach dem Fahrgastwechsel [P/m^2]

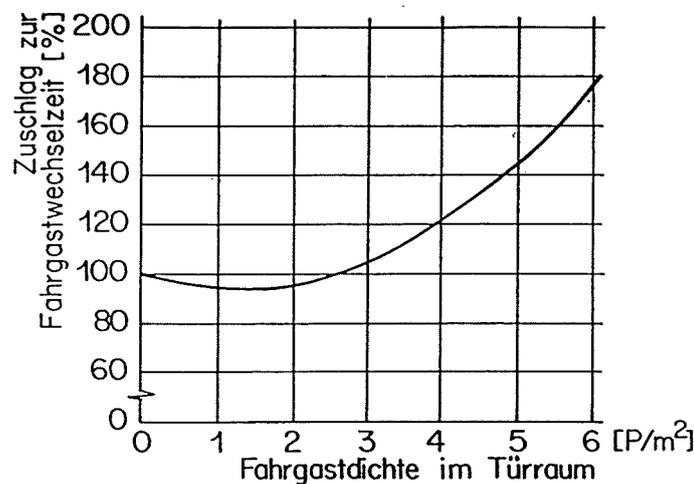


Abb. 81

Zuschlagfaktor [%] zur mittleren Fahrgastwechselzeit als Funktion des Stehplatzbelegungsgrades.

Am Beispiel von Pendelluftseilbahnen lässt sich exemplarisch zeigen, dass die progressive Verlängerung der mittleren Fahrgastwechselzeit oberhalb eines optimalen Kabinenfüllungsgrades zum Absinken der Streckenleistungsfähigkeit führt. Es lassen sich zwei Phasen des Fahrgastwechsels unterscheiden:

- Phase 1: Rasches Einstiegen, da alle Fahrgäste einen Fensterplatz anstreben.
- Phase 2: Grössere Behinderung oberhalb einer Besetzung von etwa 2/3 der Kabinenkapazität (3 bis 4 P/m²), da die Fahrgäste in der Nähe der Türe bleiben wollen.

Der optimale Füllungsgrad wird mit dem Füllungsgrad-Haltezeit-Diagramm bestimmt:

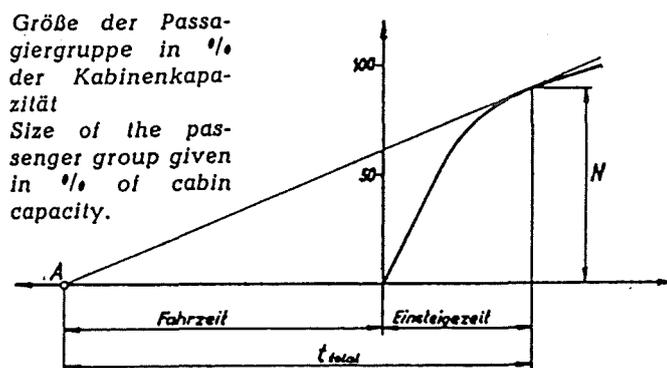


Abb. 82

Bestimmung des optimalen Füllungsgrades einer Pendelluftseilbahn zur Erzielung der maximalen Streckenleistungsfähigkeit [61].

Diese Gesetzmässigkeiten gelten generell für den öffentlichen Linienverkehr. Sie lassen sich aber infolge der komplexeren Situation nicht gleichermassen einfach für Strassenbahn- und Buslinien darstellen.

3.32.5

Bewegungsrichtung der Fahrgäste am Einstieg

Ein Einfluss der Bewegungsrichtung auf die Fahrgastwechselzeit bei Treppen ist aufgrund von Abschnitt 2.33 zu erwarten. Zusätzlich erweist sich:

1. Auch Fahrzeuge mit ebenen Einstiegen zeigen Geschwindigkeitsunterschiede, wobei das Einstiegen langsamer als das Aussteigen verläuft. Offensichtlich führt die grössere Entfernung der Fahrgäste zur Türe beim Einstiegen zu längeren Zuströmzeiten. Im weiteren müssen Rückstauererscheinungen verzögernd wirken und schliesslich reduzieren die Fahrgäste beim Betreten eines Fahrzeuges ihre Geschwindigkeit, wenn sie einen Platz suchen.
2. Im Fernverkehr werden die Aussteiger öfters von Fahrgästen auf dem Perron behindert, während das Einstiegen zügig und sogar schneller als das Aussteigen vor sich geht.

Treppen sind in Steigungsrichtung um 13 % weniger leistungsfähig als in Gefällrichtung, womit die Abweichung vom Mittelwert ± 7 % beträgt. ± 11 % weist die Literatur für ebene Fahrzeugeinstiege aus, lediglich ± 8 % dagegen für Fahrzeugtreppen. Die eigenen Messungen zeigen eine Abweichung vom Mittelwert um ± 7 %.

3.32.6

Gegenseitige Behinderung der Fahrgäste

Entgegengerichtete Fahrgastströme üben dreierlei Einflüsse auf die Fahrgastwechselzeit aus:

1. Läuft der Fahrgastwechsel in beiden Richtungen gleichzeitig ab, so behindern sich die Fahrgäste beider Richtungen gegenseitig.
2. Wird die Türe zunächst nur in einer Richtung begangen, so wird der eine Fahrgaststrom von den wartenden Fahrgästen der anderen Richtung behindert.

3. Indem zwei Fahrgastströme auf die Benützung des Durchganges warten, werden die Zeitlücken besser ausgenützt.

Qualitativ entsteht öfters der Eindruck, dass ein Fahrgastwechsel mit ausschliesslich ein- oder aussteigenden Fahrgästen weniger Zeit benötigt als ein gemischter Fahrgastwechsel. Die Grössenordnung der Behinderung wird aber in der Regel überschätzt. Auf Fussgängeranlagen bleibt der Leistungsabfall gemäss Abschnitt 2.42 insgesamt klein (4.0 bis 14.5 %), weil sich ein Rechtsverkehr herausbildet. Eine Verlängerung der Fahrgastwechselzeit um rund 1.4 % nennt die Literatur. Die Auswertung der eigenen Daten zeigt dagegen eine Zunahme um lediglich 2 %. Der Widerspruch erklärt sich dadurch, dass die behindernden Einflüsse 1 und 2 erst bei grossen Fahrgastwechselzahlen zum Tragen kommen, während der beschleunigende Einfluss 3 vor allem bei kleinen Fahrgastwechselzahlen wirksam wird. Die Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit durch Gegenverkehr ist mithin von der Türbelastung abhängig, wobei die le Fahrgastwechselzahlen bei den eigenen Messungen im Mittel nicht derart gross waren, dass eine massgebliche Behinderung hätte eintreten können.

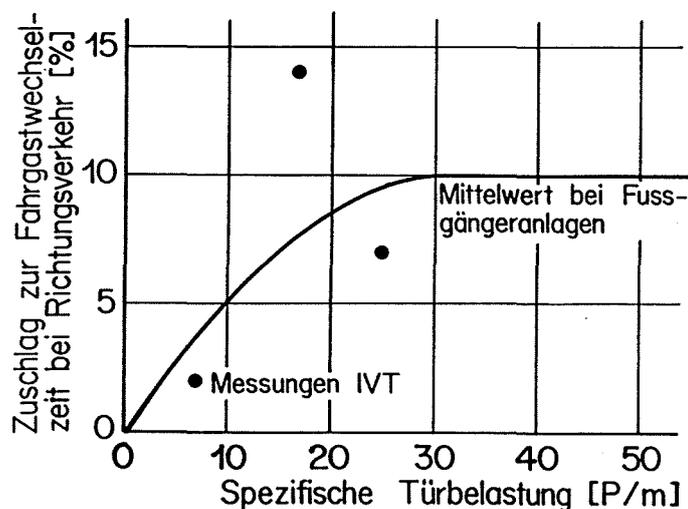


Abb. 83

Hypothese zur Abhängigkeit zwischen der spezifischen Türbelastung und der prozentualen Verlängerung der Fahrgastwechselzeit bei Gegenverkehr, verschiedene Einzelangaben.

3.33

Charakteristiken des Einstieges

3.33.1

Türbreite

Die Betrachtung der Leistungsfähigkeit in Funktion der Türbreite ist traditionell geprägt von der Denkweise in Türspuren von etwa 0.7 m Breite. Demnach stiege die Leistungsfähigkeit in Sprüngen entsprechend der Spurenzahl an. Zutreffen würde dies, wenn die Fahrgäste aufgereiht vor den Türspuren warten würden. Dieser Theorie wird bereits in der Literatur mit dem Hinweis darauf widersprochen, dass die Fahrgäste bei einhalbspurigen Türen (1.00 m Breite) versetzt und mit kleinerer Distanz zueinander einsteigen. In Realität benötigen die Fahrgäste einen ellipsenförmigen Bewegungsraum, dessen Fläche über die Geschwindigkeit entscheidet. Im skizzierten Modell wurde deshalb eine lineare Abhängigkeit zwischen der Türleistungsfähigkeit und der Breite postuliert.

Zum Nachweis wurden 102 Literaturangaben und Messwerte statistisch ausgewertet. Es zeigte sich, dass die Hypothese einer linearen Abhängigkeit Gültigkeit beanspruchen darf, dass die spezifische Türleistungsfähigkeit aber oberhalb einer Breite von etwa 1.50 m leicht abnimmt, weil hier das Zuströmen massgebend wird. Überbreite Türen werden demnach nicht voll ausgelastet.

Gelegentlich wird festgestellt, dass Doppeltüren nicht die doppelte Leistungsfähigkeit von Einfachüren erreichen. Der Widerspruch erklärt sich je nach Fall folgendermassen:

- In der Regel ist eine Doppeltüre nicht doppelt so breit wie eine Einfachtüre: Bei Einfachtüren sind 750 bis 800 mm gebräuchlich, während Doppeltüren etwa 1250 mm oder nur die Hälfte mehr messen.
- Werden Doppeltüren von zwei unabhängigen Türmechanismen bedient, so benützen oft alle Fahrgäste die bereits geöffnete Türhälfte, während der andere Türflügel geschlossen bleibt.

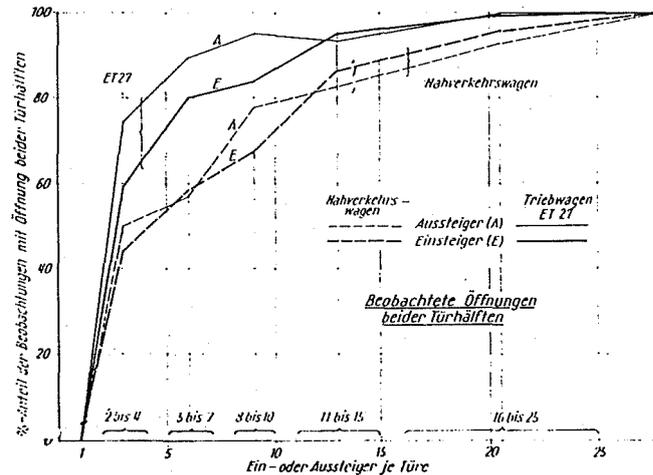


Abb. 84: Bereitschaft der Reisenden zum Öffnen beider Türhälften bei Nahverkehrswagen und Triebwagen BR 427 der DB [4].

3.33.2

Höhendifferenz

Eine lineare Regressionsrechnung auf 106 Angaben zur spezifischen Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Höhendifferenz zwischen Perron und Wagenboden zeigte folgenden Verlauf:

$$(31) \quad L_S = 0.9608 - 0.3878 \cdot l_{T,v}$$

wobei $l_{T,v}$ Höhendifferenz zwischen Perron und Wagenboden [m]

Damit kann folgender Korrekturfaktor formuliert werden:

$$(32) \quad k_{l,v} = \frac{0.9608 - 0.3878 \cdot l_{T,v}}{0.9608}$$

wobei $k_{l,v}$ Korrekturfaktor zur spezifischen Leistungsfähigkeit für die Höhendifferenz zwischen Perron und Wagenboden [-]

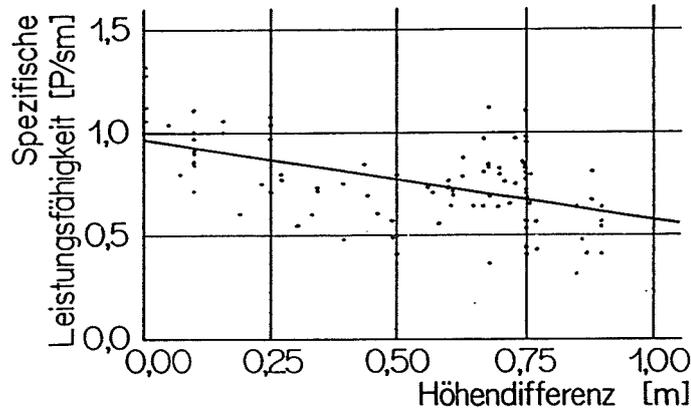


Abb. 85

Lineare Regression auf 106 Angaben zum Zusammenhang zwischen Höhendifferenz und spezifischer Leistungsfähigkeit.

Der Gültigkeitsbereich von $k_{1,v}$ lässt sich mit der Überlegung abgrenzen, dass die Leistungsfähigkeit nicht auf Null sinken kann, sondern sich der Treppenleistungsfähigkeit annähern muss. Bereits früher wurde erwähnt, dass die spezifische Leistungsfähigkeit eines ebenen Einstieges wie eines Treppeneinstieges um denselben Prozentsatz unter jener der entsprechenden Fussgängeranlage liegt. Dies ergibt eine Gültigkeitsgrenze bei etwa 0.70 m, was etwa drei Treppenstufen entspricht. Tatsächlich gleicht sich der Bewegungsablauf auf Fahrzeugeinstiegen mit drei Stufen demjenigen auf einer Treppe an. Somit gelten für den Einfluss der Höhendifferenz folgende zwei Bereiche:

- Höhendifferenz zwischen 0.00 und 0.70 m: Abminderung von L_s um den Faktor $k_{1,v}$ gemäss (32).
- Höhendifferenz über 0.70 m: Konstante Abminderung von L_s um den Faktor 0.72.

Die spezifische Leistungsfähigkeit eines ebenen Einstieges liegt demnach um rund 40 % über jener eines konventionellen Einstieges, wodurch sich die Fahrgastwechselzeit um etwa 30 % verkürzt.

3.33.3

Ergonomische Gestaltung

Die zwei verfügbaren Untersuchungen beziffern den Zeitmehrbedarf bei ungünstiger Treppengestaltung (unregelmässige Stufenfolge, steile Treppen) auf etwa 10 %. Die Ausstelgezellen für verschiedene Triebwagentypen der DB zeigten folgende Unterschiede:

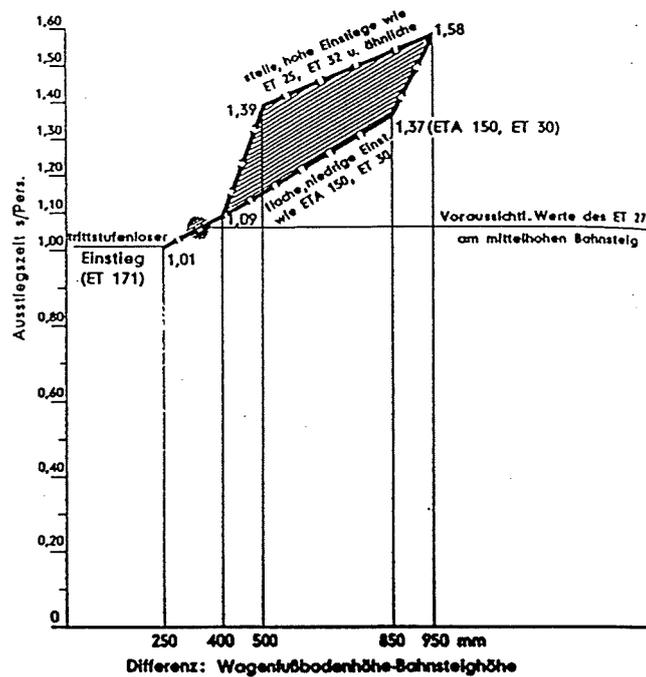


Abb. 86

Ausstiegszeiten von Triebwagentypen der DB mit verschiedenen Höhendifferenzen und Treppengestaltungen [112].

Die eigenen Beobachtungen am Doppelstockwagen der NS haben das zunächst widersprüchliche Resultat erbracht, dass die Fahrgastwechselzeiten bei kleiner Höhendifferenz höher waren als bei grosser Höhendifferenz. Ursache dafür ist die Einstiegsgestaltung: Bei einer Perronhöhe von 950 mm ergibt sich eine Kante von 30 mm zum Trittbrett, während die Stufe vom Trittbrett zum Wagenboden 203 mm misst. Der Bewegungsablauf wird dadurch gestört. Demgegenüber entstehen beim Perron 750 mm zwei gleichmässige Trittstufen von 230 mm und 203 mm. Dies bestätigt den ergonomisch bedingten Leistungsverlust von 10 %.

3.33.4

Spaltbreite

Eine Verzögerung des Fahrgastwechsels infolge eines Spaltes zwischen Fahrzeug und Perron tritt ein, wenn der Bewegungsablauf gestört wird und/oder wenn sich bei den Fahrgästen Angstgefühle einstellen. Unter etwa 50 bis 100 mm ist weder mit einer Verlangsamung des Fahrgastflusses zu rechnen, noch haben Gehbehinderte ernsthafte Schwierigkeiten. Überschreitet die Spaltbreite hingegen 200 mm, so verlängert sich die Fahrgastwechselzeit um mehr als 18 %. Besonders ungünstig wirkt sich eine gleichzeitige Höhendifferenz aus.

3.4

Berechnung der Fahrgastwechselzeit an Einzeltüren

Die Abhängigkeiten von Türbelastung, Türbreite, Einstiegshöhe, Richtungsanteil und Türabstand lassen sich zu gesamthafter Beziehungen zusammenfassen. Für Türabstände unter 10 m gilt:

$$(33) \quad L_s = \frac{(0.756 \cdot F + 0.114 \cdot A) \cdot (0.961 - 0.388 \cdot l_{T,v})}{F^{0.955} \cdot l_{T,b}^{0.045}}$$

wobei L_s Spezifische Türleistungsfähigkeit [P/sm]
 F Fahrgastwechselzahl [P]
 A Anzahl der Aussteiger an der Türe [P]
 $l_{T,v}$ Höhendifferenz des Einstieges [m]
 $l_{T,b}$ Lichte Türbreite [m]

Entsprechend lautet die Bezeichnung für Türabstände über 10 m:

$$(34) \quad L_s = \frac{(0.472 \cdot F + 0.071 \cdot A) \cdot (0.961 - 0.388 \cdot l_{T,v})}{F^{0.835} \cdot l_{T,b}^{0.165}}$$

Die Fahrgastwechselzeit bei Türabständen unter 10 m beträgt:

$$(35) \quad t_{h,f} = \frac{F^{1.955}}{l_{T,b}^{0.955} \cdot (0.756 \cdot F + 0.114 \cdot A) \cdot (0.961 - 0.388 \cdot l_{T,v})}$$

wobei $t_{h,f}$ Fahrgastwechselzeit an einer Türe [s]

Der analoge Ausdruck bei Türabständen von über 10 m wird zu:

$$(36) \quad t_{h,f} = \frac{F^{1.835}}{l_{T,b}^{0.835} \cdot (0.472 \cdot F + 0.071 \cdot A) \cdot (0.961 - 0.388 \cdot l_{T,v})}$$

4 Die Fahrgastwechselzeit eines Kurses

4.1 Modelle und Einflussgrößen 4.11 Die Fahrgastwechselzeit als deterministische Grösse

Der Kurs ist eine Betriebseinheit und besteht aus einem Einzelfahrzeug oder einer Fahrzeuggruppe. Die beim Fahrgastwechsel eines Kurses beteiligten Elemente der Anlagen und des Fahrzeuges lassen sich in Speicher und Durchgänge unterteilen:

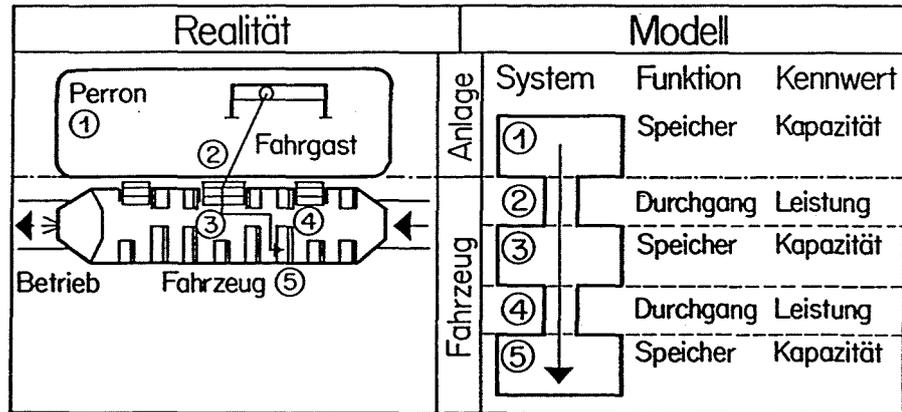


Abb. 87

Systemkomponenten, welche den Fahrgastwechsel betreffen oder vom Fahrgastwechsel betroffen sind.

Ein Kurs besitzt folgende nominelle Türleistungsfähigkeit:

$$(37) \quad L_{T,K} = \sum L_{T,i}$$

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

Unterläge der Fahrgastwechsel an den einzelnen Türen keinen Streuungen und würden sich die Fahrgäste proportional zur Leistungsfähigkeit auf die Türen verteilen, so wäre das Einstiegssystem vollkommen gleichmässig ausgelastet und die Fahrgastwechselzeit würde sich folgendermassen errechnen:

$$(38) \quad t_{h,f} = \frac{F_i}{L_{T,i}} = \frac{F}{L_{T,K}}$$

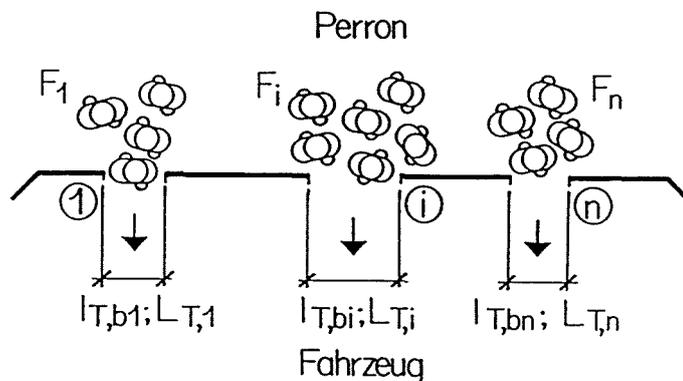


Abb. 88

Einfachstes Modell des Fahrgastwechsels eines Kurses. Die Fahrgäste verteilen sich entsprechend der jeweiligen Türleistungsfähigkeit auf die Einstiege des Kurses.

Mit der Fahrgastwechselzahl F kann dann die relative Türbelastung $Q_{T,rel}$ als Vergleichswert für die Beanspruchung verschiedener Türsysteme ermittelt werden. Je höher $Q_{T,rel}$ ist, desto grösser wird auch die Fahrgastwechselzeit ausfallen.

4.12

Die Fahrgastwechselzeit als stochastische Grösse

Die Fahrgastwechselzeit eines Kurses ist indessen das Ergebnis parallel ablaufender Prozesse von zufallsverteilter Dauer, nämlich der stochastischen Fahrgastwechsel an den einzelnen Türen. Die am längsten geöffnete Türe ist deshalb nicht in jedem Fall die statistisch meistbelastete und die effektive Türleistungsfähigkeit liegt unter der theoretischen. Zudem entstehen Ungleichmässigkeiten in der Türbenützung durch:

- Lage der Zugänge wie Fussgängerstreifen, Treppen, Lifts, Abschrankungen 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.

Die Fahrgastwechselzeit eines Kurses lässt sich unter folgenden Voraussetzungen mit den Verteilungsfunktionen der einzelnen Türen ausdrücken:

- Der Fahrgastwechsel beginnt an jeder Türe gleichzeitig.
- Alle Fahrgäste benützen immer die nächstliegende Türe.
- Die Fahrgastwechselforgänge an den einzelnen Türen sind stochastisch unabhängig.

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Öffnungszeit des Türsystems den Wert τ nicht übersteigt, ist gleich der Wahrscheinlichkeit, dass sie an jeder einzelnen Türe kleiner als τ ist. Durch die vorausgesetzte Unabhängigkeit der Türen lautet die Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses:

$$(39) \quad P_K(\tau) = \prod_{i=1}^{i=n_{T,K}} \frac{F_i}{l_{T,bi}} \cdot P_{T,i}(\tau)$$

wobei $P_K(\tau)$ Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzeit eines Kurses [s]
 $P_{T,i}(\tau)$ Verteilungsfunktion der spezifischen Fahrgastwechselzeit der Türe i [s]
 $n_{T,K}$ Zahl der Türen des Kurses [-]

$P_K(\tau)$ lässt sich auch als Produkt der Integrale über die Dichten ausdrücken:

$$(40) \quad P_K(\tau) = \prod_{i=1}^{i=n_{T,K}} \frac{F_i}{l_{T,bi}} \int_{-\infty}^{\tau} p_{T,i}(x) dx$$

wobei $p_{T,i}(x)$ Dichte der spezifischen Fahrgastwechselzeit der Türe i [-]

Der Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit eines Kurses lautet damit:

$$(41) \quad t_{h,f} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot \left(\frac{d}{dx} \prod_{i=1}^{i=n_{T,K}} \frac{F_i}{l_{T,bi}} P_{T,i}(x) \right) dx$$

wobei $t_{h,f}$ Fahrgastwechselzeit eines Kurses [s]

4.13

Überblick über die Einflussgrößen

Die im praktischen Betrieb erzielte Leistungsfähigkeit des Türsystems wird zunächst durch den Erwartungswert und die Streuung an jeder Türe bestimmt. Hinzu kommen das Verhalten der Fahrgäste, die Anordnung der Türen des Fahrzeuges sowie die Innenraumgestaltung und schliesslich die Anlagengestaltung.

Tab. 11

Einflussfaktoren auf die mittlere Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses.

Eigenschaften der Fahrgäste, Ablauf des Fahrgastwechsels	Fahrzeuggestaltung	Anlagengestaltung
Erwartungswert an Einzeltüre Streuung an Einzeltüre Ganzzahligkeit des Fahrgastwechsels 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 Fassungsvermögens auf die Türleistungsfähigkeit Unterscheidung 1./2. Klasse Vorschriften für Türbenützung Innenraumaufteilung Abflussmöglichkeiten	Grösse der Warteraumfläche Ort der Zugänge des Perrons Ausstattung des Perrons

- eingesetzte Rollmaterial, weshalb die Türverteilung einen Einfluss auf den Aufenthaltsort der Fahrgäste auf dem Perron hat (8.2).*
9. *Wenn den Fahrgästen der Standort der 1. beziehungsweise 2. Klasse im Voraus bekanntgegeben wird, führt dies zu einer bestimmten Fahrgastverteilung auf dem Perron (9.1).*
 10. *Durch eine Einschränkung der Benützbarkeit von Fahrzeugtüren wird die Fahrgastverteilung im Fahrzeug gesteuert (10.1). Ist den auf dem Perron wartenden Fahrgästen der Ort der mit einer Restriktion belegten Türe nicht bekannt, so müssen sie nach Einfahrt des Kurses auf andere Türen auszuweichen (10.2).*
 11. *Die Stauraumgrösse beeinflusst die Bewegungsmöglichkeiten der Fahrgäste im Türbereich sowie die Zahl der Fahrgäste, welche ohne Rückstaugefahr das Fahrzeug betreten können. Dadurch wird der Erwartungswert mitbestimmt (11.1).*
 12. *In ähnlicher Weise verändert sich die Rückstaugefahr im Fahrzeug mit den Abflussverhältnissen (12.1).*
 13. *Die Fahrgäste verweilen tendenziell in der Nähe der Perronzugänge, womit die Fahrgastverteilung auf dem Perron gesteuert wird (13.1).*
 14. *Der Fahrgastwechsel wird durch kleine Warteplatzflächen auf dem Perron behindert (14.1). Die Fahrgäste suchen sich zudem einen Ort mit nicht zu grosser Personendichte aus (14.2).*
 15. *Ausstattungsgegenstände 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 dadurch eine zufällig untypische Fahrgastverteilung zustandekommen (15.2).*
 16. *Die Fahrgastwechselzahl bestimmt die Belastung der Fahrzeugtüren und beeinflusst damit deren spezifische Leistungsfähigkeit (16.1).*

Selbst bei gegebener Fahrgastwechselzahl 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 parallelen Prozesse eine Zufallsgrösse.

Besonders gross ist die Streuung, wenn die Fahrgastwechselzahl klein ist und die Türwahl durch jeden einzelnen Fahrgast ein grosses Gewicht erhält.

4.2

4.21

Erwartungswert und Streuung **Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse**

Da die spezifische Leistungsfähigkeit der Türen mit wachsender Belastung ansteigt und gleichzeitig die Ganzzahligkeit des Fahrgastwechsels weniger spürbar ist, nimmt die Fahrgastwechselzeit eines Kurses unterproportional zur Fahrgastwechselzahl zu:

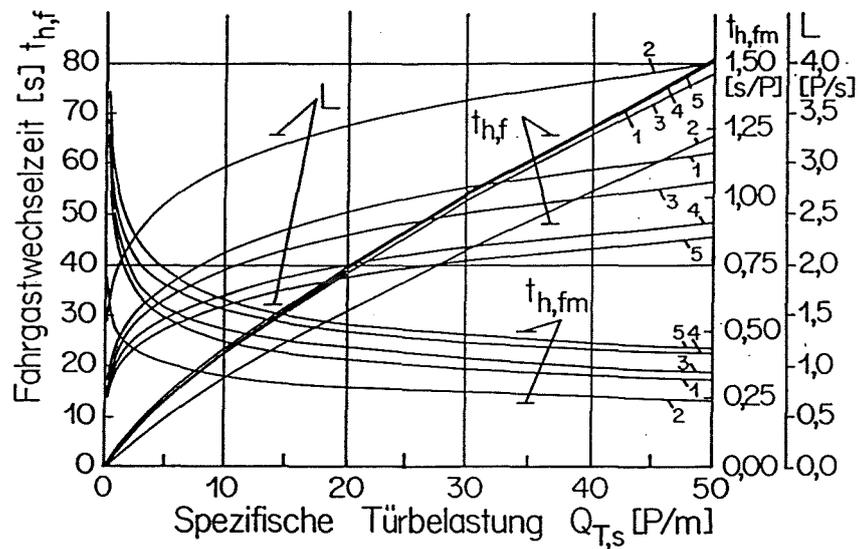


Abb. 90

Fahrgastwechselzeit, mittlere Fahrgastwechselzeit und effektive Türleistungsfähigkeit in Funktion der spezifischen Türbelastung. 1 = TPG Genf, Niederflurtram Be 4/6; 2 = SE-MITAG Grenoble, Niederflurtram; 3 = BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 911 ff.; 4 = BVB Basel, Gelenktrolleybus Serie 921 f.; 5 = MAN, Niederflur-Gelenkbus NG 272.

Ersterer Einfluss wird mittels den $L_{s,i}$ der Einzeltüren berücksichtigt. Zur Erfassung der Ganzzahligkeit konnte mittels ACoST.NeXT eine standardisierte Kurve des Ausschöpfungsgrades aufgestellt werden:

$$(42) \quad q_{K,L} = 0.8275 \cdot Q_{T,s}^{0.0484}$$

wobei $q_{K,L}$ Standardisierter Ausschöpfungsgrad der Leistungsfähigkeit des Türsystems, bezogen auf die Leistungsfähigkeit bei einer spezifischen Türbelastung von $Q_{T,s}$ [-]

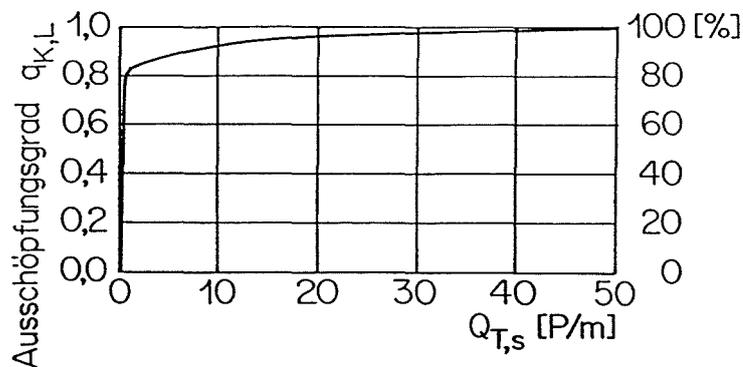


Abb. 91

Standardisierter Ausschöpfungsgrad der Türleistungsfähigkeit $q_{K,L}$, bezogen auf die nominelle Leistungsfähigkeit bei Türbelastung $Q_{T,s}$.

4.22

Streuung der Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse

Als Verteilungsfunktionen der Fahrgastwechselzeit werden die Standardverteilung und die Erlang-k-Verteilung angegeben. Die Messungen an den Strassenbahnen Genf und Grenoble sowie an den Gelenkbussen in Basel zeigten eine schiefe Dichte der mittleren Fahrgastwechselzeit sowie eine nahezu symmetrische Dichte der effektiven Leistungsfähigkeit.

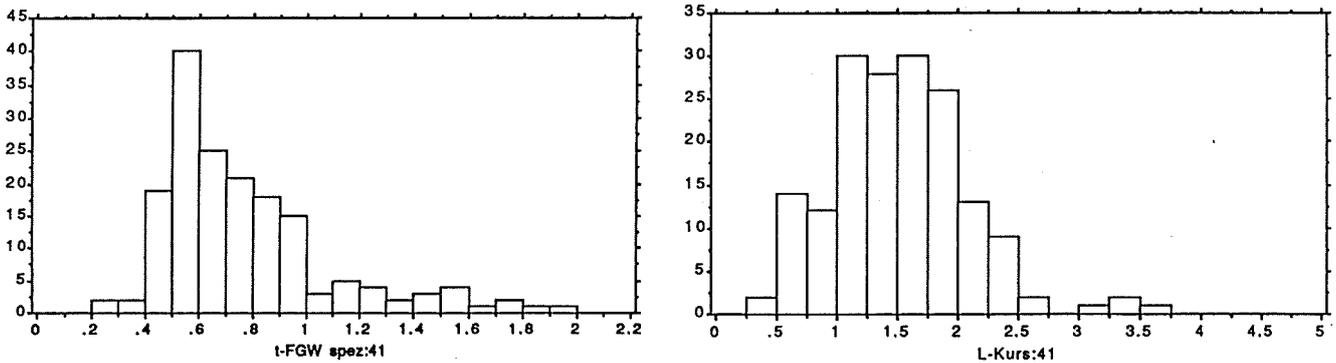


Abb. 92

Beispiel für die Dichte der mittleren Fahrgastwechselzeit der Kurse (links) und der effektiven Leistungsfähigkeit des Türsystems (rechts), Be 4/6 TPG Genf.

Die Literatur nennt eine Standardabweichung von 36 % für den Haltevorgang, umfassend auch die festen Haltezeitanteile. Bei den eigenen Messungen liess sich die Standardabweichung der mittleren Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse und der effektiven Türleistungsfähigkeit folgendermassen bestimmen:

Tab. 12

Standardabweichungen der mittleren Fahrgastwechselzeit $\sigma_{h,fm}$ und Türleistungsfähigkeit ganzer Kurse $\sigma_{L'}$ 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 streuten die mittleren Fahrgastwechselzeiten um 48 % und die effektiven Türleistungsfähigkeiten um 39 % des Erwartungswertes.

4.3
4.31

**Abhängigkeit von den Einflussfaktoren
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 des Türsystems. Der Erwartungswert ist aber auch umso tiefer, je grösser die Streuungen an den einzelnen Türen sind. Zur Quantifizierung wurde die Fahrgastwechselzeit von Kursen mit 1 bis 40 Türen mittels des Programmes ACoST.NeXT errechnet. Es konnte eine folgende Abhängigkeit zwischen der Standardabweichung an den einzelnen Türen und dem Wirkungsgrad abgeleitet werden:

$$(43) \quad q_{K,n\sigma} = n_{T,K}^{(-0.4163+0.0398 \cdot \sigma_{L,s} - 0.0013 \cdot \sigma_{L,s}^2)}$$

wobei $q_{K,n\sigma}$ Wirkungsgrad des Türsystems in Funktion der Türzahl und der Standardabweichung der spezifischen Leistungsfähigkeit der Türen [-]
 $n_{T,K}$ Türzahl des Kurses [-]

Da die Streuung eine Funktion der Türbreite ist, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Türbreite und Wirkungsgrad:

$$(44) \quad q_{K,nb} = n_{T,K}^{(0.2407 - 0.5464 \cdot l_{T,b} + 0.0722 \cdot l_{T,b}^2)}$$

wobei $q_{K,nb}$ Wirkungsgrad des Türsystems in Funktion der Türzahl und Türbreite [-]

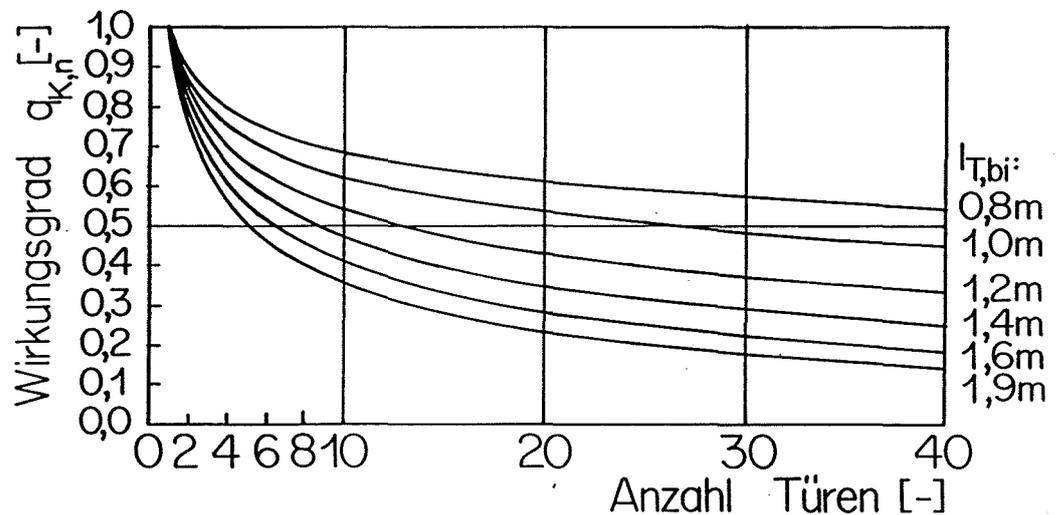


Abb. 93

Wirkungsgrad des Türsystems in Funktion der Türzahl und der Türbreite.

Diese Formeln gelten streng betrachtet nur für Kurse mit identischen Türen. Bei unterschiedlichen Türbreiten sind Durchschnittswerte anzuwenden.

4.32

Einfluss der Ungleichförmigkeit der Türbelastung

4.32.1

Definition der Ungleichförmigkeit

Das Türsystem ist ungleichförmig belastet, wenn sich der Fahrgaststrom nicht proportional zur Leistungsfähigkeit auf die Türen verteilt. Ursachen dafür sind:

- Türverteilung am Fahrzeug
- Besondere Auswahlkriterien für die Benützung der Türen
- Fahrgastverteilung auf dem Perron
- Fahrgastverteilung im Fahrzeug

Der Quotient $q_{U,T}$ nennt die Grösse der Ungleichförmigkeit:

$$(45) \quad q_{U,T} = \frac{Q_{T,rel\ max}}{Q_{T,rel}}$$

wobei $q_{U,T}$ Ungleichförmigkeitsmass der Türbelastung [-]
 $Q_{T,rel\ max}$ Maximale relative Türbelastung eines Kurses [s]

Verteilt sich der Fahrgastwechsel im Verhältnis zur Türlistungsfähigkeit auf die Durchgänge, so ist $q_{U,T} = 1$ und die Fahrgastwechselzeit ist minimal. Sind alle Türen gleich leistungsfähig, so verlangt dies eine gleichmässige Türverteilung. Umgekehrt muss eine ungleichmässige Türverteilung mit einer Anpassung der Türlistungsfähigkeit berücksichtigt werden.

4.32.2

Türverteilung am Fahrzeug

Allgemein bildet die Mitte zwischen zwei Türachsen die Grenze der Einzugsgebiete, was die eigenen Untersuchungen weitgehend bestätigten. Unregelmässige Türverteilungen führen damit direkt zu einer unausgewogenen Türbelastung, wobei namentlich folgende Fälle zu erwähnen sind:

- Vollbahnen: Vollbahnzüge werden aus Fahrzeugen ähnlicher Bauart gebildet, sodass die Türbelastung weitgehend gleichförmig ist. Abweichungen treten auf, wenn Fahrzeuge eingereiht werden, welche den Reisenden nicht zugänglich sind (Lokomotiven, Gepäckwagen) oder wenn einzelne Fahrzeuge über keine Aussentüren verfügen (Spelawagen).
- Stadt- und Strassenbahnen: Bei Stadt- und Strassenbahnen treten Ungleichförmigkeiten vorwiegend infolge des jeweiligen Fahrzeug- und Abfertigungskonzeptes auf. Insbesondere bei Niederflurfahrzeugen ist die Türanordnung und teilweise die Türzahl mit der Wahl des Fahrwerks- und Antriebssystems weitgehend gegeben.
- Autobusse: Bei Autobussen sind grössere Ungleichförmigkeiten praktisch unvermeidlich, bedingt durch die Fahrwerke, durch die für den Fahrausweisverkauf erforderliche Türe beim Fahrer sowie durch die Niederflurtechnik.

Bei Gleichverteilung der Fahrgäste auf dem Perron lässt sich die Qualität der Türverteilung somit einfach bestimmen, indem das Verhältnis zwischen den Türeinzugsgebieten und den zugehörigen Leistungsfähigkeiten betrachtet wird.

4.32.3

Besondere Auswahlkriterien für die Benützung der Türen

Sind alle Türen gleichwertig und sind die Platzverhältnisse im Fahrzeug gut, so haben die Fahrgäste keinen Anlass, eine andere als die nächstliegende Türe zu benützen. Vielfältige Kriterien führen indessen zu einem abweichenden Verhalten:

1. Bestimmte Türen sind mit Benützungsrestriktionen belegt.
2. Die Türen können sich baulich unterscheiden.
3. Bestimmte Türen führen in Sonderabteile. Da das Durchqueren eines Fahrzeuges während der Fahrt unangenehm oder sogar unmöglich ist, besteigen die Fahrgäste in der Regel direkt das gewünschte Abteil. Eine Fahrgastbeobachtung bei Gelenktrolleybussen in Luzern hat zusätzlich gezeigt, dass ältere Fahrgäste gerne die zweite Türe im Vorderwagen benützen, während Jugendliche den Nachläufer bevorzugen.
4. Bei starken Fahrgastwechseln oder bei hoher Fahrzeugbesetzung entstehen Rückstauerscheinungen. Ein Teil der Fahrgäste weicht auf benachbarte Türen aus. Das Ausweichen bleibt allerdings schwach, weil die Fahrgäste befürchten, dass sich die Türe vor ihnen schliesst.
5. Ein Teil der Fahrgäste sucht sich die Türe bereits im Hinblick auf die Zielhaltestelle aus. Bestimmend ist die Systemkenntnis: Je besser diese ist, desto weniger lassen sie sich von den Verhältnissen an der Abgangshaltestelle leiten. Vor allem Haltepunkte von Hauptbahnen, S-Bahnen oder U-Bahnen

welsen nur wenige definierte Zugänge auf und das Zurücklegen der Fusswege im Haltestellenbereich nimmt eine beträchtliche Zeit in Anspruch. Da der Fahrgast seine Reisezeit zu minimieren strebt, will er auch diesen Zeitaufwand klein halten. Einen wesentlichen Zeitgewinn erzielt er durch das Benützen einer Einstiegstüre, welche dem Abgang der Zielhaltestelle nahe liegt. Rund 63 % der Fahrgäste von S-Bahn-Systemen verhalten sich deshalb in dieser Weise, während nur 13 % eine Türe in der Nähe des Zuganges der Abfahrthaltestelle benützen.

Tab. 13

Fahrgastverteilung in S-Bahn-Zügen und Gründe für die Wahl des Einstiegspunktes [29].

Zeil -le	Verknüpfungs- punkt	Lage und Anzahl der Treppen für die Um- steiger am Verknüp- fungspunkt 1)	Umsteige- beziehung	Einstieg bzw. Ausstieg am Verknüpfungspunkt (% der Umsteiger)			Gründe für die Wahl des Einstiegs- punktes in den Zug (% der Umsteiger)		
				Zug- spitze	Zug- mitte	Zug- ende	Ausstieg an der Treppe der Zielhaltestelle	Einstieg an der Treppe der Starthaltestelle	Son- sti- ges 2)
o	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Hamburg Wandsbek Markt (Bild III/6)	1 Treppe Bahn- steigende	Bus/U-Bahn	32	31	37	3)	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/Schnell- bahn	22	50	26	82	4	10
8			Schnellbahn/ Bus	35	40	18	75	5	10
9	Frankfurt Nord- weststadt-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 MGckernbrücke (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-Marien- dorf (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 Maasha- ven (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

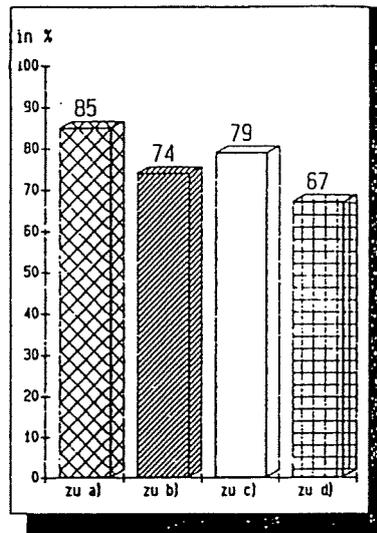
Anmerkungen:

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.

6. Ein - kleiner - Teil der Fahrgäste wählt eine Türe, welche in wenig besetzte Zugsbereiche führt. Im Berufsverkehr verhalten sich etwa 10 bis 20 % der Fahrgäste in dieser Weise. Zu 85 % benützen die regelmässigen Fahrgäste des Berufs- und Schülerverkehrs immer denselben Zug und zu 74 % denselben Wagen, was auf eine grosse Bedeutung von Gewohnheiten schliessen lässt. In Schwachlastzeiten dagegen suchen sich die Fahrgäste bereits vor dem Einsteigen den besten Platz aus, wodurch die Haltezeit verlängert wird.



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. 94: Zugbezogene Nutzergewohnheiten im Regionalverkehr, Berufspendler und Schüler [38].

Bei vollkommener Freizügigkeit der Türbenützung entspricht der maximale Abstand von der Türachse $l_{i,max}$ der Hälfte des maximalen Abstandes zweier Türachsen beziehungsweise dem Zugangsweg am Fahrzeugende. Die Zuströmzeit t_g ist klein und die Zuströmfunktion steil. Bei Restriktionen in der Türbenützung hingegen können $l_{i,max}$ und t_g hohe Werte annehmen und die Zuströmfunktion verflacht.

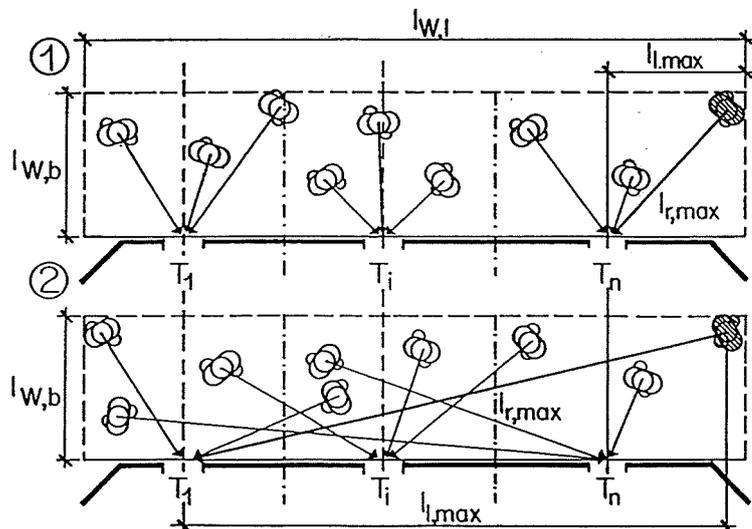


Abb. 95

Grenzwertbetrachtung bei der Türbenützung mit vollkommen freizügiger (oben) und vollkommen spezialisierter (unten) Türbenützung.

4.32.4

Fahrgastverteilung auf dem Perron

Kriterien für die Wahl des Aufenthaltsortes im Warteraum durch den Fahrgast sind etwa:

- Haltestellenzugänge
- Leiteinrichtungen und Markierungen
- Wetterschutzeinrichtungen
- Sitzplatzangebot auf dem Perron
- Ort von Informationseinrichtungen und Billettverkaufsstellen
- erwartetes Platzangebot des Kurses
- kurze Wege zu den Abgängen am Aussteigebahnhof

Die Fahrgäste konzentrieren sich demnach bei Einfachhaltestellen auch bei guter Witterung bei den Wartehallen. Bei Doppelhaltestellen ist eine Massierung in der Mitte des Perrons festzustellen, wenn den Fahrgästen der Halteort des Kurses nicht im Voraus angekündigt wird. Zu Fahrgastballungen führen zudem die Zugänge. Fahrgastkonzentrationen bilden sich bis zu jenem Dichtegrad, welcher von den Fahrgästen nicht mehr akzeptiert wird. Der Dichteverlauf lässt sich durch Linien gleicher Dichte darstellen:

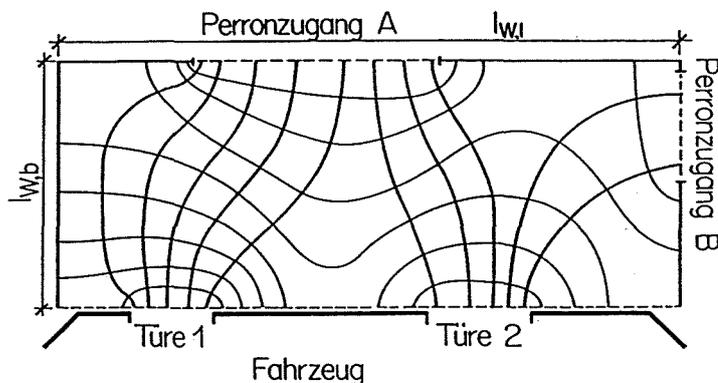


Abb. 96

Verteilung von Fahrgästen auf einer Haltestelle, dargestellt als Linien gleicher Dichte und Weg der Fahrgäste zur Einsteigtüre in Analogie zu Potentiallinien.

Massgebend für die Benützung der Türen ist - basierend auf der These des kürzesten Weges - die Längsdichte bezüglich der Haltekante.

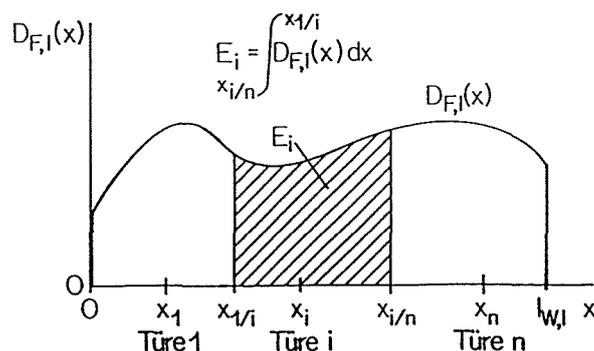


Abb. 97

Längsdichte der Fahrgäste entlang einer Haltekante, Einsteigerzahl der Türe i.

Die auftretenden Fahrgastlängsverteilungen lassen sich mit genügender Genauigkeit durch Standardfälle annähern. Ist eine Längsverteilung nicht mit einem der Grundtypen beschreibbar, so besteht die Möglichkeit der Überlagerung verschiedener Verteilungen.

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

Abb. 98

Typisierung der Längsdichten wartender Fahrgäste mit Extremwerten, analytischer Beschreibung und Gesamtzahl der Fahrgäste.

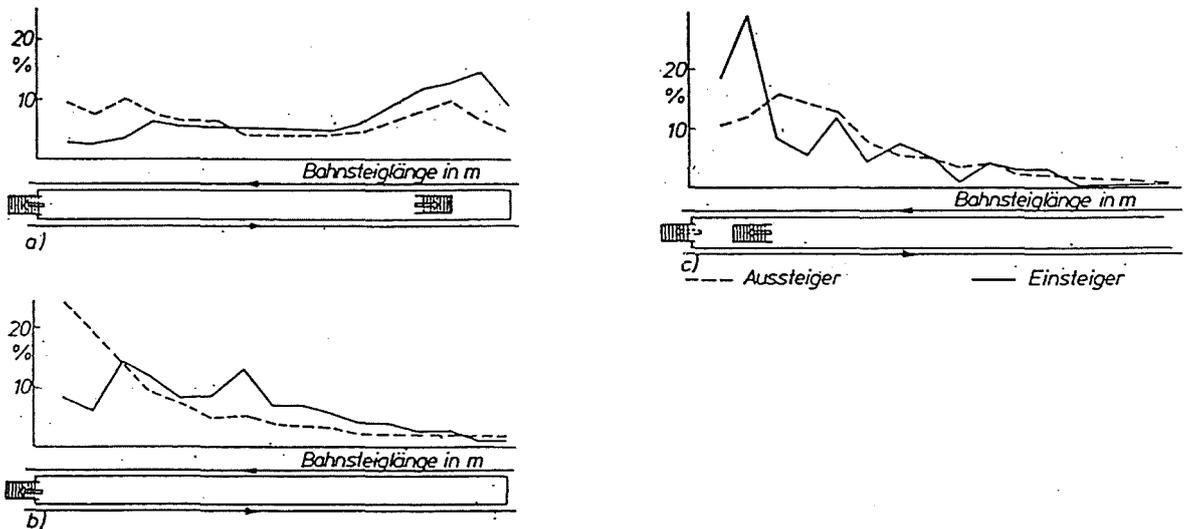


Abb. 99

Praktische Verteilung der Aus- und Einsteiger auf Perrons der Berliner S-Bahn; a) = Schöneweide Bahnsteig B; b) = Warschauer Strasse Bahnsteig B; c) = Jannowitzbrücke Richtung Friedrichstrasse [117].

Einen zusätzlichen Gesichtspunkt zeigten exemplarisch die Messungen an den Gelenkbussen in Basel. Hier wurde die hinterste Türe überproportional benützt, da der Warteraum meist mit dem Trottoir identisch war und sich der Aufenthaltsbereich der Fahrgäste über die Länge des Busses hinaus erstreckte und die Busfahrer ihr Fahrzeug tendenziell bis zum vordersten Fahrgast vorzogen.

4.32.5

Fahrgastverteilung im Fahrzeug

Die Fahrgastverteilung im Fahrzeug ist aus zweierlei Gründen von Belang:

1. Die Dichte der Fahrgäste im Türraum beeinflusst die Fahrgastwechselzeit.
2. Die Verteilung der Fahrgäste entscheidet über die Benützung der Türen.

Eine Ungleichförmigkeit der Türbelastung durch Aussteiger entsteht, wenn Fassungsvermögen und Türleistungsfähigkeit schlecht übereinstimmen. Ursachen dafür sind:

- Während ein Stehplatzfahrgast mit 0.17 m^2 Fläche auskommt, benötigt ein Sitzplatz bei Autobussen und Strassenbahnen 0.35 m^2 , in U- und S-Bahnen 0.45 m^2 und im Fernverkehr 0.55 m^2 .
- Die Attraktivität der Stehplatzbereiche unterscheidet sich je nach Zugänglichkeit. Mit Vorliebe verbleiben die Fahrgäste in Türnähe.

Bei der Wahl seines Aufenthaltsortes im Fahrzeug optimiert der Fahrgast seinen Gesamtkomfort. Es lassen sich zwei Fahrgastgruppen unterscheiden:

1. Gebrechliche und ältere Fahrgäste, welche zuwenig Kraft haben, um die Längs- und Querbewegungen beim Gehen und Stehen im fahrenden Kurs zu ertragen und deshalb auf einen Sitzplatz angewiesen sind.
2. Fahrgäste, welche in der Lage sind, sich längere Zeit stehend aufzuhalten.

Der Komfort für die letztere Gruppe bemisst sich, sieht man von Lärm, Temperatur und Durchzug ab, nach dem Energieverbrauch zur Erlangung des Platzes und für den Aufenthalt. Ersterer setzt sich aus jenem zur Überwindung von Horizontal- und Vertikaldistanzen zusammen und ist unabhängig von der Reiselänge. Der Energieaufwand für den Aufenthalt wächst mit der Reisedauer linear an, wobei jener beim Sitzen kleiner ist als beim Stehen. Sitzplätze sind deshalb qualitativ überlegen und je grösser die Aufenthaltszeit ist, desto mehr fällt diese Energieeinsparung ins Gewicht. Je kürzer sich ein Fahrgast im Fahrzeug aufhält, desto geringer ist seine Bereitschaft, den Türbereich zugunsten eines Sitzplatzes zu verlassen. Gemäss einer Untersuchung bei der Hamburger S-Bahn ziehen 7 % der Fahrgäste selbst bei einer Fahrtdauer von 10 Minuten einen Stehplatz dem Sitzplatz vor.

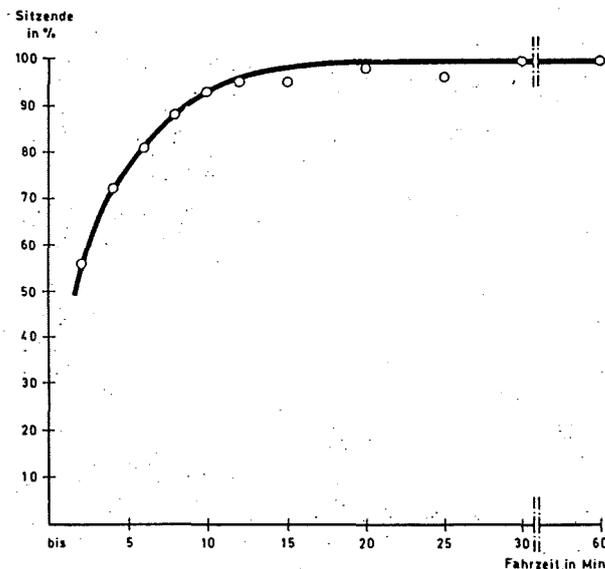


Abb. 100

Prozentanteil der sitzenden Fahrgäste in Abhängigkeit von der Fahrtdauer im Hamburger Schnellbahnverkehr [89].

Als Konsequenz lässt sich beobachten, dass sich die Fahrgäste im Fahrzeug nicht homogen verteilen, sondern sich auf die Einstiegsbereiche konzentrieren.

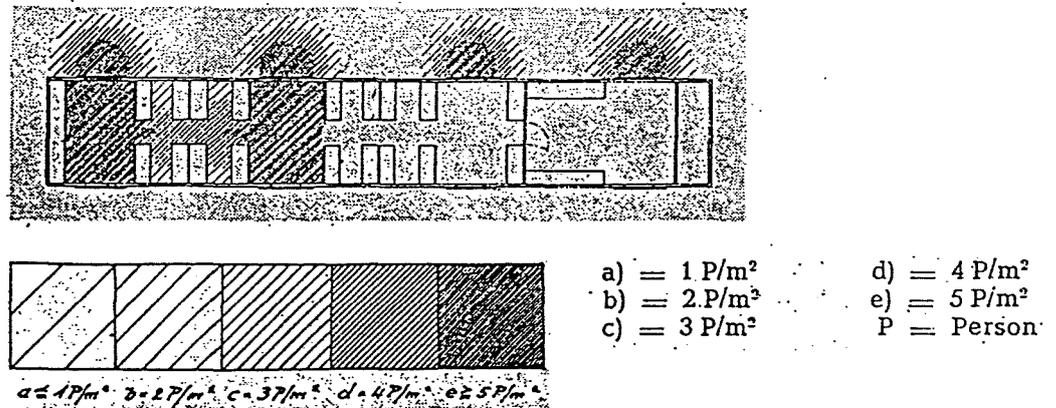


Abb. 101

Personendichte in einem S-Bahn-Wagen bei stärkstem Andrang [69].

Insgesamt ist bei grosser Auslastung mit der Vollbelegung der Sitzplätze zu rechnen. Bei den Stehplatzflächen ist zwischen den türnahen Stauräumen und den Gangflächen zu unterscheiden. Für die Türräume gilt:

(46)

$$D_{F,T} = 0.093 - 0.0093 \cdot q_K + 0.0012 \cdot q_K^2$$

wobei $D_{F,T}$ Fahrgastdichte im Türbereich [P/m^2]
 q_K Auslastungsgrad des Kurses, Basis 6 P/m^2 [%]

Die entsprechende Beziehung für Gangflächen lautet:

(47)

$$D_{F,G} = -3.8855 + 0.1235 \cdot q_K - 0.000577 \cdot q_K^2$$

wobei $D_{F,G}$ Fahrgastdichte in den Gangbereichen eines Fahrzeuges, ohne Sitzplätze, gültig für Fahrzeugauslastungen von über 38 % [P/m^2]

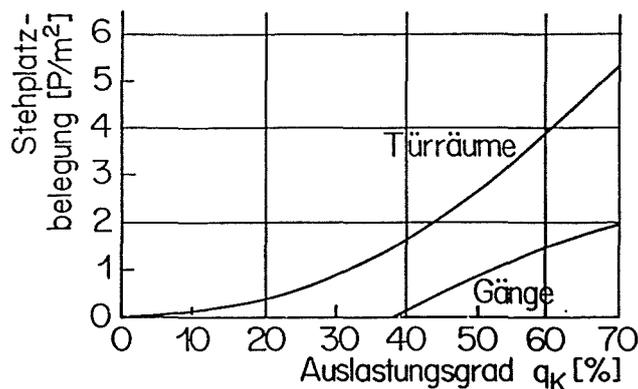


Abb. 102

Fahrgastdichte in den Türbereichen und Gangflächen in Abhängigkeit von der Auslastung des Kurses, gültig bis zu einer Fahrzeugauslastung von 70 % (Basis 6 P/m^2).

Dieses Verhaltensmuster zeigt sich auch bei der Dichte der Fahrgäste auf den beiden Geschossen von Doppelstockwagen, welche sich kaum voneinander unterscheidet, aber deutlich geringer als jene der Türräume ist:

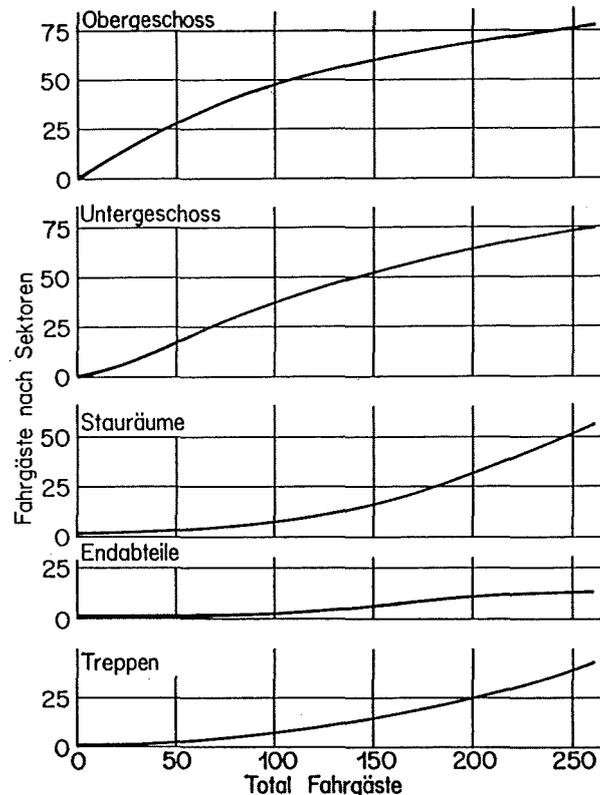


Abb. 103

Auslastung der Fahrzeugbereiche in Funktion der Gesamtfahrgastzahl beim Doppelstockwagen der NS im Einsatz auf der S-Bahn München; die leicht stärkere Auslastung des Obergeschosses kann auf den Neuigkeitswert des Fahrzeugtyps bei den Versuchsfahrten zurückgeführt werden.

Insgesamt bleibt der Fahrgastausgleich im Fahrzeug schwach:

- Fahrgäste empfinden eine kleine Überbelegung nicht als derart gravierend, dass sie deswegen ihren Platz wechseln würden.
- Jene Fahrgäste behalten ihren Platz bei, welche sich bereits vor der Überfüllung im Fahrzeug befanden.
- Oft fehlt die Kenntnis von freien Plätzen in einem anderen Teil des Kurses.
- Bei Überfüllung ist es kaum möglich, einen anderen Teil des Fahrzeuges aufzusuchen.
- Bei vielen Nahverkehrsfahrzeugen fehlen Übergangseinrichtungen.

Eine andere als die nächstliegende Türe wird deshalb nur selten gewählt und das geometrische Einzugsgebiet der Türen stellt auch für die Aussteigeranteile eine gute Berechnungsbasis dar.

4.32.6

Verlängerung der Fahrgastwechselzeit infolge einer Ungleichförmigkeit

Bezüglich der Verlängerung der Fahrgastwechselzeit in Funktion von $q_{U,T}$ wurde mittels ACoST.NeXT eine Anzahl repräsentativer Fälle mit folgendem Resultat durchgerechnet:

(47)

$$k_{U,T} = 1.0438 - 0.3259 \cdot q_{U,T} + 0.2705 \cdot q_{U,T}^2$$

wobei $k_{U,T}$ Zuschlagfaktor zur Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses bei ungleichförmiger Belastung des Türsystems [-]

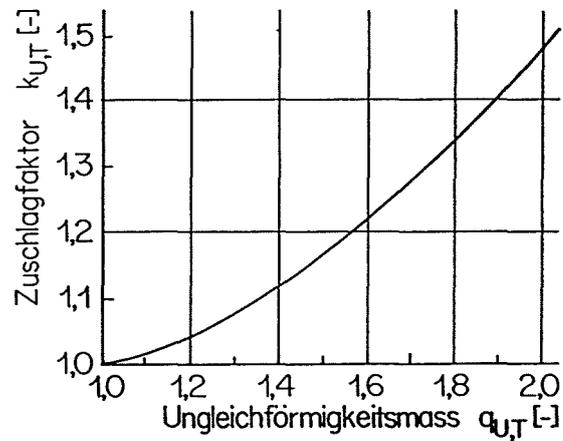


Abb. 104

Zuschlagfaktor zur Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses bei ungleichförmiger Belastung des Türsystems.

Die Zahl der Türen hat keinen Einfluss auf diese Beziehung.

4.4

Berechnung der Fahrgastwechselzeit eines Kurses

Die Berechnung der Fahrgastwechselzeit eines ganzen Kurses hat somit die Fahrgastwechselzahl, die theoretische Türleistungsfähigkeit, die Türbelastung, die Türzahl, die Türbreite und die Ungleichförmigkeit der Türbelastung zu berücksichtigen:

$$(48) \quad t_{h,f} = \frac{F}{\sum l_{T,bi} \cdot L_{s,i}} \cdot \frac{k_{U,T} \cdot k_D}{q_{K,L} \cdot q_{K,nb}}$$

5 Die Fahrgastwechselzeit einer Fahrt

5.1 Modell und Einflussgrößen

5.1.1 Fahrgastwechselzeit bei konstanter Türleistungsfähigkeit

Wäre die mittlere Fahrgastwechselzeit eines Kurses von der Grösse des Fahrgastwechsels unabhängig, so wäre die Fahrgastwechselzeit einer Fahrt eine lineare Funktion der Gesamtfahrgastwechselzahl:

$$(49) \quad t_{h,ftot} = \frac{F_{tot}}{L_{T,K}}$$

wobei $t_{h,ftot}$ Gesamte Fahrgastwechselzeit zwischen zwei Endstationen [s]

5.1.2 Fahrgastwechselzeit bei variabler Türleistungsfähigkeit

Aus den dargestellten Gründen ist obige Beziehung sehr ungenau. Vielmehr muss die Fahrgastwechselzeit für jede Haltestelle einzeln bestimmt und anschliessend aufsummiert werden:

$$(50) \quad t_{h,ftot} = \sum_{i=1}^{i=n_H} t_{h,fi} = \sum_{i=1}^{i=n_H} \frac{F_i}{L'_{T,Ki}}$$

wobei $L'_{T,Ki}$ Effektive Türleistungsfähigkeit des Kurses bei Fahrgastwechselzahl F_i an der Haltestelle i [P/s]
 n_H Zahl der Haltestellen [-]

Zusätzlich zu den bisherigen Erkenntnissen sind somit detaillierte Informationen zu den Fahrgastwechselzahlen während einer Fahrt erforderlich, welche folgendermassen gewonnen werden können:

- Erhebungen
- Verkehrsmodelle
- Statistische Überlegungen

5.1.3 Einflüsse auf die Fahrgastwechselzahl einer Fahrt

5.1.3.1 Überblick über die Einflüsse

Die Einflüsse auf das Fahrgastaufkommen zählen nicht zum engeren Themenbereich der vorliegenden Untersuchung und werden daher nur gestreift. Im wesentlichen lassen sich drei Gruppen unterscheiden:

1. Tageszeit: Die Tageszeit bestimmt die Ganglinie des Verkehrsaufkommens und die Bedeutung der Reisezwecke. Die Ganglinie kommt zustande durch:
 - Die Aktivitäten des Menschen verändern sich im Tagesverlauf.
 - Der Modal Split des öffentlichen Verkehrs unterscheidet sich nach Verkehrszweck. Besonders hoch ist er beim Pendlerverkehr, wodurch die Tagesganglinie zusätzlich überhöht wird.

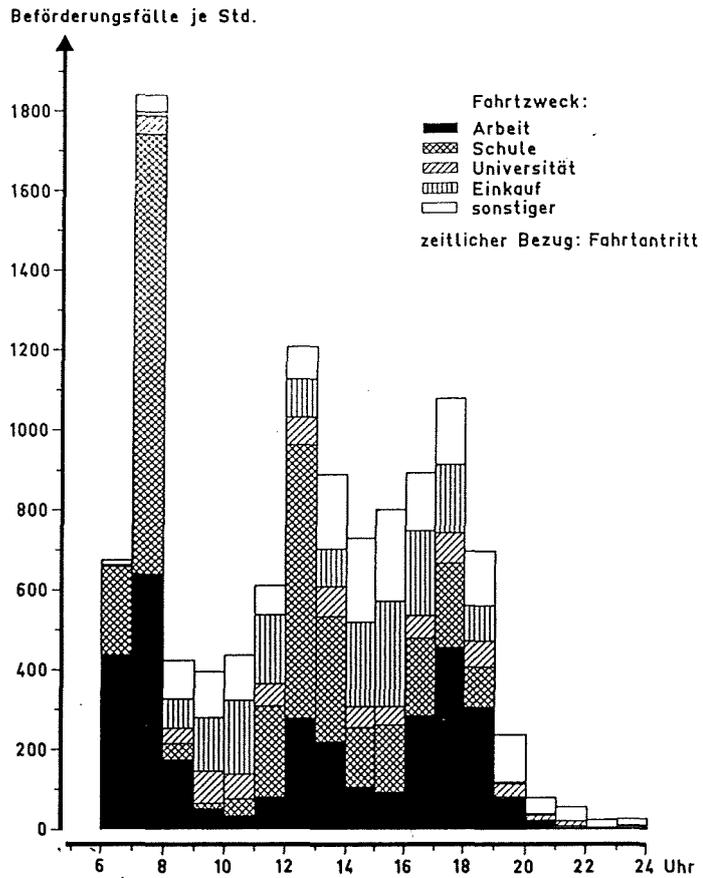


Abb. 105: Tagesganglinie des Verkehrsaufkommens im öffentlichen Verkehr nach Verkehrszweck [84].

Die Netzbelastung zeigt je eine Spitze am Morgen und Abend. Hinzu kommt ein kleines Maximum am frühen Nachmittag. In der Morgenspitzenstunde werden in Lastichtung über 25 % der täglichen Verkehrsmenge befördert, in der Spitzenviertelstunde allein 8 %.

Prozentanteile der Fahrgäste / Stunde am Tagesverkehrsaufkommen

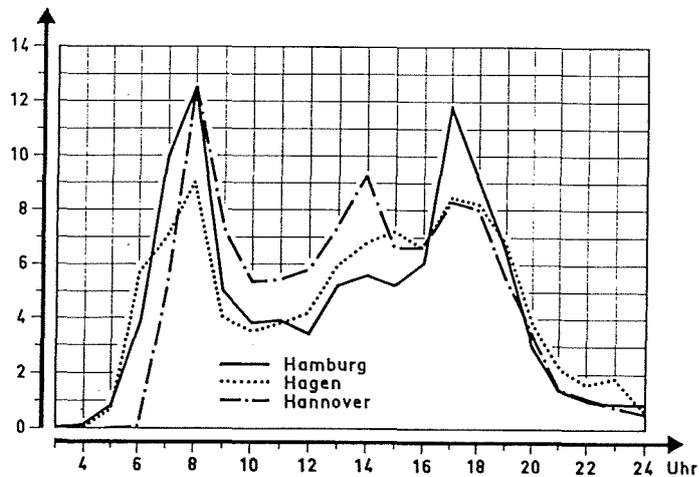


Abb. 106: Tagesganglinie des Verkehrsaufkommens bei der Hamburger S-Bahn am Hauptbahnhof Hamburg; Viertelstundenanteile des täglichen Verkehrsaufkommens [64].

2. Charakteristiken des durchfahrenen Gebietes: Das bediente Gebiet kennzeichnet sich durch seine Bevölkerungs- und Arbeitsplatzdichte, die Bevölkerungsstruktur sowie die Qualität der Haltestellenerschliessung, womit die Grösse des Verkehrsaufkommens, der Fahrgastmix und der Mix der Verkehrszwecke beeinflusst werden.
3. Funktion der Verkehrslinie: Die Funktionszuweisung ist ein Parameter für die Häufigkeit von Fahrgastwechsellvorgängen.

5.13.2

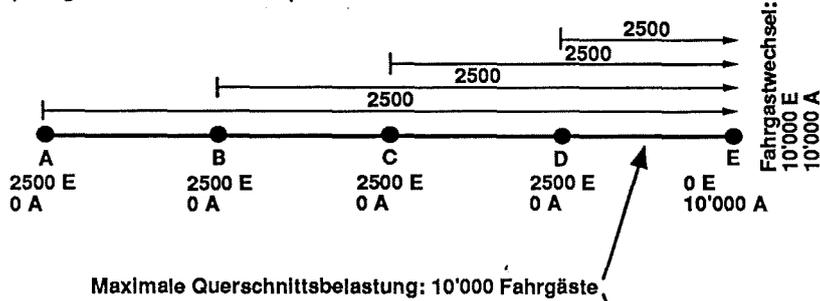
Insbesondere Funktion der Verkehrslinie

Im vorliegenden Zusammenhang wird nur der Einfluss der Funktionszuweisung detaillierter beleuchtet. Je grösser nämlich der Anteil der Kurzstreckenfahrergäste ist, desto grösser ist der Fahrgastwechsel bei gleicher Querschnittsbelastung. Es lassen sich folgende Hauptfunktionen unterscheiden:

- Sammelfunktion: Eine Verkehrslinie mit Sammelfunktion sammelt Fahrgäste und befördert sie ins Stadtzentrum oder zu einem wichtigen Umsteigepunkt. Unterwegs steigen in Richtung der Hauptstation nur Fahrgäste ein, nicht aber aus.
- Verteilerfunktion: Eine Verkehrslinie mit Verteilerfunktion stellt die Erschliessung eines Gebietes sicher. An jeder Haltestelle besteigen und verlassen Fahrgäste den Kurs. Der Anteil der Kurzstreckenfahrergäste ist hoch.

Sammelfunktion

(wenig Kurzstreckenverkehr)



Verteilerfunktion

(viel Kurzstreckenverkehr)

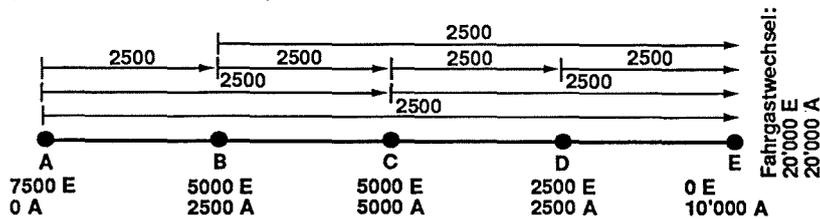


Abb. 107

Prinzipieller Zusammenhang zwischen Verkehrsfunktion, maximaler Querschnittsbelastung und Grösse des Fahrgastwechsels. Oben: Sammelfunktion, kleiner Fahrgastwechsel. Unten: Verteilerfunktion, grosser Fahrgastwechsel.

In der Folge weist eine Verteilerlinie bei gleicher maximaler Querschnittsbelastung deutlich längere Fahrgastwechselzeiten auf als eine Sammellinie. Wird eine Linie mit hohem Kurzstreckenanteil durch leistungsfähige Parallelverkehrsmittel vom Kurzstreckenverkehr entlastet, so lassen sich Fahrgastwechselzeit und Streckenbelegung bei gleicher Querschnittsbelastung verkürzen und damit die Streckenleistungsfähigkeit anheben. Im Normalfall überlagern sich die beiden Funktionen mit unterschiedlichem Gewicht.

5.13.3

Fahrtweiten als Mass für die Fahrgastwechselzahlen

Bei gegebener Verkehrsleistung ist die Fahrtweitenverteilung ein Mass für den Fahrgastwechsel. Bereits 1889 stellte Lill sein Fahrtlängengesetz auf, welches den Gravitationsansatz begründete. Die einfache Fahrtlängenverteilung nach Lill gilt nicht, wenn eine reiselängenspezifische Konkurrenz durch andere Verkehrsmittel besteht, namentlich im Langstreckenbereich durch den Flugverkehr und im Nahverkehr durch das Velo.

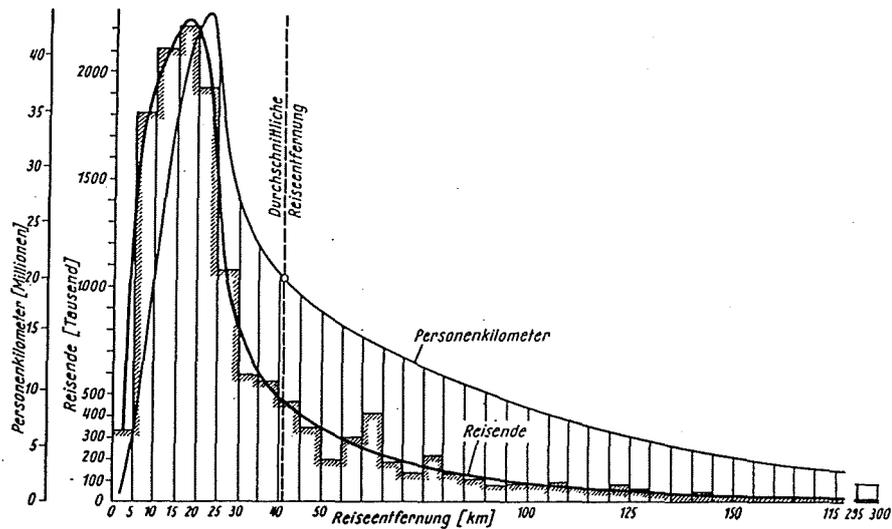


Abb. 108

Fahrgastzahl und Personenverkehrsleistung der Niederländischen Eisenbahn nach Distanzbereich, um 1960 [57].

Bei der S-Bahn Berlin wurde eine durchschnittliche Fahrtweite von 5,5 km, bei der Métro Paris eine solche von 3,5 km beobachtet. Die Städte in der ehemaligen DDR zeigten mittlere Fahrtweiten von 2,5 bis 4,5 km, wobei kleinere Städte die tieferen Werte aufwiesen.

Tab. 14

Fahrtweiten ausgewählter Städte, Standardabweichung und k-Wert nach Erlang [66].

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

Die Fahrtweite auf einer Linie strebt einem Grenzwert zu, der im Falle von Zürich bei sieben Haltestellen liegt. Bei einer mittleren Haltestellendistanz von 400 m leitet sich eine Fahrtweite von 2,8 km ab.

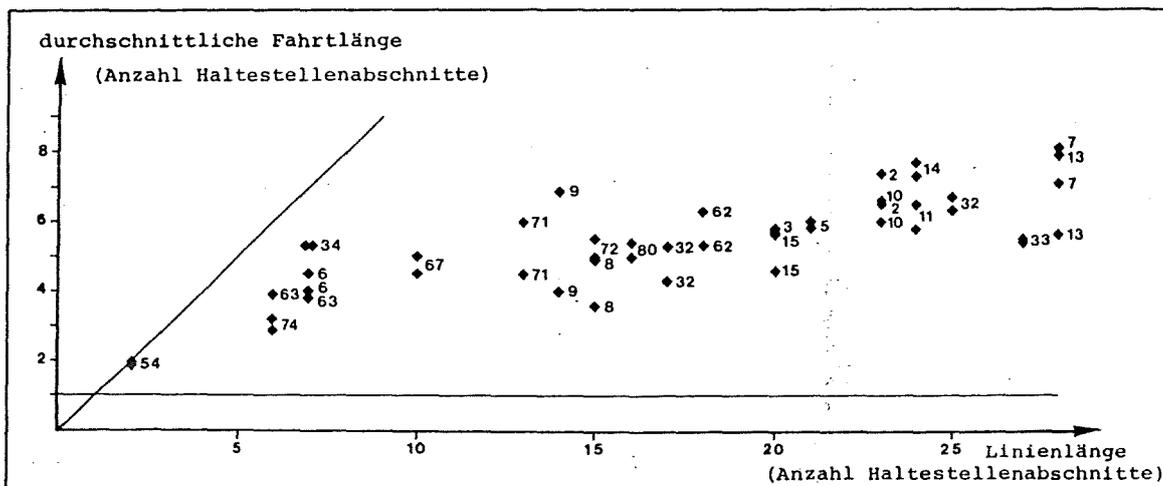


Abb. 109

Durchschnittliche Teilfahrtlänge in Funktion der Linienlänge, VBZ Zürich [5].

5.2

Häufigkeitsverteilung der Fahrgastwechselzahlen

Die dargestellten Einflüsse und Indikatoren des Fahrgastwechsels tragen zwar zum Verständnis bei, lassen sich aber nicht direkt nutzen. Im Folgenden wird deshalb mit der standardisierten Häufigkeitsverteilung ein statistisches Verfahren vorgestellt, welches eine überschlägige Schätzung des Fahrgastwechsels ohne grossen Rechenaufwand und ohne Kenntnis der genauen Gegebenheiten gestattet. Es beruht auf der Grundidee, dass zwischen der maximalen Auslastung eines Kurses und den Fahrgastwechselzahlen während der Fahrt ein Zusammenhang in Form einer Häufigkeitsverteilung besteht. Bezieht man die Verteilungsfunktion auf die grösste Kursauslastung der Fahrt, so ist deren Form vom Absolutwert der Kursauslastung unabhängig. Bezugsgrösse sind dann die relativen Fahrgastwechselzahlen $q_{F,rel,i}$:

$$(51) \quad q_{F,rel,i} = \frac{F_i}{Q_{K,Q_{max}}}$$

wobei $q_{F,rel,i}$ Relative Fahrgastwechselzahl an der Haltestelle i [-]
 $Q_{K,Q_{max}}$ Maximale Auslastung des Kurses während einer bestimmten Kursfahrt [P]

Die Summenkurve nennt den Anteil der Halte, in welchem eine bestimmte relative Fahrgastwechselzahl unterschritten wird. Zur Anwendung auf eine Linie mit n_H Haltestellen wird die Ordinate in $100\%/n_H$ Abschnitte unterteilt. Die $q_{F,rel,i}$ an der oberen Grenze der Intervalle entsprechen den Erwartungswerten in Prozenten der Maximalauslastung.

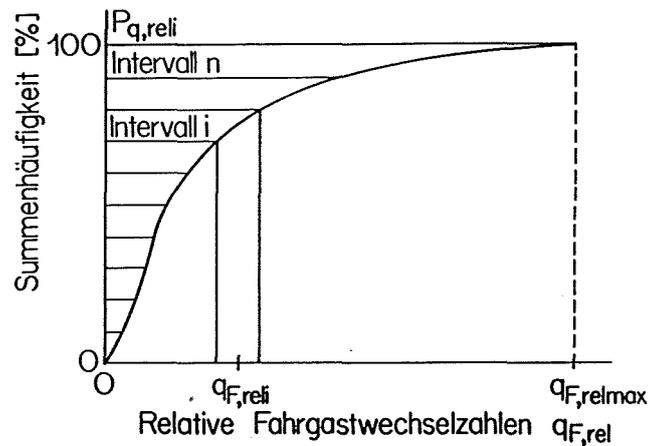


Abb. 110

Unterteilung der Summenkurve der relativen Fahrgastwechselzahlen in n_H Intervalle entsprechend der Haltestellenzahl und zugehörige relative Fahrgastwechselzahlen $q_{F,rel}$.

Den Absolutwert der einzelnen Fahrgastwechselzahlen erhält man als Produkt der relativen Fahrgastwechselzahlen mit der maximalen Auslastung des Kurses.

(52)

$$F_i = q_{F,rel} \cdot Q_{K,Qmax}$$

5.3

Standardisierte Häufigkeitsverteilung

Zur Bestimmung der Verteilungsfunktion konnten 11 Messfahrten in Genf, 19 Messfahrten in Grenoble und 52 Messfahrten in Basel genutzt werden. Die Annahme, dass kleine Fahrgastwechselzahlen häufig, grosse dagegen selten sind, bestätigte sich:

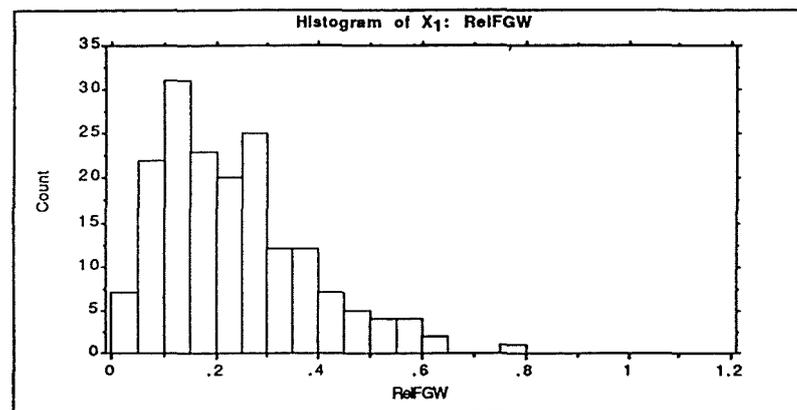


Abb. 111

Beispiel der Häufigkeitsverteilung der relativen Fahrgastwechselzahlen; 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:

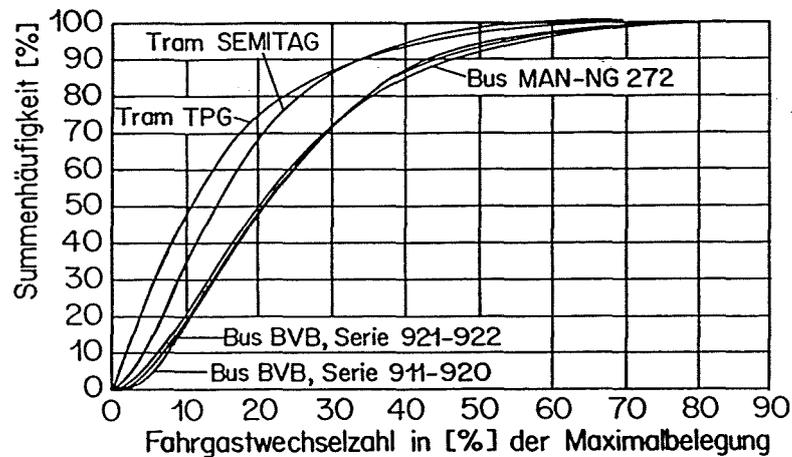


Abb. 112

Summenkurve der relativen Fahrgastwechselzahlen bei den Messfahrten in Genf, Grenoble und Basel.

Die Kurvenverläufe sind ähnlich. Die Abweichung zwischen den drei Messfahrten mit Autobussen einerseits und mit den Schienenfahrzeugen andererseits erklärt sich mit folgenden zwei Faktoren:

- Bei vielen Messfahrten war die Auslastung der Autobusse so bescheiden, dass die Ganzzahligkeit des Fahrgastwechsels das Resultat verfälschte.
- Der flachere Kurvenverlauf der Trolleybuslinie 33 der BVB deutet auf eine andere Verkehrsfunktion hin. In der Tat ist sie eine Tangentiallinie, welche eine Anzahl von Radiallinien miteinander verbindet. Bei jedem Umsteigepunkt treten grössere Fahrgastwechselzahlen auf. Die Tramlinien von Genf und Grenoble sind hingegen Durchmesserlinien, welche auf ihren Aussenästen der Erschliessung der durchfahrenen Gebiete dienen.

Gemeinsam ist allen Messreihen, dass die grösste relative Fahrgastwechselzahl bei etwa 85 % der maximalen Kursauslastung liegt. In sehr seltenen Fällen steigt sie auf etwa 100 % an. Mittels einer Regressionsrechnung wurde aus den fünf Messreihen folgende standardisierte Summenkurve abgeleitet:

(53)

$$P_{q,rel} = -6.3118 + 4.1673 \cdot q_{F,rel} - 0.0542 \cdot q_{F,rel}^2 + 0.000233 \cdot q_{F,rel}^3$$

wobei $P_{F,rel}$ Summenhäufigkeit der relativen Fahrgastwechselzahlen [%]

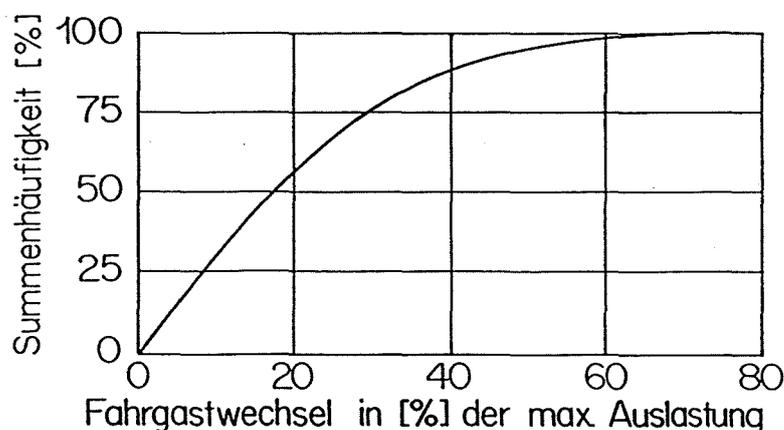


Abb. 113

Standardisierte Summenkurve der relativen Fahrgastwechselzahlen.

6 Zusammenfassung und Folgerungen

6.1 Berechnungsgang, Zusammenfassung der Beziehungen und Beispiel 6.11 Berechnungsgang der Fahrgastwechsel- und Haltezeit

Das Vorgehen bei der Berechnung der Fahrgastwechsel- und Haltezeit einer Fahrt lässt sich folgendermassen zusammenfassen:

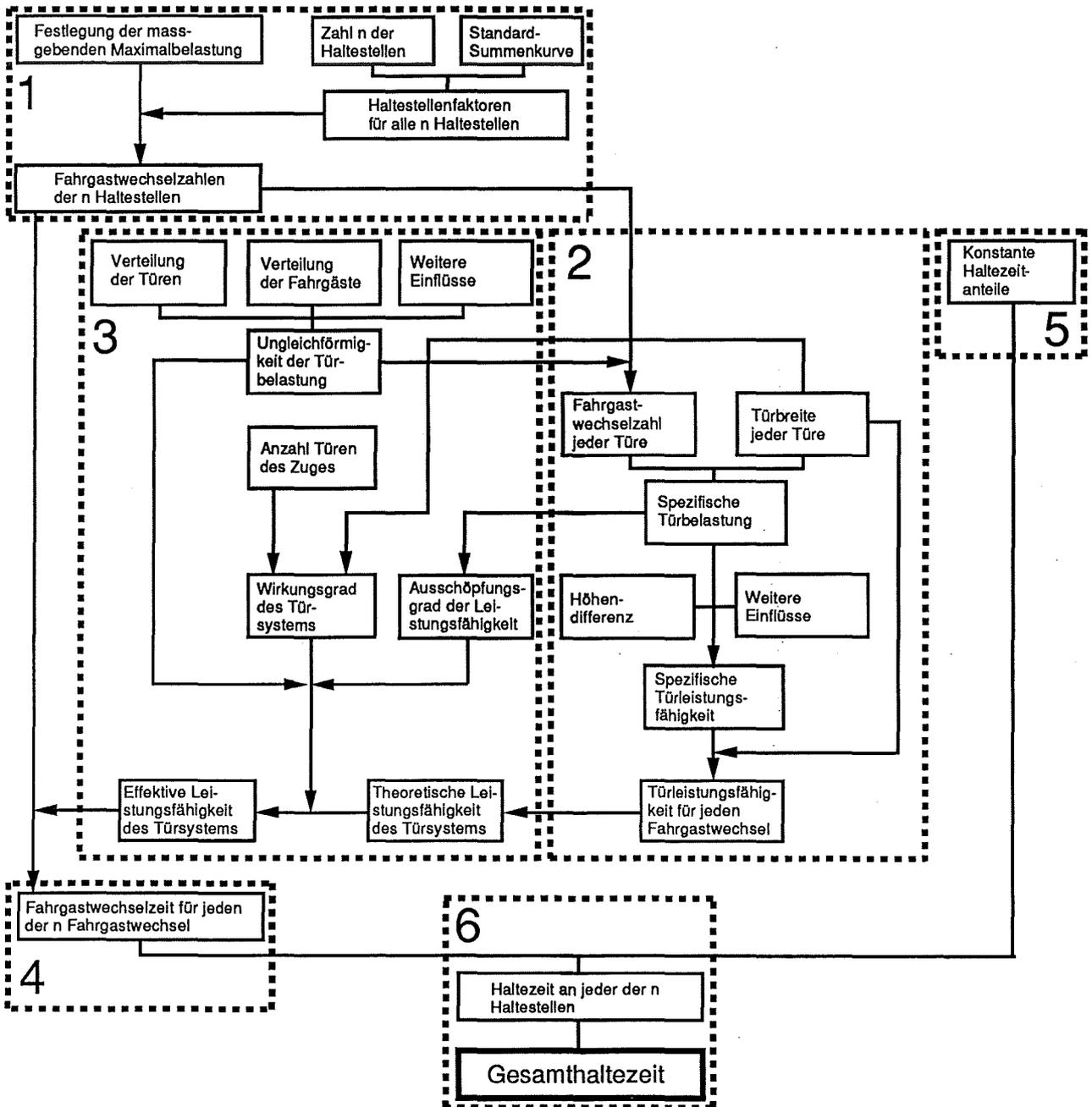


Abb. 114

Bestimmung der Gesamthaltezeit einer Kursfahrt mit den auszuführenden Schritten:
1. Fahrgastwechselzahlen an den einzelnen Haltestellen: Zur Bestimmung der Fahrgastwechselzahlen an den einzelnen Haltestellen ist als erstes die Maximalbelastung festzulegen. Sie orientiert sich am Fassungsvermögen des Fahrzeuges und am zulässigen Stehplatzbelegungsgrad. Aus der Standard-

- verteilung der relativen Fahrgastwechselzahlen und der Zahl der Haltestellen leiten sich die Haltestellenfaktoren ab. Das Produkt der Haltestellenfaktoren mit der Maximalbelastung ergibt die Fahrgastwechselzahlen.
2. Türleistungsfähigkeit jeder Türe für jeden Fahrgastwechselvorgang: In einem zweiten Schritt sind für jede Türe und für jede Grösse des Fahrgastwechsels die Türleistungsfähigkeiten zu bestimmen. Fahrgastwechselzahl und Türbreite ergeben dabei die spezifische Türbelastung. Zusammen mit der Höhendifferenz und weiteren Einflüssen errechnet sich aus dieser die spezifische Türleistungsfähigkeit. Das Produkt der Türbreite mit der spezifischen Türleistungsfähigkeit ist die Leistungsfähigkeit jeder Türe.
 3. Effektive Leistungsfähigkeit des Türsystems: Mit der Summe der Leistungsfähigkeiten der einzelnen Türen ist die theoretische Leistungsfähigkeit des Türsystems gegeben. Reduziert wird sie durch die Ungleichförmigkeit der Türbelastung infolge einer unregelmässigen Türverteilung, einer unausgewogenen Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron und im Fahrzeug sowie von Sonderfaktoren. Die Zahl der Türen sowie die Streuung der spezifischen Leistungsfähigkeiten führen aufgrund der statistischen Gesetzmässigkeiten zu einer weiteren Abmilderung der Leistungsfähigkeit. Schliesslich kann die theoretische Leistungsfähigkeit bei kleinen Fahrgastwechseln infolge der Ganzzahligkeit des Fahrgastwechsels nicht ausgeschöpft werden.
 4. Fahrgastwechselzeit für jeden einzelnen Fahrgastwechselvorgang: Durch die Schritte 1 und 3 sind die Fahrgastwechselzahlen aller Halte und die zugehörigen Türleistungsfähigkeiten gegeben. Daraus ergeben sich in einem vierten Schritt die Fahrgastwechselzeiten jedes Haltes. Deren Summe bildet die Gesamtfahrgastwechselzeit.
 5. Feste Haltezeitanteile: Einen wesentlichen Bestandteil der Haltezeit stellen die festen Haltezeitanteile dar. Ihre Grösse hängt vom Türsystem, der Fahrzeugsteuerung und der Abfertigungsmethode ab. Im Nahverkehr mit Abfertigung durch den Fahrer ist ein globaler Wert von 8 s pro Halt angemessen.
 6. Gesamthaltezeit der Kursfahrt: Die Summe aller Fahrgastwechselzeiten und der festen Haltezeitanteile ist die Gesamthaltezeit.

6.12 Zusammenfassung der Beziehungen

6.12.1 Fahrgastwechselzeit an der Einzeltüre

Spezifische Leistungsfähigkeit von Einzeltüren, Türabstände unter 10 m:

$$(54) \quad L_s = \left(0.93 + 0.14 \cdot \frac{A}{F}\right) \cdot \left(\frac{0.9608 - 0.3878 \cdot l_{T,v}}{0.9608}\right) \cdot 0.781 \cdot \left(\frac{F}{l_{T,b}}\right)^{0.0450}$$

Richtungsanteil Höhendifferenz Türbelastung

(nicht-zusammengefasste Form von Formel (33))

Spezifische Leistungsfähigkeit von Einzeltüren, Türabstände über 10 m:

$$(55) \quad L_s = \left(0.93 + 0.14 \cdot \frac{A}{F}\right) \cdot \left(\frac{0.9608 - 0.3878 \cdot l_{T,v}}{0.9608}\right) \cdot 0.488 \cdot \left(\frac{F}{l_{T,b}}\right)^{0.1651}$$

(nicht-zusammengefasste Form von Formel (34))

wobei	A_I	Zahl der Aussteiger an der Türe I [P]
	F_I	Fahrgastwechselzahl der Türe I [P]
	$l_{T,v}$	Höhendifferenz zwischen Perron und Wagenboden [m]
	$l_{T,bI}$	Lichte Breite der Türe I [m]

6.12.2

Fahrgastwechselzeit eines Kurses

$$(48) \quad t_{h,f} = \frac{F}{\sum_{i=1}^{i=n_{T,K}} l_{T,bi} \cdot L_{s,i}} \cdot \frac{k_{U,T} \cdot k_D}{q_{K,L} \cdot q_{K,nb}}$$

$$(47) \quad k_{U,T} = 1.0438 - 0.3259 \cdot q_{U,T} + 0.2705 \cdot q_{U,T}^2$$

wobei $k_{U,T}$ Zuschlagfaktor zur Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses bei ungleichförmiger Belastung des Türsystems [-]
 $q_{U,T}$ Ungleichförmigkeitsmass der Türbelastung [-]

$$(45) \quad q_{U,T} = \frac{Q_{T,rel \max}}{Q_{T,rel}}$$

$$(30) \quad k_D = 1.000 - 0.0986 \cdot D_{F,T} + 0.0374 \cdot D_{F,T}^2$$

wobei k_D Korrekturfaktor zur mittleren Fahrgastwechselzeit beim Auftreten von Stehplatzfahrgästen im Türraum [-]
 $D_{F,T}$ Stehplatzdichte im Türraum, Mittel aus der Situation vor und nach dem Fahrgastwechsel [P/m²]

$$(42) \quad q_{K,L} = 0.8275 \cdot Q_{T,s}^{0.0484}$$

wobei $q_{K,L}$ Standardisierter Ausschöpfungsgrad der Leistungsfähigkeit des Türsystems, bezogen auf die Leistungsfähigkeit bei einer spezifischen Türbelastung $Q_{T,s}$ [-]
 $Q_{T,s}$ Spezifische Türbelastung [P/m]

$$(44) \quad q_{K,nb} = n_{T,K} \cdot (0.2407 - 0.5464 \cdot l_{T,b} + 0.0722 \cdot l_{T,b}^2)$$

wobei $q_{K,nb}$ Wirkungsgrad des Türsystems in Funktion der Türzahl und der Breite der einzelnen Türen [-]
 $n_{T,K}$ Zahl der Türen des Kurses [-]
 $l_{T,b}$ Mittlere lichte Breite der Türen [m]

6.12.3

Fahrgastwechselzeit einer Kursfahrt

$$(54) \quad t_{h,ftot} = \sum_{i=1}^{i=n_H} t_{h,fi}$$

wobei $t_{h,ftot}$ Gesamtfahrgastwechselzeit einer Kursfahrt [s]
 n_H Zahl der Haltestellen einer Kursfahrt [-]

$$(53) \quad P_{q,reli} = -6.3118 + 4.1673 \cdot q_{F,reli} - 0.0542 \cdot q_{F,reli}^2 + 0.000233 \cdot q_{F,reli}^3$$

wobei $P_{F,reli}$ Summenhäufigkeit der relativen Fahrgastwechselzahlen [%]
 $q_{F,reli}$ Relative Fahrgastwechselzahl an der Haltestelle i [-]

6.13

Beispiel

6.13.1

Problemstellung

Die Anwendung der in den Abschnitten 3 bis 5 hergeleiteten Beziehungen soll anhand eines praktischen Beispiels verdeutlicht werden. Gesucht seien die Fahrgastwechselzeiten eines Nahverkehrszuges der SBB in Funktion der Fahrgastwechselzahl sowie die Gesamtfahrgastwechselzeit dieses Zuges auf seiner Fahrt über eine Regionallinie.

6.13.2

Fahrzeug und feste Anlagen

Beim Nahverkehrszug handle es sich um eine fünfteilige Pendelzugskomposition des Typs NPZ in der Zusammensetzung RBDe 4/4 + B + B+ AB + Bt. Die eingereichten Fahrzeuge weisen folgende Charakteristiken auf:

Tab. 15

Hauptcharakteristiken der im Pendelzug NPZ der SBB eingereichten Fahrzeuge.

Fahrzeug	Baujahre	Länge	Plätze	Anzahl Türen	Lichte Türbreite	Wagenbodenhöhe
Triebwagen RBDe 4/4	1984 - 1997	25.00 m	56 P	1	1.40 m	1.100 m
Steuerwagen Bt	1984 - 1997	25.00 m	72 P	2	1.40 m	0.885 m
Wagen AB EW''	1968 - 1973	24.24 m	63 P	2	0.72 m	1.007 m
Wagen B EW'	1956 - 1967	23.70 m	80 P	2	0.72 m	0.980 m

Dies ergibt eine Länge des Zuges von 121.64 m und ein Fassungsvermögen von 351 Sitzplätzen.

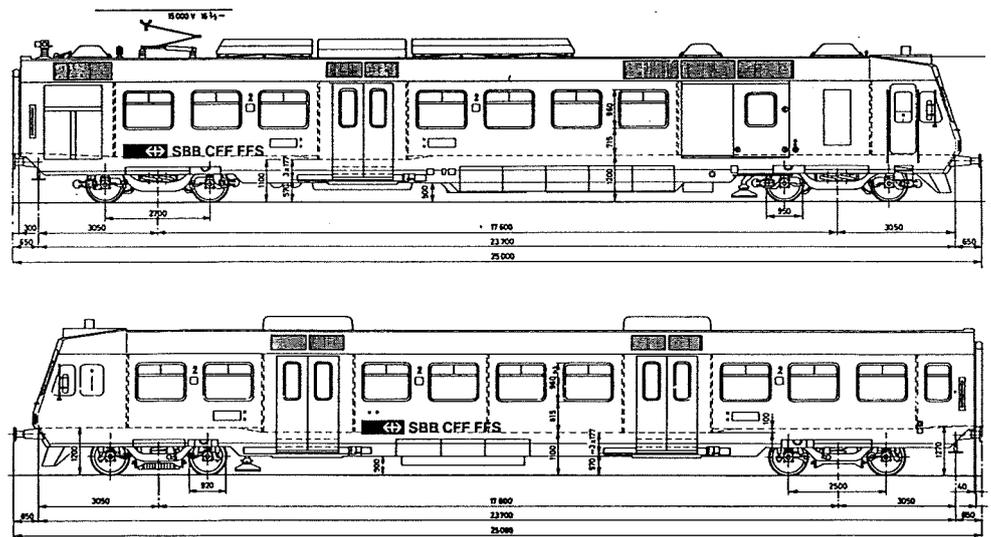


Abb. 115

Oben: Triebwagen RBDe 4/4 NPZ der SBB; unten: Steuerwagen Bt NPZ der SBB (Abbildung: SBB).

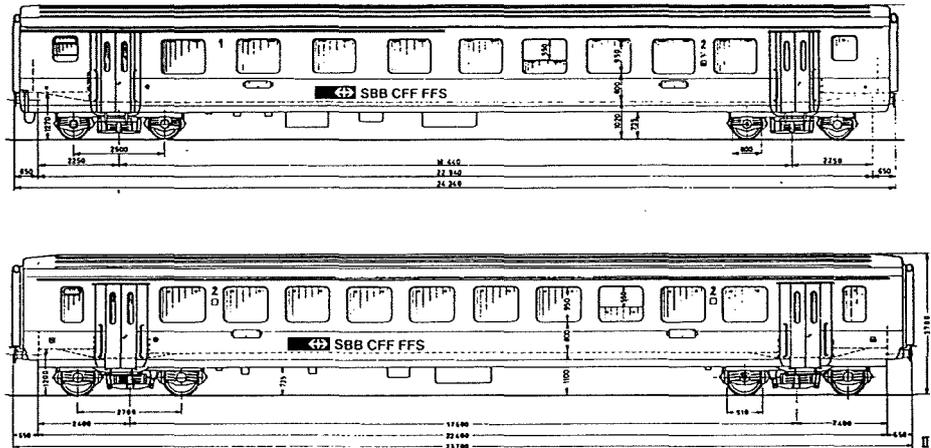


Abb. 116

Oben: Zwischenwagen AB EWⁿ SBB; unten: Zwischenwagen B EWⁿ SBB (Abbildung: SBB).

Die Perronhöhe betrage bei allen Haltepunkten 0.55 m. Die Linie weise insgesamt zehn Haltepunkte auf.

6.13.3

Fahrgastwechselzeit an den Einzeltüren

Da die spezifische Leistungsfähigkeit einer Türe von der Grösse des Fahrgastwechsels abhängt, müssen zunächst die diesbezüglichen Anteile geschätzt werden. Im vorliegenden Beispiel wird davon ausgegangen, dass sich die Fahrgäste gleichmässig auf dem Perron verteilen, sodass sich die Türeinzugsgebiete aus den Mitten zwischen den Türachsen und den Enden des Zuges ergeben.

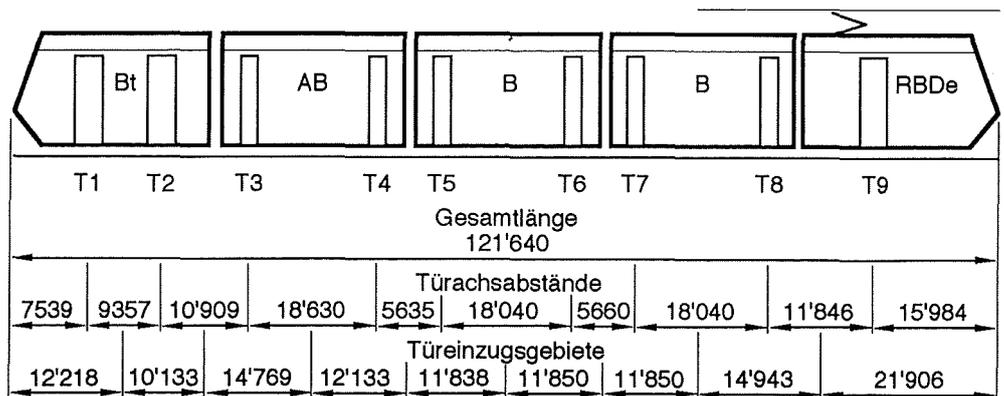


Abb. 117

Fünffelliger NPZ der SBB, wichtige Masse und Türeinzugsgebiete.

Die Anteile der neun Türen am Fahrgastwechsel betragen damit:

Türe	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Anteil [%]	10.0	8.3	12.1	10.0	9.7	9.8	9.8	12.3	18.0

Zur Aufstellung der Beziehung zwischen Fahrgastwechselzahl und Fahrgastwechselzeit des Kurses über den gesamten Wertebereich genügt die Berechnung zweier Stützwerte mit nachfolgender Interpolation. In diesem Beispiel werden Fahrgastwechsel-

quoten von 40 und 80 % betrachtet, was auf der Basis des Fassungsvermögens des Zuges und der oben hergeleiteten prozentualen Anteile der Türen folgende Fahrgastwechselzahlen pro Türe ergibt:

Türe	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
FGW bei 40 % [P]	14	12	17	14	13	14	14	17	25
FGW bei 80 % [P]	28	24	34	28	27	27	27	35	51

Die weiteren Parameter zur Berechnung der spezifischen Leistungsfähigkeit der Türen sind die lichten Türbreiten gemäss Tabelle 15 und die aus der Perron- und Wagenbodenhöhe abgeleiteten Einstiegshöhen:

Türe	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Einstiegshöhe [m]	0.335	0.335	0.457	0.457	0.430	0.430	0.430	0.430	0.550

Das Einstelger/Ausstelgerverhältnis wird als 1 : 1 angenommen. Der mittlere Türabstand des Zuges beträgt 13.5 m, sodass zur Berechnung der spezifischen Leistungsfähigkeit die Formel für Türabstände über 10 m (55) gilt. Diese Annahmen ergeben zusammen mit den lichten Türbreiten für die beiden Fahrgastwechselquoten folgende spezifische ($L_{s,i}$) und absolute (L_i) Türleistungsfähigkeiten:

Türe	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
$L_{s,i}$ (40 %) [P/sm]	0.62	0.60	0.68	0.65	0.65	0.65	0.65	0.68	0.61
$L_{s,i}$ (80 %) [P/sm]	0.69	0.67	0.76	0.73	0.74	0.74	0.74	0.77	0.69
L_i (40 %) [P/s]	0.87	0.84	0.49	0.47	0.47	0.47	0.47	0.49	0.85
L_i (80 %) [P/s]	0.97	0.94	0.55	0.53	0.53	0.53	0.53	0.55	0.97

Der Zug weist damit bei einer Fahrgastwechselquote von 40 % eine theoretische gesamte Türleistungsfähigkeit von 5.4 P/s und bei einer Fahrgastwechselquote von 80 % sowie von 6.1 P/s auf.

6.13.4

Fahrgastwechselzeit des Zuges

Aus den dargestellten Gründen wird die theoretische Türleistungsfähigkeit des Zuges nicht erreicht, sondern ist um folgende Faktoren abzumindern:

- Fahrgastdichte im Türraum (k_D)
- Ungleichförmigkeit der Türbelastung ($k_{U,T}$)
- Ganzzahligkeit des Fahrgastwechsels ($q_{K,L}$)
- Zahl und Breite der Einstiege ($q_{K,nb}$)

Da nur mit Sitzplätzen gerechnet wird, ist $k_D=1$.

Zur Bestimmung des Ungleichförmigkeitsmasses $k_{U,T}$ muss zunächst die Türe mit der höchsten relativen Türbelastung ermittelt werden. Die $Q_{T,rel}$ der Türen belaufen sich bei einer Fahrgastwechselquote von 80 % auf:

Türe	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
$Q_{T,rel}$ (80 %) [s]	28.9	25.5	61.8	52.8	50.9	50.9	50.9	63.6	52.6

Die relative Türbelastung ist somit bei der Türe 8 mit 63.6 s am höchsten, während der Durchschnitt des Zuges nur 46.1 s beträgt. $q_{U,T}$ wird damit gemäss (45) zu 1.38 und der Zuschlag $k_{U,T}$ gemäss (47) zu 1.11.

Der Ausschöpfungsgrad $q_{K,L}$ beträgt 0.946 für eine Fahrgastwechselquote von 40 % und 0.980 für eine solche von 80 %.

Die Ermittlung des Korrekturfaktors für die Türzahl und die Türbreite $q_{K,nb}$ stösst auf das Problem, dass die Türen eine unterschiedliche Breite aufweisen. Eine streng korrekte Berechnung wäre nur mit den wahrscheinlichkeitstheoretischen Beziehungen möglich. Als Näherung ist allerdings die Anwendung des Mittelwertes der Türbreiten in (44) genügend genau. Dieser beträgt 0.95 m, sodass $q_{K,nb} = 0.626$ ist.

Damit sind alle Bestimmungsgrößen für die Fahrgastwechselzeit des NPZ bekannt und können in (48) eingesetzt werden. Demnach benötigt ein Fahrgastwechsel von 40 % des Fassungsvermögens (140 P) rund 48 s, ein solcher von 80 % (281 P) rund 83 s.

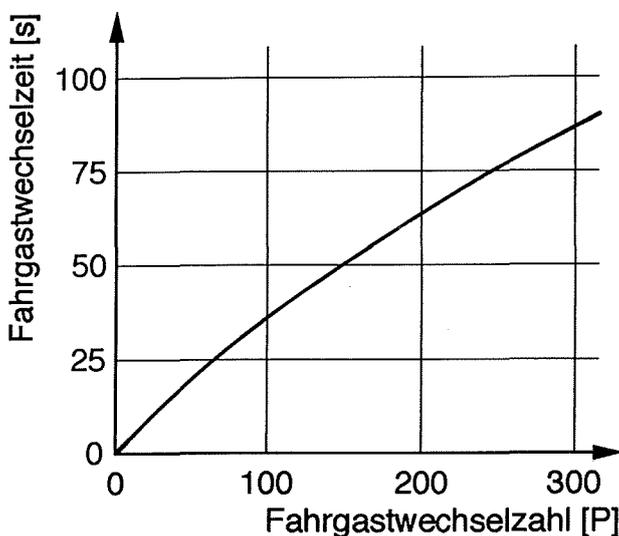


Abb. 118

Fahrgastwechselzeit eines fünftelligen Pendelzuges NPZ der SBB in Abhängigkeit von der Fahrgastwechselzahl, Perronhöhe 550 mm.

6.13.5

Fahrgastwechselzeit der ganzen Fahrt

Die Fahrgastwechselzeit für die ganze Fahrt wird mit Hilfe der standardisierten Häufigkeitsverteilung gemäss (53) bestimmt. Die maximale Auslastung des Zuges während der betrachteten Fahrt entspreche der vollen Sitzplatzauslastung (351 Personen). Zur Ermittlung der Fahrgastwechselzahlen der zehn Haltestellen wird die Summenkurve von Abbildung 113 in zehn Abschnitte unterteilt. Die Grenzen der Intervalle entsprechen den relativen Fahrgastwechselzahlen. Multipliziert mit der maximalen Auslastung des Zuges ergeben sich die zehn Fahrgastwechselzahlen. Daraus und aus der Fahrgastwechselzeit des NPZ in Abhängigkeit von der Grösse des Fahrgastwechsels gemäss Abbildung 118 errechnen sich die zehn gesuchten Fahrgastwechselzeiten:

Haltestelle	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10
$q_{F,rel} [-]$	0.03	0.06	0.10	0.14	0.18	0.22	0.27	0.33	0.42	0.80
$F_i [P]$	11	21	35	49	63	77	95	116	147	281
$t_{h,fi} [s]$	3	8	13	18	23	28	34	40	50	83

Die Summe der $t_{h,fi}$ ist die Gesamtfahrgastwechselzeit $t_{h,ftot}$ und beträgt in diesem Beispiel 300 s. Die Gesamtfahrzeit einer derartigen Regionalverkehrslinie beträgt erfahrungsgemäss etwa 40 min oder 2400 s, sodass der Fahrgastwechsel einen Anteil von 13 % an der Gesamtfahrzeit hat. Diese Grössenordnung wird in Abschnitt 6.51.3 bestätigt.

6.2

6.21

Folgerungen bezüglich der Systemkomponente Fahrgast

Verkürzung der Fahrgastwechselzeit durch Beeinflussung des Fahrgastverhaltens

6.21.1

Grundsätze

Eine Möglichkeit zur Verkürzung der Fahrgastwechselzeit besteht in der Beeinflussung des Fahrgastverhaltens. Die Türleistungsfähigkeit wird nämlich namentlich bei kleinen Fahrgastwechselzahlen nicht ausgenützt, weil sich nicht genügend Fahrgäste in Türnähe befinden und die Zuströmfunktion durch das Zurücklegen des Weges zur Türe eine flache Form erhält. Anzustreben ist dagegen ein steller Verlauf, der während einer gewissen Zeit die Türleistungsfähigkeit übersteigen darf. Alle Bewegungen auf

dem Perron oder im Fahrzeug müssen dazu vor dem Halt des Kurses abgeschlossen sein, sodass sich die Fahrgäste bereits in der Nähe der Türen befinden. Dazu ist die rechtzeitige Information eine wesentliche Voraussetzung.

Bei der Informationsaufnahme haben die älteren Fahrgäste die grössten Schwierigkeiten, also jenes Kundensegment, welches nicht mehr über das volle Reaktions- und Bewegungsvermögen verfügt. Eine Verbesserung des Betriebsablaufes bedingt aber die Beeinflussung gerade dieser Fahrgastgruppe. Häufig wird auf eine zweikanalige optische und akustische Informationsübertragung nicht zu verzichten sein. Dies ist sowohl im Nahverkehr von Bedeutung, wo eine rasche Reaktion gefordert ist, als auch im Fernverkehr, wo die gravierenden Folgen eines Fehlverhaltens zu hoher Vorsicht mit entsprechendem Zeitbedarf veranlassen. Eine klare Information verbessert somit nicht nur den Reisekomfort, sondern verflüssigt auch den Betriebsablauf.

6.21.2

Beschleunigung des Einstelgevorganges

Der Standort der Türen sowie allfälliger Sonderabteile ist möglichst genau anzugeben, beispielsweise mittels Sektoreneinteilung auf den Bahnhöfen und Wagenstandszeigern. Bei dynamischer Anzele des nächstfolgenden Kurses an Haltestellen mit mehreren Linien stellen sich die einsteigewilligen Fahrgäste schon vor der Einfahrt ihres Kurses bereit. Verändert sich die Kurslänge im Verlaufe der Betriebszeit, so ist zusätzlich die Angabe des optimalen Warteraumes zweckmässig, wie dies bereits mit der Unterscheidung zwischen Kurz-, Voll- und Langzügen bei S-Bahn-Systemen praktiziert wird.

6.21.3

Beschleunigung des Ausstiegens

Zur Beschleunigung des Ausstiegens ist ein Nahverkehrsverhalten zu erwirken, indem sich die Fahrgäste schon vor dem Halt zum Aussteigen bereithalten. Voraussetzung dafür ist, dass die Fahrgäste rechtzeitig über den nächsten Halt informiert werden. Der optimale Moment bemisst sich nach der Zeit, welche die Fahrgäste zum Erreichen der Türe benötigen sowie nach der maximal akzeptierten Dauer, welche die Fahrgäste stehend verbringen. Diese wird im Nahverkehr kleiner sein als im Fernverkehr.

6.22

Qualitative Gesichtspunkte der Einstiegsgestaltung

6.22.1

Strategien zur Erleichterung der Benützung öffentlicher Verkehrsmittel

Die qualitativen Aspekte der Einstiegsgestaltung kommen vorwiegend bei den behinderten Fahrgästen zum Tragen. Durch die Verschlebung der Altersstruktur sinkt aber auch allmählich die Akzeptanz vorhandener Anlagen und Fahrzeuge. Will man mobilitätsbehinderten Personen die Fahrt mit dem öffentlichen Verkehrsmittel ermöglichen, so bieten sich zwei Handlungsstrategien an:

1. Sondertransportdienste, mit welchen die Hindernisse zwischen Anfangspunkt und Endpunkt umgangen werden.
2. Behindertengerechter Ausbau des öffentlichen Verkehrssystems durch Beseitigung aller Hindernisse.

Für den behindertengerechten Ausbau kommen in Betracht:

- Sondermassnahmen für Behinderte an den Haltestellen: Podest für Rollstühle
- Bauliche Anpassung der gesamten Haltestelle: Hochbahnsteig
- Sondermassnahmen für Behinderte am Fahrzeug: Behindertenlift, Rampe
- Bauliche Anpassung der Fahrzeugflotte: Niederflurtechnik

Zur Bewertung der Massnahmen können die Behinderungsgrade mit Hilfe folgender Kriterien abgegrenzt werden:

- 0 Keine spürbare Behinderung: Diese Fahrgäste bewältigen ohne Handgriff einen konventionellen Fahrzeugeinstieg.
- 1 Leichte Behinderung: Zum Bestellen eines konventionellen Fahrzeuges müssen sich diese Fahrgäste eines Handgriffes bedienen, legen die Einstiegs-treppe aber nahezu gleich schnell zurück wie Unbehinderte.
- 2 Mittlere Behinderung: Ein Handgriff ist unerlässlich und es ist ein deutlicher Geschwindigkeitsverlust zu beobachten.
- 3 Starke Behinderung: Zum Einstiegen benötigen diese Fahrgäste zwei Handgriffe.
- 4 Schwerste Behinderung: Ohne Hilfspersonen sind diese Fahrgäste nicht in der Lage, ein Fahrzeug zu bestiegen oder zu verlassen.

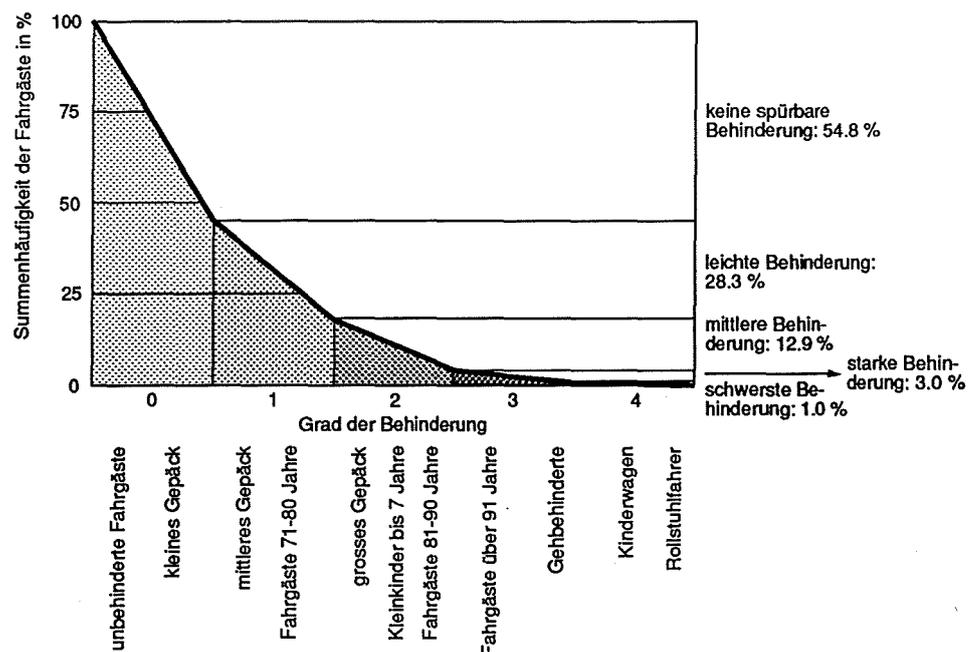


Abb. 119

Behinderungsgrade mit deren Schwere und Häufigkeit.

6.22.2

Insbesondere Einsatz der Niederflertechnik

Die Sondermassnahmen an der Haltestelle und an den Fahrzeugen vermögen die Reisefähigkeit nur sehr weniger Mobilitätsbehinderter 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. Hochbahnsteige und Niederflertechnik sind in ihrer Wirkung ähnlich, doch weist letztere drei wesentliche Vorteile auf:

1. Die Niederflertechnik tritt im Stadtbild nicht in Erscheinung.
2. Die Niederflertechnik verlangt keine aufwendigen Zugänge wie Rampen und Treppen.
3. Die Niederflertechnik lässt sich rasch auf dem ganzen Netz einsetzen.

Der Nutzen der Niederflertechnik ist bei Rollstuhlfahrern am auffälligsten. Insgesamt bietet sie aber 45.2 % der Fahrgäste einen deutlichen Vorteil. Begleitet werden muss sie von der Ausrüstung aller Haltestellen mit Perrons von etwa 200 mm Höhe, um die Resthöhendifferenz zwischen 30 und 120 mm zu halten. Die beschränkten Mittel sowie die Langlebigkeit der Infrastruktur und der Fahrzeuge verlangen nach einer pragmatischen und stufenweisen Strategie:

- Stufe 1: Niederflerfahrzeuge werden eingesetzt, aber die Fussgängeranlagen sind noch nicht behindertengerecht ausgebaut => Rollstuhlfahrer benötigen Begleitperson auf ganzer Fahrt.

- Stufe 2: Niederflurfahrzeuge werden eingesetzt und Innenstadtbereiche sowie öffentliche Gebäude sind behindertengerecht ausgebaut => Rollstuhlfahrer benötigen Begleitperson an einem Ende der Fahrt.
- Stufe 3 = Anzustrebender Zustand: Niederflurfahrzeuge werden eingesetzt und sämtliche Wege sowie die Gebäude sind behindertengerecht ausgebaut => Rollstuhlfahrer können das System ohne Begleitperson benutzen.

Eine ebensogrosse Bedeutung wie der Niederflurtechnik kommen dabei behindertengerechten Gebäuden und öffentlichen Anlagen zu. Erst auf diese Weise wird die Niederflurtechnik von einer fahrzeugtechnischen Angelegenheit zum Baustein eines Niederflur-Verkehrssystems. Sondertransportdienste können dadurch schrittweise von ineffizienten Kurzstreckenfahrten im Stadtzentrum entlastet und die Kapazitäten für jene Fahrten freigemacht werden, wo sie unersetzlich bleiben.

6.3 6.31

Folgerungen bezüglich der Systemkomponente Anlage Überblick

Die Eigenschaften der festen Anlagen bestimmen die Fahrgastwechselzeit in zweierlei Weise:

- Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron: Die Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron beeinflusst die Benützung der Einstiege, da die Fahrgäste in der Regel die nächstliegende Türe benutzen.
- Höhendifferenz: Die Perronhöhe bestimmt zusammen mit der Wagenbodenhöhe die Höhendifferenz und damit die Türeistungsfähigkeit.

6.32

Anordnung der Zu- und Abgänge, Perronausstattung

Eine ungleichförmige Verteilung der Fahrgäste auf dem Perron verlängert die Fahrgastwechselzeit empfindlich. So erhöht sie sich bei einer dreieckförmigen Längsdichte mit einem Ungleichförmigkeitsmass von 140 % bereits um 10 %. Dem kann mit konzeptionellen Mitteln entgegengewirkt werden: Die Verteilung der Fahrgäste wird zum ersten gesteuert durch die Lage der Zugänge und die Ausstattung der Perronfläche mit Sitzgelegenheiten, Informationseinrichtungen und Fahrscheinautomaten, zum zweiten durch die Abgänge an der Zielstation. Die Kriterien kommen bei den verschiedenen Systemen nicht in gleicher Weise zum Tragen:

- Strassengebundener Nahverkehr: Im strassengebundenen Nahverkehr ist der Zu- und Abgang der Haltestelle meist nicht genau definiert und die Dimensionen des Systems sind so klein, dass der Fahrgast keinen wesentlichen Reisezeitvorteil erzielt, wenn er sich auf die Gegebenheiten an der Zielhaltestelle ausrichtet. Wesentlich ist für ihn die Ausstattung der Ausgangshaltestelle. Halten Kurse an Haltestellen von grösserer Länge, so tritt eine Überlastung der äussersten Türen auf.
- Mittelstrecken- und Fernverkehr: Die Haltepunkte des Mittelstrecken- und Fernverkehrs verfügen nur über wenige definierte Zu- und Abgänge. Um eine gleichmässige Türbenützung zu erzielen, müssen zwei oder mehr Perronzugänge vorgesehen werden. Auf Zugänge bei den Stirnseiten des Perrons ist möglichst zu verzichten; zweckmässiger sind Zugänge in den Viertelpunkten. Kann nur ein Zugang angeordnet werden, so muss diese einseitige Zugangssituation an anderen Haltestellen kompensiert werden. Die Fahrgäste sind zudem über die Verhältnisse am Zielort meist besser im Bild als im Nahverkehr und richten sich stark darauf aus. Von besonderer Bedeutung ist deshalb die Konzipierung der Hauptstationen, da diese die Fahrgastverteilung auf dem ganzen Netz steuern.

6.33

Perronhöhen

Durch ebene Einstiege lässt sich die Fahrgastwechselzeit gegenüber einem Stufen-einstieg um rund 30 % reduzieren. Darum, aber auch im Hinblick auf bewegungsbehinderte Fahrgäste, ist ein stufenloser Einstieg anzustreben. Aus Sicht des Fahrgastwechsels lassen sich folgende Anforderungen formulieren:

- Ebene oder quasi-ebene Einstiegsverhältnisse: Wenn technisch und finanziell machbar ist eine genaue Höhenangleichung von Perron und Wagenboden wünschbar. Andernfalls 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. Eine Spaltbreite von über etwa 200 mm macht allerdings einen Teil der günstigen Auswirkungen eines stufenlosen Einstieges zunichte.
- Ergonomisch günstige Treppenmasse: Ist eine Treppe unvermeidlich, so ist zumindest auf ein nach den Regeln der Ergonomie gemäss Abschnitt 2.22 ausgebildetes und regelmässiges Stufenmass zu achten. Als ungünstig haben sich stark unterschiedliche Treppenstufen erwiesen. Die häufige Forderung, wonach der Wagenboden nicht tiefer als der Perron liegen dürfe, lässt sich hingegen nicht bestätigen.

Ob diese Anforderungen 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 sowie die städtebauliche Integration den Ausschlag geben.

6.4
6.41**Folgerungen bezüglich der Systemkomponente Fahrzeug
Einstiegsbreite und Türzahl**

Bei der Fahrzeuggestaltung stellt sich die Frage, ob die Gesamttürbreite auf viele schmale oder wenige breite Türen verteilt werden soll. Je stärker die Fahrgastwechselzeit an den einzelnen Türen streut, aber auch je mehr Türen vorhanden sind, desto kleiner ist der Wirkungsgrad des Türsystems. Bei zahlreichen schmalen Türen wirkt sich deren kleine Streuung günstig, deren grosse Anzahl aber ungünstig aus. Entgegengesetzt verhält es sich bei wenigen breiten Türen. Um einen Anhaltspunkt in dieser Optimierung zu erhalten, wurde mit ACoST, NeXT die Fahrgastwechselzeit von Kursen mit gesamten Türbreiten von 5 und 10 m unter folgenden Annahmen berechnet:

- Spezifische Türbelastung: 50 P/m
- Höhendifferenz: 0.00 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 etwa 1.00 m ist allerdings kein entscheidender Rückgang der Fahrgastwechselzeit mehr zu erwarten. Über etwa 1.25 m steigt sie dagegen so rasch an, dass breitere Türen rein wirtschaftlich begründet sein müssen. Hinzu kommt, dass Türen von über etwa 1.50 m nicht die volle spezifische Leistungsfähigkeit erreichen, weil bei ihnen das Zuströmen der Fahrgäste massgebend wird. Wenige breite Türen sind somit bezüglich der Fahrgastwechselzeit vielen schmalen Türen bei gleicher gesamter Türbreite keineswegs gleichwertig.

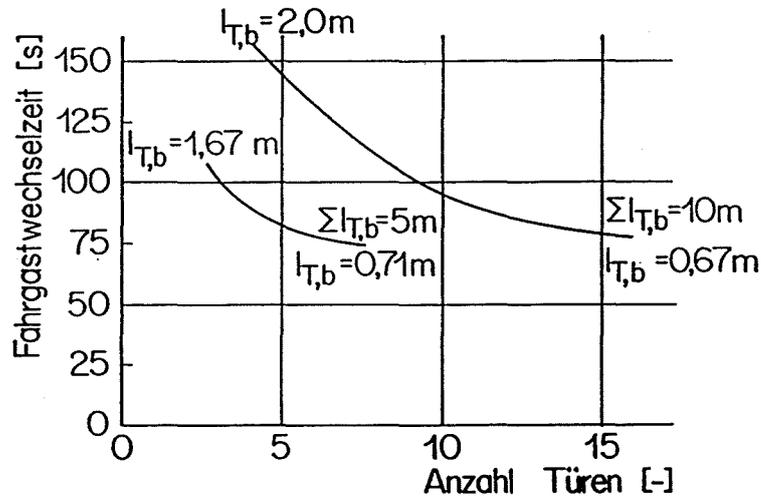


Abb. 120

Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse in Funktion der Türbreite und Türzahl für eine spezifische Türbelastung von 50 P/m und eine Höhendifferenz von 0,00 m; konstante gesamte Türbreite von 5 und 10 m.

6.42

Einstiegsverteilung

Eine ungleichmässige Türverteilung führt zur unterschiedlichen Beanspruchung der Einstiege. Die Türverteilung ist dann optimal, wenn das Verhältnis der Einzugsgebiete und dasjenige der Türleistungsfähigkeiten übereinstimmen. Eine Tür mit grossem Einzugsgebiet muss durch Tiefeinstieg und/oder eine grosse Breite eine entsprechende Leistungsfähigkeit erhalten. Da die Fahrgäste in der Regel in der Nähe ihrer Einstiegtüre verweilen, müssen zudem die einer Türe zugeordneten Fahrzeugbereiche ein auf deren Leistungsfähigkeit abgestimmtes Fassungsvermögen aufweisen.

6.43

Gangbreiten und Drängelräume

Soll der Ein- und Ausstiegevorgang reibungslos vonstatten gehen, so müssen die Türleistungsfähigkeit und die Leistungsfähigkeit der Verbindungswege im Fahrzeug aufeinander abgestimmt sein. Letztere können als Fussgängeranlagen modelliert werden. Auch für die Fahrgastbewegung im Fahrzeug gilt, dass eine hohe Personendichte unangenehm ist und eine höhere Dichte des Fahrgaststromes als LOS E bis F nicht erreicht wird. Die spezifischen Leistungsfähigkeiten betragen damit:

- Fahrzeuggänge $l_s = 1.06 \text{ P/sm}$
- Treppen im Fahrzeug $l_s = 0.86 \text{ P/sm}$

Daraus sowie aus der spezifischen Leistungsfähigkeit der Fahrzeugeinstiege lässt sich nunmehr der erforderliche Gang- und Treppenquerschnitt errechnen. Es zeigt sich, dass für einen optimalen Fahrgastfluss meist ein beidseitiger Abfluss von der Türe zum Fahrgastraum notwendig ist.

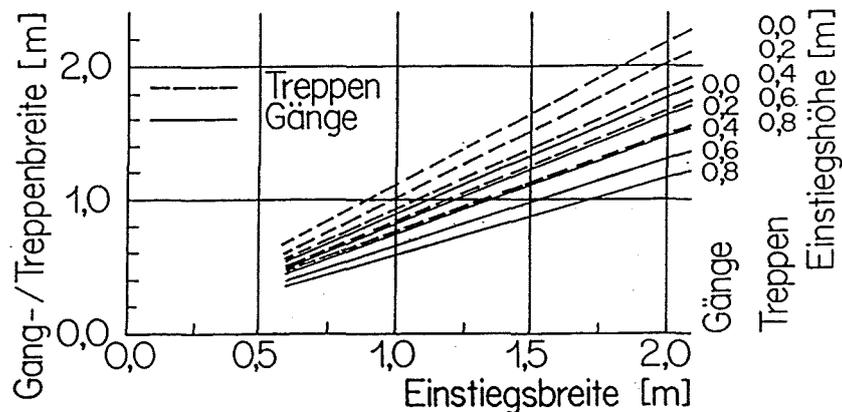


Abb. 121

Erforderliche lichte Breiten von Gängen und Treppen in Fahrzeugen in Abhängigkeit von der Einstiegshöhe und der Türbreite.

Da die Leistungsfähigkeit eines Einstieges eine lineare Funktion der lichten Breite ist, vermindern Fahrgäste, welche bei der Tür stehen, die Türkapazität spürbar, sobald sie in den Querschnitt ragen. Da sich aus den genannten Gründen häufig Fahrgäste in Türnähe aufhalten, müssen beldseits der Türen sogenannte Drängelräume von rund 0,30 m Tiefe vorgesehen werden.

6.44

Fahrgastwechselzeiten ausgewählter Einstiegskonzepte

6.44.1

Vorbemerkung

Um die Sensitivität der Fahrgastwechselzeit auf Parameter wie Türzahl, Türbreite und Einstiegshöhe aufzuzeigen, wurden ausgewählte Vollbahnzüge, Stadtbahnwagen und Autobusse auf ihre Fahrgastwechseleigenschaften hin untersucht. Bei den Stadtbahnwagen und Autobussen wurde eine theoretische Stehplatzbelegung von 6 P/m^2 angenommen, bei den Vollbahnzügen wurden lediglich Sitzplätze in Rechnung gestellt. Bezüglich der Perronhöhe wird bei den Vollbahnzügen von 0,55 m und bei den Stadtbahnen und Autobussen von 0,15 m ausgegangen. Es wird ein Einsteiger-Aussteiger/Verhältnis von 1 : 1 angenommen. Generell lassen die Fallbeispiele erkennen, dass vor allem der Zahl der Türen eine überragende Bedeutung zukommt.

6.44.2

Vollbahnfahrzeuge

Um die Vergleichbarkeit der Vollbahnzüge sicherzustellen wurde ein Fassungsvermögen der Kompositionen von rund 600 Personen festgesetzt. Unabhängig von der Praxis wurden nur Wagen 2. Klasse eingerechnet.

Tab. 16

Ausgewählte Vollbahnfahrzeuge.

Fahrzeugtyp	Nr.	Türzahl	Plätze/ Wagen	Anzahl Wagen	Plätze/ Kurs	Kurs- länge
Mitteleinstlegswagen SBB, 1953	1	1	80	8	640	181,6
Einheitswagen IV SBB, 1983	2	2	86	7	602	184,8
Nahverkehrswagen DB, Bnp 719	3	2	78	8	624	211,2
S-Bahn-Wagen DB, Bx 794	4	3	80	8	640	212,0
S-Bahn-Triebzug BR 420	5	4	65	9	582	202,2
Abteilwagen C4 Sa 13	6	9	74	8	592	147,0
Doppelstock-Standardwagen DR	7	2	110	6	660	160,8
Doppelstockwagen SBB	8	2	136	5	680	134,0
Doppelstockwagen DByg 546	9	3	96	6	576	134,4

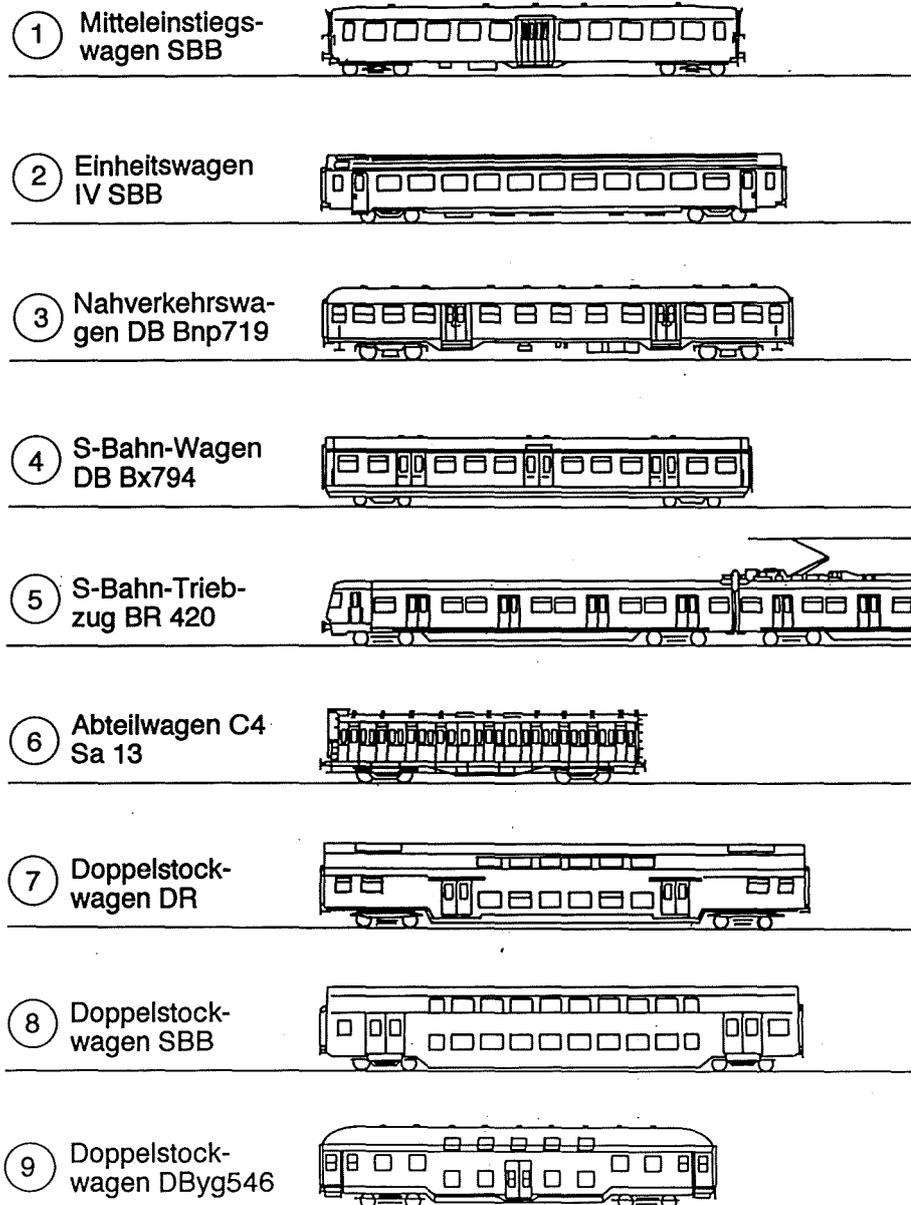


Abb. 122

Schemazeichnungen der untersuchten Vollbahnzüge.

Die Vollbahnzüge zeigen die theoretisch postulierte starke Abhängigkeit der Fahrgastwechselzeit ganzer Kurse von der Streuung an den einzelnen Türen. Generell schneiden daher die Fahrzeuge mit breiten Türen schlecht ab. Bemerkenswert ist namentlich die Überlegenheit des Doppelstockwagens der DR mit Tiefeinstieg (7) gegenüber dem Doppelstockwagen der SBB mit Treppeneinstieg (8). Allerdings erzielt auch der DR-Wagen nicht die günstigen Fahrgastwechselzeiten der BR 420 der DB (5). Keinen grossen weiteren Vorteil bringen dagegen - gemessen an den Nachteilen - Einstiege in jedes Abteil wie beim sächsischen Abteilwagen (6).

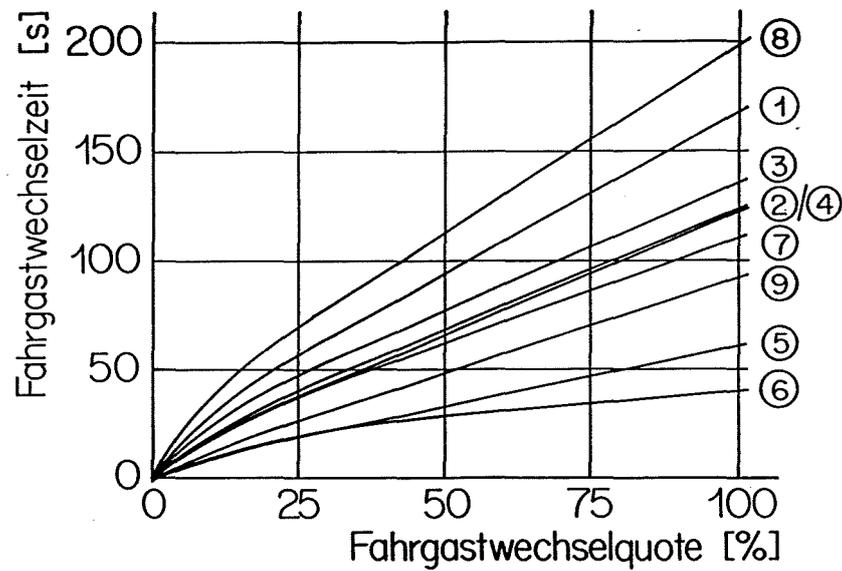


Abb. 123

Fahrgastwechselzeiten der ausgewählten Vollbanfahrzeuge, dargestellt als Funktion der Fahrgastwechselquote (Fahrgastwechselzahl bezogen auf das Fassungsvermögen).

6.44.3

Stadtbahnfahrzeuge

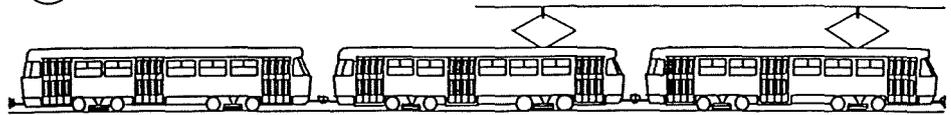
Bei den Stadtbahnfahrzeugen handelt es sich um zwei Hochflur-, ein Mittelflur- und drei Niederflurfahrzeuge.

Tab. 17

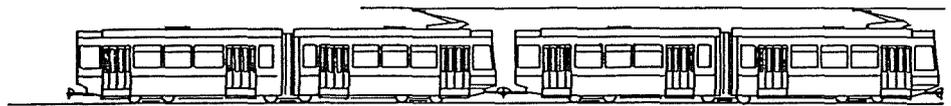
Ausgewählte Stadtbahnfahrzeuge.

Fahrzeugtyp	Beispiel	Türzahl	Plätze/Wagen	Anzahl Wagen	Plätze total
Tatra T4D + T4D + B4D	11	3	119	3	356
Stadtbahn Zürich, Serie 2001 ff.	12	4	157	2	314
Mittelflurstadtbahn Genf	13	4	170	2	340
Niederflurstadtbahn Bern	14	6	260	1	260
Niederflurstadtbahn Kassel	15	5	230	1	230
Niederflurstadtbahn Bremen	16	4	222	1	222

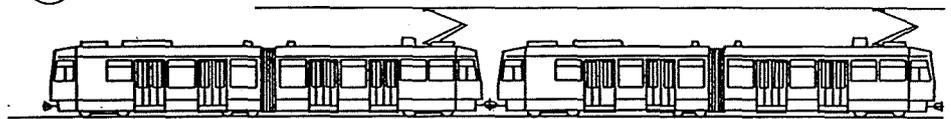
⑪ Tatra T4D + T4D + B4D



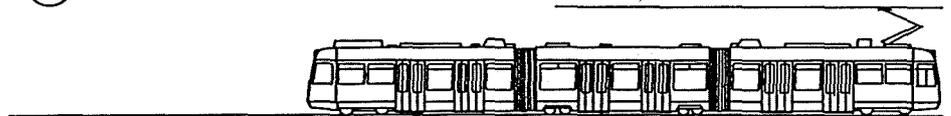
⑫ Stadtbahn Zürich, Serie 2001 ff.



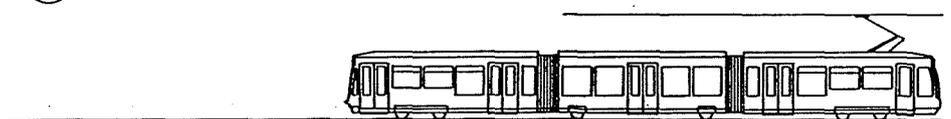
⑬ Mittelflurstadtbahn Genf



⑭ Niederflurstadtbahn Bern



⑮ Niederflurstadtbahn Kassel



⑯ Niederflurstadtbahn Bremen

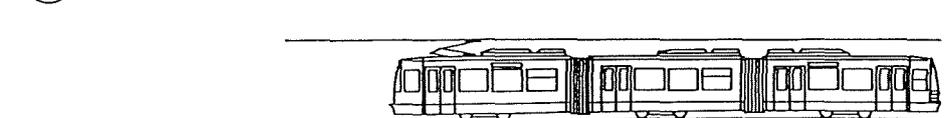


Abb. 124

Schemazeichnung der untersuchten Stadtbahnfahrzeuge.

Ungünstige Fahrgastwechselzeiten zeigen die konventionellen Typen, indem die Fahrgastwechselzeit eines Tatra-Zuges T4D (11) gegen 30 % höher ist als jene der Niederflurstadtbahn von Bern (14). Der Grund für das mässige Abschneiden der Niederflurfahrzeuge von Kassel und Bremen liegt in Ihrer vergleichsweise kleinen Türzahl und der ungleichmässigen Türverteilung.

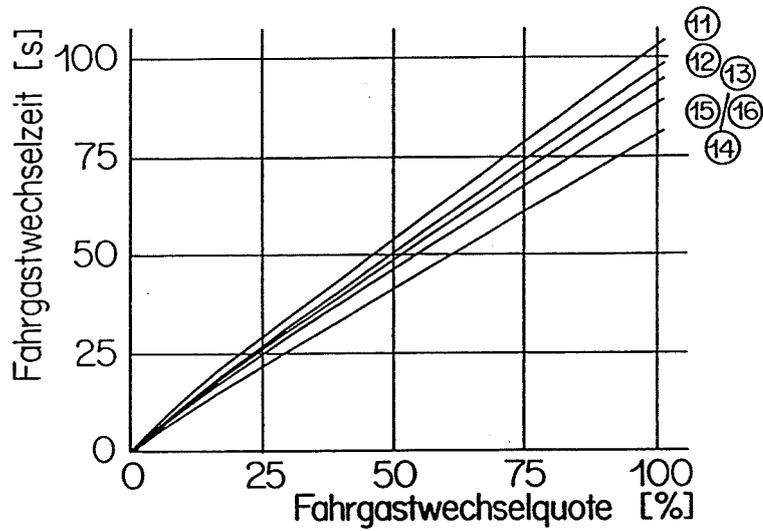


Abb. 125

Fahrgastwechselzeiten von ausgewählten Stadtbahnfahrzeugen, dargestellt in Funktion der Fahrgastwechselquote (Fahrgastwechselzahl bezogen auf das Fassungsvermögen).

6.44.4

Autobusse

Bei den Autobussen wurden Hoch- und Niederflurfahrzeuge sowie Standard- und Gelenkbussen berücksichtigt.

Tab. 18

Ausgewählte Autobusse.

Fahrzeugtyp	Beispiel	Türzahl	Plätze/ Wagen
Stadtliniibus I	21	2	95
Autobus Saurer SH 560-25	22	3	98
Gelenkbus Mercedes O 405 G	23	3	134
Niederflurbus NEOPLAN, 2 Türen	24	2	95
Niederflurbus NEOPLAN, 3 Türen	25	3	98
Niederflurgelenkbus NEOPLAN	26	3	134
Niederflur-Gelenktrolleybus BVB	27	4	151

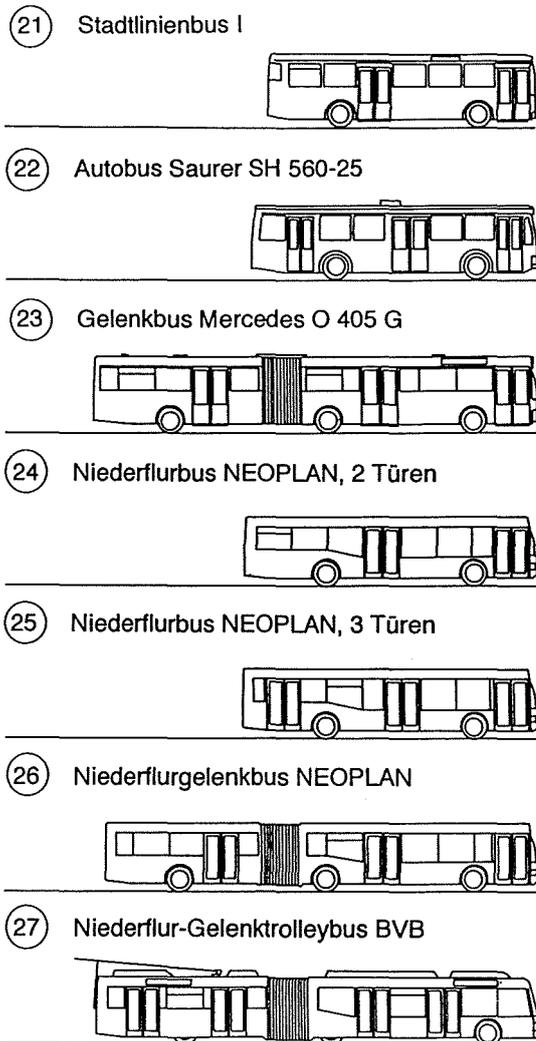


Abb. 126

Schemazeichnung der untersuchten Autobusse.

Eindeutig nachweisen lässt sich der Vorteil der dritten Türe bei Standardbussen, indem die Fahrgastwechselzeit eines zweitürigen Autobusses (21) um rund einen Viertel über jener eines vergleichbaren dreitürigen Fahrzeuges (22) liegt. Sogar um rund 70 % übertrifft die Fahrgastwechselzeit eines zweitürigen Standardbusses jene eines dreitürigen Niederflurbusses (25). Ähnliches gilt, wenn auch weniger ausgeprägt, für den Vergleich zwischen einem dreitürigen Hochflurgelenkbus und dem viertürigen Gelenkrolleybus der BVB Basel (27) mit einem Mehrbedarf des ersteren von rund 40 %.

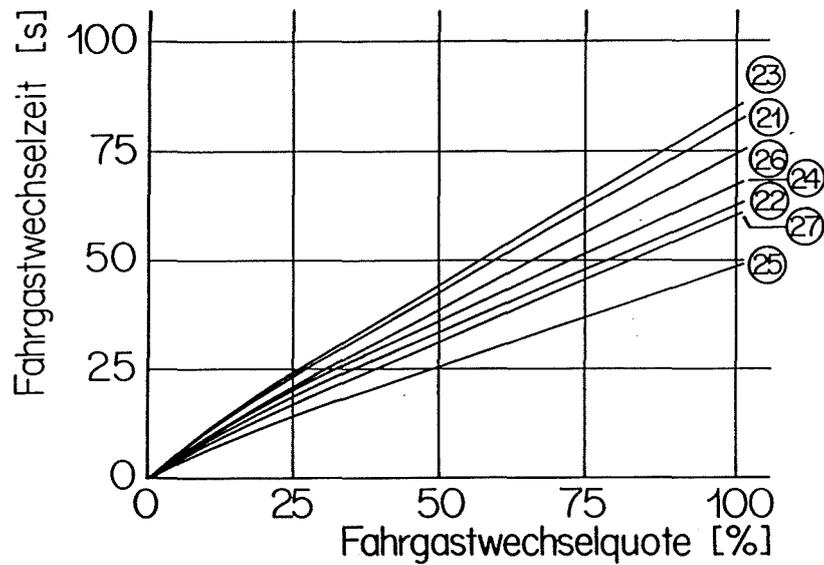


Abb. 127

Fahrgastwechselzeiten der ausgewählten Autobusse, dargestellt in Funktion der Fahrgastwechselquote (Fahrgastwechselzahl bezogen auf das Fassungsvermögen).

6.5

6.51

6.51.1

Folgerungen bezüglich der Systemkomponente Betrieb Ungestörter Betrieb

Die Umlaufzeit

Die Umlaufzeit setzt sich aus folgenden Elementen zusammen:

- Fahrzeit t_f : Die Fahrzeit ist jene Zeit, während welcher ein Kurs in Bewegung ist.
- Haltezeit t_H : Die Zeit, während der ein Kurs an einer Haltestelle steht, ist die Haltezeit.
- Verlustzeit t_V : Verlustzeiten treten infolge störungsbedingt verlangsamter Fahrweise oder nicht vorgesehener Halte auf.
- Wendezeit t_W : An den Endhaltestellen werden bestimmte Reservezeiten - die Wendezeiten - zur Stabilisierung des Fahrplanes und für die Obliegenheiten des Personals vorgesehen.

Auf die Fahrzeit, die Wendezeit und die Verlustzeit wird hier nicht näher eingegangen.

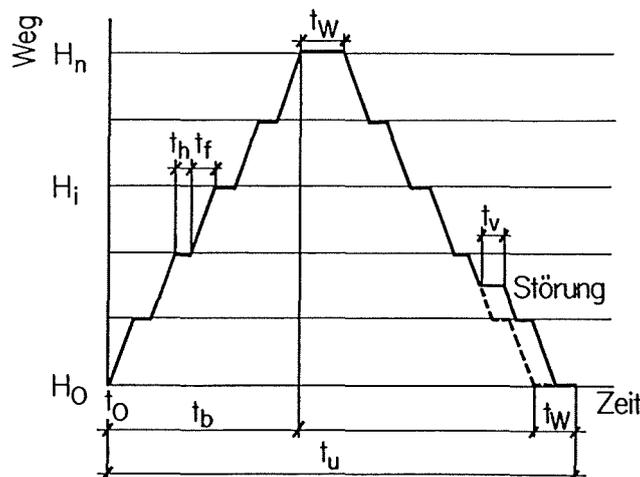


Abb. 128

Die Umlaufzeit und ihre Komponenten.

$$(55) \quad t_{T,tot} = \frac{l_{T,bi}}{n_{T,F} \cdot v_{T,F}} + t_{T,S} + t_{T,T}$$

wobei	$t_{T,tot}$	Gesamte Türbewegungszeit [s]
	$n_{T,F}$	Zahl der Türflügel [-]
	$v_{T,F}$	Bewegungsgeschwindigkeit der Türflügel [m/s]
	$t_{T,S}$	Zusätzliche Zeitanteile für das Ein- und Ausschwenken bei Schwenkschiebetüren [s]
	$t_{T,T}$	Zusätzliche Zeitanteile für das Ein- und Ausklappen von Treppen, Trittbrettern oder Schiebetritten, sofern dies nicht simultan mit der Türbewegung erfolgt [s]

$v_{T,F}$ wird limitiert durch die Beschleunigungskräfte sowie durch den Schutz von Menschen oder Gegenständen vor Verletzung oder Beschädigung. Hohe Bewegungsgeschwindigkeiten werden bei Falttüren erreicht, während Schwenkschiebetüren wesentlich langsamer sind. Überschlägig kann bei Falttüren mit 0.4 m/s und bei Schwenkschiebetüren mit 0.2 m/s gerechnet werden.

Die Mindestoffenzeit stellt sicher, dass sich eine Türe nicht unmittelbar vor einem Fahrgast schliesst. Deren Länge ist von den Zeitlücken abhängig und liegt im Mittel bei etwa 2.5 s. Bei ebenen Einstiegen kann sie gesenkt und eine Zwangsschliessvorrichtung vorgesehen werden.

Ein massgeblicher Zeitverlust kann schliesslich durch die Fahrzeugsteuerung auftreten. Dieser Zeitanteil hat die Tendenz, bei elektronischen Fahrzeugsteuerungen grösser zu sein als bei Direktkontroller- und Hüpfsteuerungen.

Aus den Reaktionszeiten, Türbewegungszeiten und Mindestoffenzeiten kann eine Latenzzeit I von 2 s, eine Latenzzeit II von 6 s und eine gesamte feste Haltezeit von 8 s abgeleitet werden. Dabei gliedert sich die Latenzzeit II in folgende Anteile:

•	Mindestoffenzeit	2.5 s
•	Türschliesszeit	2.0 s
•	Reaktionszeiten bis zum Anfahrdruck	1.5 s

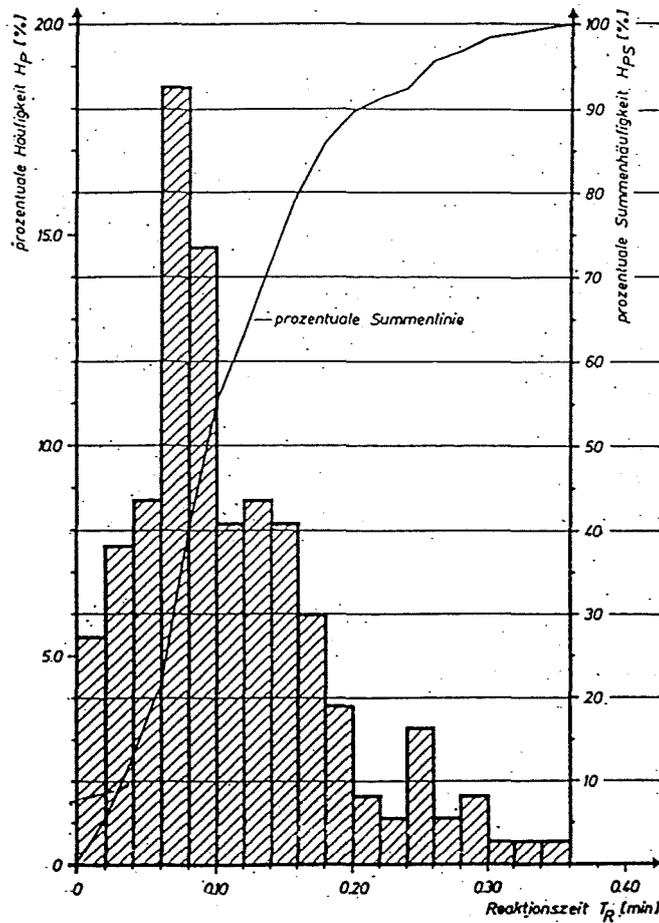


Abb. 130

Empirische Verteilung der Latenzzeit II am Beispiel der Fernverkehrszüge B in grossen Personenbahnhöfen der DB [111].

Eine Untersuchung im Jahre 1938 ergab für die Latenzzeit II den höheren Wert von 15.9 s. Dies ist namentlich darauf zurückzuführen, dass damals Dampfbetrieb vorherrschte und bis zum Anfahren einer Dampflokomotive mehr Handgriffe vorzunehmen sind.

6.51.3

Mittelwerte der Haltezeit und Anteil an der Beförderungszeit

Die starken Schwankungen der Fahrgastwechselzahlen sowie die unterschiedlichen festen Haltezeiten schränken die Aussagekraft eines Mittelwertes für die Haltezeit ein. Die folgende Zusammenstellung kann daher nur Anhaltspunkte geben:

Tab. 19

Haltezeiten nach Verkehrsmittel; Mittelwerte und Extremwerte. Der Mittelwert gilt vorwiegend für innerstädtische Verhältnisse.

Kennwert	Verkehrsmittel			
	S-Bahn	U-Bahn	Strassenbahn	Autobus
Mittelwert	29 s	25 s	25 s	24 s
Kleinste Angabe	15 s	10 s	10 s	7 s
Grösste Angabe	60 s	47 s	60 s	55 s

Die mittlere Haltezeit aller Verkehrsmittel liegt bei 25 bis 30 s. Dies ist plausibel, da vergleichbare Türbelastungen vorliegen.

Die reine Fahrzeit im strassenabhängigen öffentlichen Verkehr beträgt 64 % der Beförderungszeit, bei S-Bahnen sind es um 81 %. Von den Haltezeiten entfallen 61 % auf die Fahrgastwechselzeit und 39 % auf die Latenzzeiten. Die Störungen an Lichtsignalanlagen können auf 63 % der gesamten Störungsverlustzeiten geschätzt werden. Die übrigen 37 % werden durch andere Störquellen verursacht.

Tab. 20

Zeitanteile der Beförderungszeit; gesamte Beförderungszeit = 100 %.

Verkehrsmittel	Fahrzeit	Fahrgastwechselzeit	Fixe Haltezeiten	Signalverlustzeiten	Übrige Verlustzeiten
S-Bahn	81 %	12 %	7 %	0 %	0 %
Strab	61 %	12 %	7 %	13 %	7 %
Autobus	66 %	10 %	7 %	11 %	6 %

Der beträchtliche Anteil der festen Haltezeitanteile zeigt, dass sich die Beförderungszeit auch durch rasche Türmechanismen und knappe Mindestoffenzeiten sowie durch eine optimale Verknüpfung der Prozesse des Haltevorganges massgeblich verkürzen lässt.

6.51.4

Einfluss des Tiefeinstiegs auf die Beförderungszeit

Einer Abschätzung des Einflusses einer reduzierten Einstiegshöhe auf die Beförderungszeit von Strassenbahn- und Autobuslinien wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- Der Zeitanteil des Fahrgastwechsels an der Beförderungszeit beträgt bei einem konventionellen Fahrzeug 11 %.
- Die Zahl und Breite der Fahrzeugtüren bleibt für alle betrachteten Einstiegshöhen gleich. Die Fahrgastwechselzeit verändert sich somit proportional zum Einfluss der Höhendifferenz.
- 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.

Die Berechnungen zeigen, dass der Einfluss des Tiefeinstieges vor allem bei langen und langsamen Linien zum Tragen kommt. Die eingesparte Fahrgastwechselzeit erreicht bei einer Linienlänge von über 8 bis 10 km eine Grössenordnung, welche die Einsparung eines Kurses ermöglicht. Allerdings handelt es sich bei der Kurszahl um eine Sprungfunktion. Unter bestimmten Umständen kann daher schon ein kleiner Beförderungszeitgewinn zu einer Kurselinsparung führen, während in einem anderen Fall auch grössere Zeitgewinne nicht genutzt werden können.

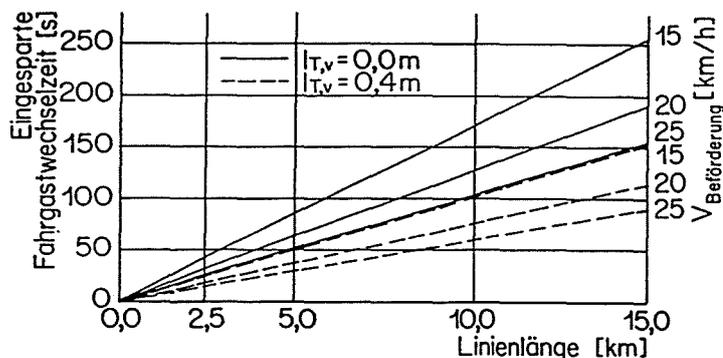


Abb. 131

Eingesparte Fahrgastwechselzeiten durch tiefgelegte Fahrzeugeinstiege in Funktion der Einstiegshöhe, der Reisegegeschwindigkeit und der Linienlänge.

6.51.5

Einfluss der Einstiegsgestaltung auf die Streckenleistungsfähigkeit

Die Streckenleistungsfähigkeit ist gegeben durch den Quotienten aus Fassungsvermögen pro Zug und minimaler Zugfolgezeit. Für die minimale Zugfolgezeit ist in der Regel der Haltestellenblock massgebend. Die Aufenthaltsdauer eines Zuges setzt sich hier zusammen aus:

- der reinen Fahrzeit für die gegebene Blocklänge und Auflösedistanz
- den Reaktionszeiten der Sicherungsanlagen
- den Fahrzeitreserven
- den festen Haltezeitanteilen
- der Fahrgastwechselzeit

Der Einfluss der Fahrgastwechselzeit auf die Streckenleistungsfähigkeit lässt sich mittels einer Abschätzung am Beispiel der S-Bahn München aufzeigen. Es wurden folgende Fahrzeugkonzepte zugrundegelegt:

- BR 420 in Dreifachtraktion (kurz BR 420), neun nutzbare Fahrzeuge mit 36 Türen zu je 1 m.
- Doppelstocktriebwagenzug (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.

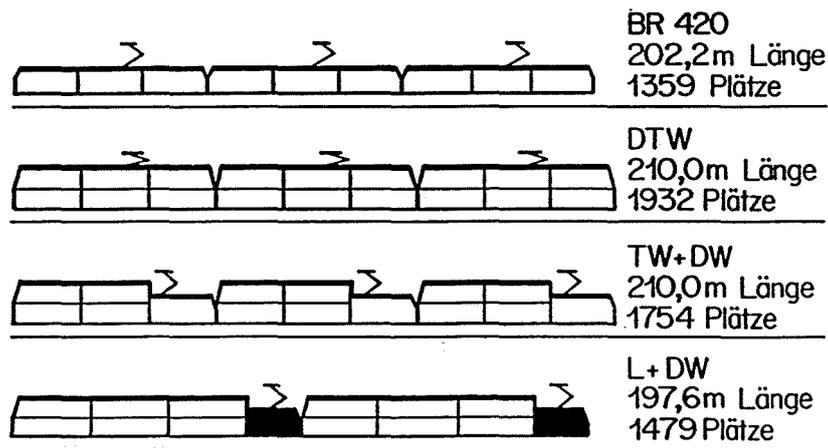


Abb. 132

Untersuchte Zugkompositionen im Fallbeispiel der Kapazitätsschätzung der S-Bahn München.

Als Perronlänge wurden 210 m angenommen, als Perronhöhe 960 mm. Bei den Doppelstockvarianten wurden Wagenbodenhöhen von 1183 mm (Hocheinstieg wie Doppelstockwagen der NS) und 1030 mm (Tiefeinstieg wie BR 420 der DB) unterschieden. Die reinen Fahrzeiten seien für alle Züge gleich, ebenso die festen Haltezeitanteile.

Als Referenzwert wurde für die BR 420 eine Fahrgastwechselzeit von 20 s eingesetzt, welche für die anderen Fahrzeuge hochgerechnet wurde. Mit der minimalen Zugfolgezeit von 126 s der BR 420 und der maximal zulässigen Streckenauslastung von 90 % konnte die Streckenkapazität ermittelt werden:

Tab. 21

Zugfolgezeiten, Zugzahlen und Streckenkapazität der S-Bahn München anhand einiger beispielhafter Zugkompositionen. Basis für das Fassungsvermögen: 6.7 P/m bei einstöckigen Fahrzeugen; 9.2 P/m bei doppelstöckigen Fahrzeugen.

Zugs- typ	Fassungs- vermögen	Zugfolgezeit [s]		Zugzahlen [h ⁻¹]		Streckenkapazität [P/h]	
		Hoch- einstieg	Tief- einstieg	Hoch- einstieg	Tief- einstieg	Hoch- einstieg	Tief- einstieg
BR 420	1359 P = 100 %	-	126	-	25.7	-	34'926
DTW	1932 P = 142 %	151	140	21.5	23.1	41'538	44'629
TW + DW	1754 P = 129 %	151	140	21.5	23.1	37'711	40'517
L + DW	1479 P = 109 %	157	145	20.6	22.3	30'467	32'982

Die Rechenergebnisse lassen folgendes erkennen:

- Bei gleichen Traktionseigenschaften und ebenem Einstieg kann mit klassischen Doppelstockwagen maximal eine Leistungssteigerung der Strecke um etwa 28 % erzielt werden. Das um 37 % höhere Fassungsvermögen der Doppelstockwagen kann Infolge längerer Fahrgastwechselzeiten nur teilweise in eine höhere Streckenkapazität umgesetzt werden.
- Beim Lokkonzept (L+DW) sinkt die Streckenleistungsfähigkeit Infolge der längeren Fahrgastwechselzeiten und der Verlustlängen der Lokomotiven trotz des grösseren Fassungsvermögens der einzelnen Fahrzeuge sogar ab.
- Eine kleinere Einstieghöhe bringt im vorliegenden Fallbeispiel eine Erhöhung der Streckenleistungsfähigkeit um 7 bis 8 %.

6.52

Gestörter Betrieb

6.52.1

Fahrplanabhängigkeit des Fahrgastzustromes

Bei kurzen Takten bleibt die Störung des Fahrtverlaufes eines Kurses nicht auf diesen beschränkt, sondern es setzt sich ein dynamischer Störungsmechanismus in Gang, der auch die Folgekurse beeinträchtigt. Die Ursache liegt in der nahverkehrs-typischen Eigenheit, dass sich die Fahrgäste erst mit steigender Kursfolgezeit auf den Fahrplan ausrichten: Bei Kursfolgezeiten von unter 5 Minuten ist der Fahrgastzugang konstant, über 15 Minuten wird er vom Fahrplan bestimmt. Im Intervallbereich zwischen 5 und 15 Minuten bestehen abweichende Beobachtungen:

- Die Anpassung der Fahrgäste ist in der Morgenspitze bereits bei kleineren Taktfolgen spürbar als am Abend.
- Die Anpassung ist abhängig von der Merkbarekeit der Kursfolgezeiten. Wiederholen sich die Abfahrtszeiten stündlich, so ist sie besonders ausgeprägt.
- Die Fahrplanzuverlässigkeit, der Fahrtzweck und die Haltestellenausstattung können zu einem örtlich unterschiedlichen Fahrgastverhalten führen.

Im folgenden wird gezeigt, dass die Störungsübertragung durch günstige Einstiegsverhältnisse wesentlich gedämpft werden kann.

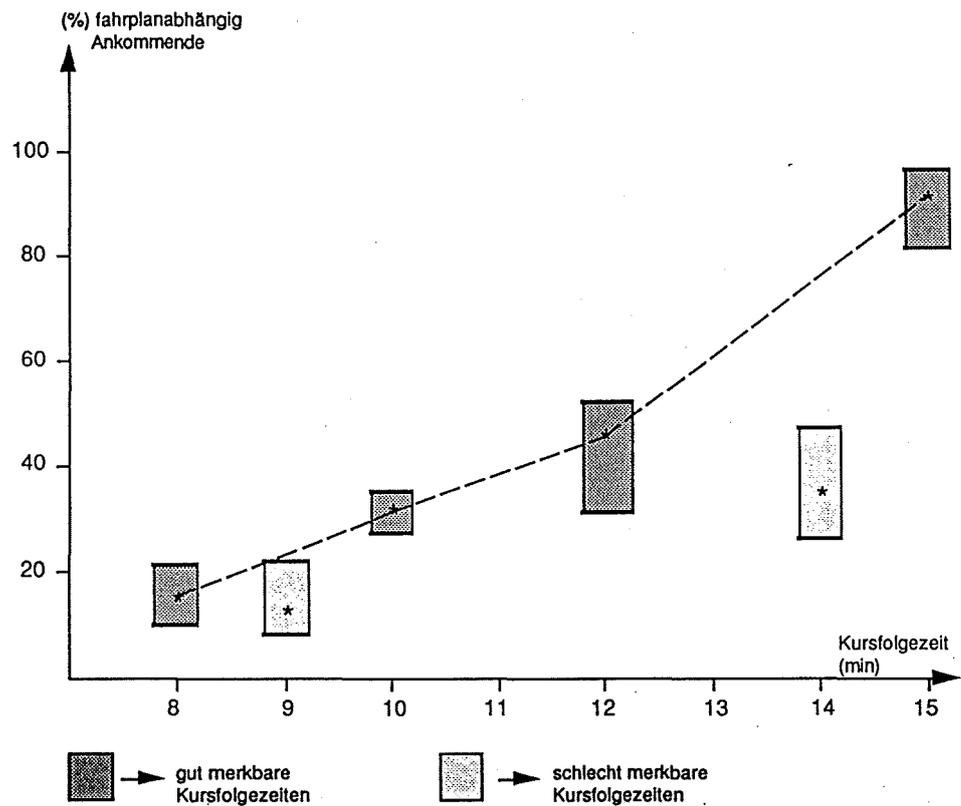


Abb. 133

Fahplanorientiertes Verhalten der Fahrgäste in den Nebenverkehrszeiten in Funktion der Taktfolge ([11] nach [55]).

6.52.2

Mechanismus der Störungsaufschaukelung

Erleidet ein Kurs eine Initialverspätung, so warten bei einem Fahrplanktakt von unter etwa 10 Minuten an der nächsten Haltestelle mehr Fahrgäste als üblich, wodurch sich die Fahrgastwechselzeit verlängert, der Besetzungsgrad erhöht und die Verspätung vergrößert. Der Folgekurs findet weniger Fahrgäste vor als geplant und wird verfrüht. Dessen zeitliche Distanz zum Folgekurs erstreckt sich wiederum, sodass dieser - obwohl schon nicht initial gestört - mit einer höheren Fahrgastzahl konfrontiert und verspätet wird. Der geschilderte Mechanismus wird als Störungsaufschaukelung bezeichnet und führt abwechslungsweise zur Zusammenballung von Kursen und zur Überdehnung der Intervalle.

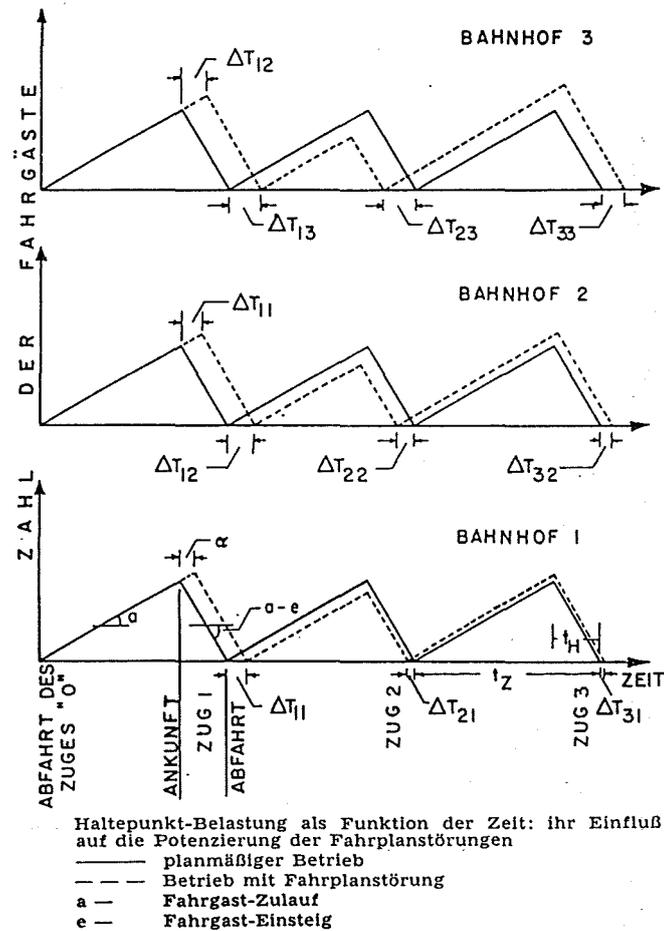


Abb. 134

Haltepunktbelastung in Funktion der Zeit bei gestörtem Betrieb im Nahverkehr [94].

Eine Störungsübertragung zwischen Kursen verschiedener Linien auf einer Gemeinschaftsstrecke erfolgt, wenn diese aufgrund ihrer Länge von der Mehrheit der Fahrgäste als einzige Linie wahrgenommen werden. Als untere Grenzwerte dafür gelten 1000 bis 2000 m im Kernbereich eines Netzes und 3000 bis 4000 m auf Aussenstrecken, wobei sich die höheren Werte auf schwächer belastete Strecken beziehen (20 Kurse pro Stunde), die niedrigeren Werte auf stark belastete Strecken (40 Kurse pro Stunde).

6.52.3

Verspätung des initial gestörten Kurses

Die mathematische Abbildung der Störungsaufschaukelung ist komplex, weshalb die klassischen Modelle auf folgenden Vereinfachungen beruhen:

1. Es besteht keine Fahrzeitreserve.
2. Der Fahrgastzufluss an jeder Haltestelle ist konstant.
3. Die Fahrgastwechselzeit ist linear von der Zahl der Einsteiger abhängig.
4. Die Fahrzeit aller Kurse zwischen zwei Haltestellen ist gleich.
5. Die Fahrgastwechselzeiten an allen Haltestellen sind im Regelfall identisch.

Durch die Identität der einsteigenden Fahrgäste eines Kurses mit der Zahl der Fahrgäste, welche bis zum Schliessen der Türe zur Haltestelle gelangen, gilt:

$$(56) \quad t_{H,F} \cdot e = t_K \cdot f$$

wobei	$t_{H,F}$	Fahrgastwechselzeit an einer Haltestelle im fahrplanmässigen Fall [s]
	t_K	Kursfolgezeit [s]
	e	Zahl der Einsteiger pro Zeiteinheit [P/s]
	f	Zahl der zuströmenden Fahrgäste pro Zeiteinheit [P/s]

e entspricht der effektiven Türleistungsfähigkeit L , weshalb (56) umgeformt werden kann:

$$(57) \quad t_{H,F} = \frac{f \cdot t_K}{L}$$

wobei L Leistungsfähigkeit des Türsystems [P/s]

Im Störfall verlängert sich die Zeit, während welcher sich Fahrgäste an der Haltestelle $H1$ sammeln, um die Initialstörung $t_{St1/0}$ sowie um den Zuwachs der Fahrgastwechselzeit $\Delta t_{H,F1/1}$, sodass die Zahl der Fahrgäste anwächst:

$$(58) \quad F1/1 = f \cdot (t_{NF} + t_{St1/0} + t_{H,F} + \Delta t_{H,F1/1})$$

$$(59) \quad E1/1 = L \cdot (t_{H,F} + \Delta t_{H,F1/1})$$

wobei	$F1/1$	Zahl der zuströmenden Fahrgäste des Kurses 1 an der Haltestelle $H1$ im Störfall des Kurses $K1$ [P]
	$E1/1$	Zahl der Einsteiger des Kurses $K1$ an der Haltestelle $H1$ im Störfall [P]
	t_{NF}	Anteil der Kursfolgezeit ohne Fahrgastwechsel [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]

Zur Berechnung der Zielgrösse $\Delta t_{H,F1/1}$ wird zunächst $t_{H,F}$ eliminiert:

$$(60) \quad t_{H,F} = \frac{f \cdot t_{NF}}{L - f}$$

Nach Umformungen wird $\Delta t_{H,F1/1}$:

$$(61) \quad \Delta t_{H,F1/1} = t_{St1/0} \cdot \frac{f}{L - f}$$

Nun lässt sich ein Aufschaukelungsfaktor γ einführen:

$$(62) \quad \gamma = \frac{f}{L - f} = \frac{t_{H,F}}{t_K - t_{H,F}}$$

Zu beachten ist in (62), dass nur die reine Fahrgastwechselzeit in die Rechnung eingeht, da die Latenzzeiten definitionsgemäss konstant sind. Die Störung nimmt nach der h -ten Haltestelle den Wert $t_{St1/h}$ an:

$$(63) \quad t_{St1/h} = t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma)^h$$

6.52.4

Verfrühung des Folgekurses

Nun trifft der Folgekurs K2 an der Haltestelle H1 ein. Seit der Wegfahrt des Kurses K1 ist weniger als der planmässige Zeitraum verstrichen. Die Zahl der wartenden Fahrgäste von K2 beträgt dadurch nicht F, sondern $F_{2/1}$.

$$(64) \quad F_{2/1} = f \cdot (t_K - t_{H,F} - t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma) + t_{H,F2/1})$$

wobei $F_{2/1}$ Zahl der Fahrgäste für den Kurs K2 an der Haltestelle H1 im Stö-
rungsfall [P]
 $t_{H,F2/1}$ Haltezeit des Kurses K2 an der Haltestelle H1 im Stö-
rungsfall [s]

Die Fahrgastwechselzeit des Kurses K2 wird zu:

$$(65) \quad t_{H,F2/1} = \frac{f}{L - f} \cdot (t_K - t_{H,F} - t_{St1/0} \cdot (1 + \gamma))$$

Die störungsbedingte Verfrühung von K2 nach der Haltestelle Hh lässt sich nunmehr geschlossen darstellen:

$$(66) \quad t_{St2/h} = t_{St1/0} \cdot \sum_{i=1}^{i=h} \gamma^i \cdot (1 + \gamma)^{h-i+1}$$

wobei $t_{St2/h}$ Vorsprung auf den Fahrplan des Kurses K2 nach Verlassen der Hal-
testelle Hh [s]

Das Gegenteil widerfährt wiederum dem Folgekurs K3, der durch die vermehrt war-
tenden Fahrgäste an den Haltestellen verzögert wird. Für den allgemeinen Fall des k-
ten Zuges an der h-ten Haltestelle wurde folgende Beziehung entwickelt:

$$(67) \quad t_{Stk/h} = t_{St1/0} \cdot \frac{(k + h - 2)!}{(k - 1)! \cdot (h - 1)!} \cdot (-\gamma)^{k-1} \cdot (1 + \gamma)^h$$

wobei $t_{Stk/h}$ Verspätung oder Vorsprung des k-ten Zuges an der h-ten Halte-
stelle
k Nummer des Zuges
h Nummer der Haltestelle

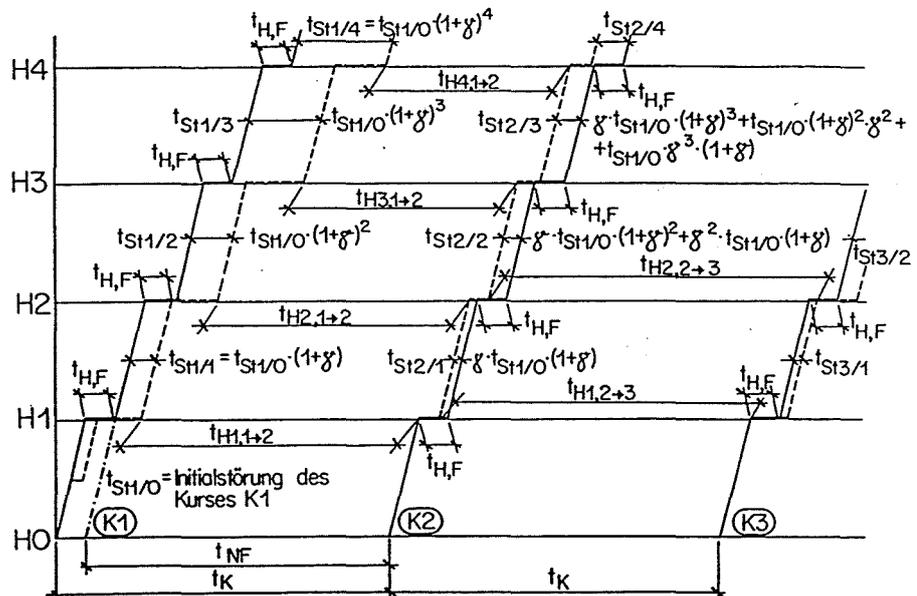


Abb. 135

Prinzip der Störungfortpflanzung im Linienbetrieb und massgebende Grössen.

6.52.5

Auswirkungen auf die Kursfolgezeit

Die effektive Kursfolgezeit zwischen K1 und K2 vermindert sich fortgesetzt. Mit (63) und (66) lässt sich die Haltestelle errechnen, an welcher die beiden Kurse aufeinander treffen. Die Summe aus der Verspätung des Kurses K1 und der Verfrühung des Kurses K2 muss identisch sein mit der Kursfolgezeit t_K :

$$(68) \quad t_K = t_{SH/0} \cdot (1 + \gamma)^h + t_{SH/0} \cdot \sum_{i=1}^{i=h} \gamma^i \cdot (1 + \gamma)^{h-i+1}$$

wobei $t_{H,c}$ Konstante Haltezeitanteile [s], im Mittel etwa 8 s

6.52.6

Einfluss der Einstiegsgestaltung auf die Störungsaufschaukelung im Nahverkehr

Der Aufschaukelungsfaktor γ zeigt, dass ein Kurs umso empfindlicher auf eine Initialstörung reagiert, je grösser der Anteil der Fahrgastwechselzeit an der Beförderungszeit ist. Gleichzeitig verliert die Störungsaufschaukelung bei grösseren Kursfolgezeiten rasch an Bedeutung. In einem Rechenbeispiel werden nebst verschiedenen Einstiegs Höhen drei Kursfolgezeiten unter folgenden Annahmen untersucht:

- Die Fahrgastwechselzeit des konventionellen Fahrzeuges betrage 15 s.
- Die Initialstörung belaufe sich auf 90 s.
- Die Kursfolgezeit sei 2, 4 und 6 Minuten.

Es zeigt sich, dass günstige Einstiegsverhältnisse vor allem bei dicht befahrenen Strecken zu einer verbesserten Störungsresistenz führen, indem der Verspätungszuwachs deutlich gebremst wird. Bei Niederflurfahrzeugen halbiert sich gemäss (66) aber auch die induzierte Verfrühung des Folgekurses, sodass die beiden Kurse wesentlich später aufeinander treffen. Tiefeinstiege verkürzen somit nicht nur die Beförderungszeit, sondern sie stabilisieren zusätzlich den Betriebsablauf.

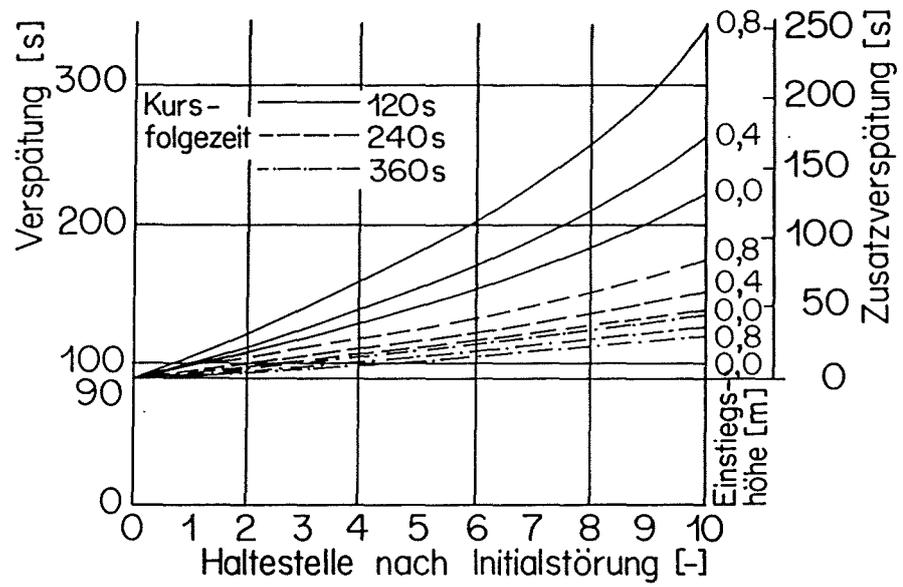


Abb. 136

Verspätungsaufschaukelung im Nahverkehr in Funktion der Haltestellenzahl, der Kursfolgezeit und der Einstiegsverhältnisse.

Literaturnachweis

Im folgenden Verzeichnis sind aus Platzgründen nur ausgewählte Veröffentlichungen zum Thema zusammengefasst. Der vollständige Nachweis der Literatur, welche dieser Forschungsarbeit zugrundelag, findet sich im IVT-Bericht Nr. 99, "Der Fahrgastwechsel im öffentlichen Personenverkehr", Zürich 1994, S. 329 - 348. Sämtliche Abbildungen ohne Quellenangabe stammen vom Autor.

- [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] 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
- [3] Astrand, I.: Arbeitsphysiologie, Schattauer Verlag, Stuttgart/New York 1987
- [4] Bauer, W.: Studie über den Fahrgastwechsel im Eisenbahn-Nahverkehr, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 17(1968), H. 8, S. 320 - 330
- [5] Berg, W.: Innerbetriebliche Gesetzmässigkeiten des öffentlichen Linienbetriebes, IVT-Bericht Nr.82/2 (Dissertation). Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule - Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik (IVT), 1982
- [6] Birkenmaier, Pleuler: Dante Schuggl, 2. erweiterte Auflage, Tramclub Basel, Basel 1992
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] Brändli, H.; Berg, W.: Einfluss von neuen Bahnhofzugängen auf das Fahrgastverhalten, in: Verkehr und Technik, 32(1979), H. 11, S. 480 - 482
- [11] Brändli, H.: Vorlesungen öffentlicher Verkehr, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, Zürich 1990 - 1992
- [12] Brunner, P.: Simulationsmodell für Tramnetze, Schriftenreihe des IVT Nr. 94, Zürich 1993
- [13] 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
- [14] Bundesminister für Verkehr: Bürgerfreundliche und behindertengerechte Gestaltung des Strassenraumes, in: direkt - Verbesserung der Verkehrsverhältnisse in den Gemeinden 47/1992, Bonn-Bad Godesberg 1992
- [15] 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
- [16] Canal, G.: Le programme français d'autobus futur, in: Transport - Environnement - Circulation No 69, mars/avril 1985, S. 21 - 31
- [17] 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
- [18] Deinert, W.: Eisenbahn-Wagen, 4. Auflage, VEB transpress, Berlin 1981
- [19] Delvendahl, H.: Über die Gestaltung der Bahnanlagen für den Nahverkehr der Deutschen Bundesbahn, in: Die Bundesbahn, 40(1964), H. 19-20, S. 698 - 702
- [20] Dirmeler, W.: Die Bedeutung der Haltezeit im Stadtschnellbahnbetrieb, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 27(1978) H. 5, S. 273 - 276
- [21] Donskol, D. D.: Grundlagen der Biomechanik, Deutscher Sportbund, Schriftenreihe des Bundesausschusses zur Förderung des Leistungssports, Trainerbibliothek Band 16, Verlag Bartels & Wernitz KG, Berlin 1975
- [22] Dupaigne, F.: Wirtschaftlicher Einmannbetrieb durch beschleunigte Fahrgastabfertigung, in: Revue de l'UITP, 11(1962), H. 2, S. 103 - 110
- [23] 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
- [24] Engelbrecht, P.: Fahrgast- und verkehrsgerechte Haltestellen des öffentlichen Personennahverkehrs, in: Verkehr und Technik, 28(1975), H. 8, S. 305 - 311

- [25] Fiedler, J.: Die Haltezeit und ihre Einflußfaktoren, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 17 (1968), H. 11, S.474 - 479
- [26] 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
- [27] Frederich, F.: Niederflur-Fahrzeuge: Technik für Fahrgäste, in: Der Nahverkehr, 8(1990), H. 4, S. 22 - 28
- [28] Gerbig, R. M.: Die Leichtmotorwagen der Zürcher Strassenbahn, Mitteilungsblatt 16 des Vereins Tram-Museum Zürich, Zürich 1990
- [29] Glnau, G.; Blennemann, F.: Verknüpfung von Nahverkehrssystemen, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA), Alba Buchverlag, Düsseldorf 1970
- [30] Glnau, G.: Das Niederflurbus-Verkehrskonzept - Ein Vorschlag, der allen Fahrgästen dient, in: Der Nahverkehr, 9(1991), H. 1, S. 35 - 42
- [31] Hondius, H.: Servicebus-Konzept jetzt auch in Dänemark und Norwegen, in: Stadtverkehr, 37 (1992), H. 11-12, S. 20 - 25
- [32] Hondius, H.: ÖPNV-Niederflurfahrzeuge im Kommen (6), in: Stadtverkehr, 38(1993), H. 5, S. 36 - 43
- [33] Iffländer, H.; Weldmann, U.: Niederflur - Vorteil für alle! - Untersuchungen des Fahrgastwechsels bei Niederflurfahrzeugen, in: Der Nahverkehr, 7(1989), H. 4, S. 71-77
- [34] Johansson, Th.: Neues aus Halmstad, Schweden, in: Stadtverkehr, 29(1984), H. 3, S. 110 - 111
- [35] Johansson, Th.: 70 neue Zweilachsbusse für Malmö, in: Stadtverkehr, 29(1984), H. 5-6, S. 194 - 197
- [36] Kirchhoff, P.; Schulze, W.: Bewältigung von Störungen im Fahrtablauf, in: Der Nahverkehr, 0(1982), H. 0, S. 46 - 51
- [37] Knoflacher, H. H.; Stephanides, J.: Systemspezifische Einflüsse auf die Aufenthaltsdauer von Straßenbahnen in Haltestellen, in: Verkehr+Technik, 36(1983), H. 2, S. 46 - 50
- [38] 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
- [39] Koenig, G. K.: Il tram a pianale ribassato: storia e sviluppi, in: Ingegneria Ferroviaria, 40(1985), H. 5, S. 223 - 241
- [40] Koffman, Jury Leonid: Der Weg zum leichten Niederflur-Wagen, in: Stadtverkehr, 36(1991), H. 10, S. 37 - 43
- [41] Kraft, W. H.; Boardman, Th. J.: Predicting Bus Passenger Service Time, in: Traffic Engineering, 40(1969), October, S. 16 - 20
- [42] Kraft, W. H.; Boardman, T. J.: Predicting Bus Passenger Service Time, in: Traffic Engineering, 41(1970), February, S. 36 - 40
- [43] Krell, K.: U- und S-Bahn-Haltestellen mit starkem Fahrgastwechsel, in: Der Tiefbau 3/1964, S. 186 - 196
- [44] Krobot; Slezak; Sternhart: Strassenbahn in Wien - vorgestern und übermorgen, Verlag Josef Otto Slezak, Wien 1972
- [45] 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
- [46] Lehmann, H.: Verkehrliche Auswirkungen von Verspätungen, in: Verkehr und Technik, 21 (1968), H. 3, S. 57 - 58
- [47] Lehmann, H.: Nochmals: Verkehrliche Auswirkungen der Verspätungen, in: Verkehr und Technik, 21(1968), H. 12, S. 324, 326
- [48] Leiner, A.: Möglichkeiten zur Beschleunigung des Fahrgastwechsels bei öffentlichen Verkehrsmitteln, Diplomarbeit am Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart, Stuttgart 1983
- [49] Lemke, Poppel: Berliner U-Bahn, Alba-Verlag, Düsseldorf 1985
- [50] Magaria, R.: Biomechanics and energetics of muscular exercise, Oxford University Press, Oxford 1976
- [51] Morecki, A. (Herausgeber): Biomechanics of Motion, International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures No 263, Springer-Verlag, Wien/New York 1980
- [52] Müller-Hellmann, A.: Entwicklungslinien von Nahverkehrsschienenfahrzeugen, in: Elektrische Bahnen, 90(1992), H. 10, S. 308 - 312
- [53] Müller-Hellmann, A.: Neue Rolle für ein traditionsreiches Verkehrsmittel - Quo vadis Strassenbahn? in: Internationales Verkehrswesen, 45(1993), H. 1-2, S. 61 - 68
- [54] Müller, A.: Über die Wahl des mittleren Haltestellenabstandes bei elektrischen Strassenbahnen, in: Elektrotechnik und Maschinenbau, 35(1917), H. 37, S. 448 - 450
- [55] Müller, H.: Fahrplanabhängigkeit des Fahrgastzuflusses zu Haltestellen, IVT-Bericht Nr. 81/5, IVT-ETHZ, Zürich 1981

- [56] Müller, K.: Die Doppelstockwagen der Französischen Staatsbahnen, in: ZEV-Glaser's Annalen, 108(1984), H. 7-8, S. 216 - 219
- [57] Müller-Hillebrand, M.: Die Gesetzmässigkeit der Verkehrsstrombildung, in: Eisenbahningenieur, 15(1964), H. 12, S. 317 - 324
- [58] Navin, F. P. D.; Wheeler, R. J.: Pedestrian Flow Characteristics, in: Traffic Engineering, 40 (1969), June, S. 30 - 36
- [59] Newell, G. F.; Potts, R. B.: Maintaining a Bus Schedule, in: Australian Road Research Board, Proceedings 1964, Volume 2, Part 1, S. 388 - 393
- [60] 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
- [61] Oplatka, G.: Die Steigerung der Förderleistung von Pendelbahnen / Optimizing on the Transport Capacity of Reversible Aerial Tramways, in: Internationale Seilbahn-Rundschau/Seilförderanlagen, 1973
- [62] Pabst: 100 Jahre Obus, in: Strassenbahn-Magazin Nr. 44, Mai 1982, S. 145 - 155; Nr. 45, August 1982, S. 175 - 194; Nr. 48, Mai 1983, S. 115 - 126; Nr. 49, August 1983, S. 230 - 235
- [63] 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
- [64] Pottglessner, H.: Allgemeine betriebliche Probleme des Nahschnellverkehrs der DB in den Ballungsräumen, in: Die Bundesbahn, 45(1969), H. 21-22, S. 1003 - 1012
- [65] Potthoff, G.: Verteilung der Beförderungsweiten im städtischen Nahverkehr, in: Deutsche Eisenbahntechnik 12/1968, S. 583 - 584
- [66] Potthoff, G.: Verkehrsströmungslehre, Band 3: Die Verkehrsströme im Netz, VEB transpress, Berlin 1969
- [67] Prinzinger, R.: Lebensalter und physiologische Zeit - Messung der Lebensdauer in biologischen Systemen, Neue Zürcher Zeitung Nr. 30/1991, 6. Februar 1991
- [68] Rappenglück, W.: Neue Triebzüge der Deutschen Bundesbahn für Ballungsräume, in: Elektrische Bahnen, 40(1969), H. 11, S. 244 - 254
- [69] Reimer, K.: Die Bewegung der Menschenmassen in Verkehrsräumen, in: Glaser's Annalen, 71(1947), H. 7, S. 121 - 131
- [70] Reimer, K.: Das Problem des raschen Fahrgastwechsels bei städtischen Verkehrsmitteln, in: Glaser's Annalen, 73(1949), H. 11, S. 198 - 202; 73(1949), H. 12, S. 217 - 219
- [71] Reimer, K.: Fahrgastwechsel im Städte-Schnellverkehr, in: Glaser's Annalen, 81(1957), H. 5, S. 146 - 148
- [72] 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
- [73] Rohmert, W.; Rutenfranz, J.: Praktische Arbeitsphysiologie, 3. neubearbeitete Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart/New York 1983
- [74] Rüger, S.: Analyse des Betriebsablaufes an einer Strassenbahn-Haltestelle nach einer sportlichen Grossveranstaltung, in: Die Strasse, 24(1984), H. 5, S. 134 - 137
- [75] 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)
- [76] Sachs, K.: Elektrische Triebfahrzeuge - Ein Handbuch für die Praxis sowie für Studierende in drei Bänden, Erster Band: Allgemeine Grundlagen und Mechanischer Teil, Springer-Verlag, Wien/New York 1973
- [77] Schopf, J. M.: Bewegungsabläufe, Dimensionierung und Qualitätsstandards für Fussgänger, Radfahrer und Kraftfahrzeugverkehr, Dissertation Technische Universität Wien, Wien 1985
- [78] Schütze, P.: Fahrgastzugang und mittlere Wartezeit an Haltestellen im Linienverkehr, in: Der Nahverkehr, 2(1984), H. 1, S. 58 - 63
- [79] Seddon, P.A.; Day, M.P.: Bus Passengers Waiting Times in Greater Manchester, in: Traffic Engineering & Control, 15(1974), January, S. 442 - 445
- [80] Stagni, E.: Unificazione del veicol per trasporto urbano, in: trasporti pubblici, 4/1949, S. 343 - 352
- [81] Stähli, S.: Haltezeit für Nahverkehrszüge, in: Monatsschrift der Internationalen Eisenbahn-Kongress-Vereinigung, Mai 1969, S. 319 - 331
- [82] Stegemann, J.: Leistungsphysiologie - Physiologische Grundlagen der Arbeit und des Sports, 3. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart/New York 1984
- [83] Stetza, G.: Attraktive Haltestellenzellen beim Anderthalbdeck-Bus, in: nahverkehrspraxis, 13(1965), H. 9, S. 372
- [84] Studiengesellschaft Nahverkehr mbH: Bus-Verkehrssystem - Fahrzeug, Fahrweg, Betrieb; Alba-Buchverlag, Düsseldorf 1979
- [85] Studiengesellschaft Nahverkehr mbH: Bewertung von Beschleunigungsmassnahmen im ÖPNV am Beispiel eines ausgewählten Strassenbahn- und Bus-Netzes im mittleren Ruhrgebiet, 1989

- [86] Thews, G.; Mutschler, E.; Vaupel, P.: Anatomie, Physiologie, Pathophysiologie des Menschen - Ein Lehrbuch für Pharmazeuten und Biologen, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart 1980
- [87] Thiergen, S.: Zeitverlust des freien Strassenverkehrs an Haltestellen der Strassenbahn, in: Die Strasse, 10(1970), H. 8, S. 427 - 432
- [88] Trüb, W.: Die Personenwagen der SBB (Normalspur) 1902-1970, mit Nachtrag 1971-1977, Separatdruck aus Eisenbahn-Amateur
- [89] Utech, J.: Inanspruchnahme von Sitzplätzen im Schnellbahnverkehr in Hamburg, in: Verkehr und Technik, 28(1975), H. 7, S. 275 - 277
- [90] Vecchio, D.: Prospettive e soluzioni applicative per metrò leggeri non automatici, in: TRASPORTI e TRAZIONE, 6(1993), H. 4, S. 148 - 152
- [91] Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe: Das Niederflurbus-Verkehrssystem - Vorläufige Hinweise zu Niederflurbussen, zugehörigen erhöhten Haltestellen, Finanzierungshilfen, Köln November 1989
- [92] Vogt, M.; Lapp, U.: Erhöhte Bussteige zur Verbesserung des Ein- und Ausstieges, in: Verkehr und Technik, 36(1983), H. 10, S. 395 - 400
- [93] Voigt, W.: Modellfunktionen zur Beschreibung der Fahrgastwechselzeiten im Strassenbahnverkehr, in: Die Strasse, 15(1975), H. 2, S. 48 - 51.
- [94] Vuchic, V.: Fahrplanstörungen - zusätzliche Faktoren und betriebliche Massnahmen, in: Verkehr und Technik, 22(1969), H. 4, S. 97 - 100
- [95] Vuchic, V.: Potenzierung der Fahrplanstörungen im Linienverkehr, in: Revue de l'UITP, 18 (1969), H. 4, S. 285 - 288
- [96] Weidmann, U.: Untersuchung über Phänomene des Fahrgastwechsels im Nahverkehr - Zwischenbericht vom Januar 1989, IVT-ETHZ, Zürich 1989
- [97] 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
- [98] Weidmann, U.: Niederflurfahrzeuge - ein Beitrag zum attraktiven Nahverkehr, in: Schweizer Ingenieur und Architekt, 110(1992), H. 13, S. 269 - 275
- [99] Weidmann, U.: Transporttechnik der Fussgänger, in: Strasse und Verkehr, 78(1992), H. 3, S. 161 - 169
- [100] Weidmann, U.: Fahrgastwechsel bei Autobussen, in: Verkehr und Technik, 45(1992), H. 4, S. 138 - 144
- [101] Weidmann, U.: Fahrgastwechsel im S-Bahn-Verkehr, Fahrgastwechselmessungen bei der S-Bahn München, in: Eisenbahntechnische Rundschau, 41(1992), H. 7-8, S. 533 - 536
- [102] Weidmann, U.: Transporttechnik der Fussgänger - Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs, Literatúrauswertung, IVT-ETHZ, zweite ergänzte Auflage, Schriftenreihe des IVT Nr. 90, Zürich 1993
- [103] Weidmann, U.: Der Fussgänger im Strassenverkehr - Geschwindigkeit und Leistungsfähigkeit, in: Der Nahverkehr, 11(1993), H. 6, S. 53 - 60
- [104] Weidmann, U.: Niederflurtechnik und Mobilitätsbehinderte, in: Verkehr und Technik, 46 (1994), H. 6, S. 232 - 246
- [105] Weidmann, U.: Der Fahrgastwechsel im öffentlichen Personenverkehr, Dissertation ETH Nr. 10630, Schriftenreihe des IVT Nr. 99, Zürich 1994
- [106] Weidmann, U.: Berechnung der Fahrgastwechselzeiten - Die Leistungsfähigkeit von Fahrzeugeinstiegen - Einflüsse und Auswirkungen, in: Der Nahverkehr, 13(1995), H. 1-2, S. 64 - 72
- [107] Weidmann, U.: Niederflurfahrzeuge im Linienbetrieb, Manuskript für Verkehr und Technik, 1995
- [108] Welgelf, H. (Herausgeber): Fünf Jahrhunderte Bahntechnik, Hestra-Verlag, Darmstadt 1986
- [109] Wernecke: Neuere Strassenbahnwagen in England, in: Glasers Annalen, 47(1923), Februar, S. 47 - 49
- [110] Westphal, J.: Fahrgastwechselzeiten bei Fernreisezügen der Deutschen Bundesbahn, in: Eisenbahningenieur, 27(1976), H. 10, S. 417 - 426
- [111] Westphal, J.: Zeituntersuchungen an abfahrenden Reisezügen im Fern- und Nahverkehr der Deutschen Bundesbahn, in: Archiv für Eisenbahntechnik Nr. 31, 1976, S. 35 - 45
- [112] Wilke, Dr. Gerhard: Elektrotriebwagen als Eisenbahn-Nahverkehrsmittel im städtischen Nahverkehr, in: Die Bundesbahn, 38(1964), H. 19-20, S. 703 - 710
- [113] Winkler, I.: 25 Jahre elektrisch betriebene Untergrundbahn in Budapest, in: Siemens-Zeitschrift, 1(1921), H. 12, S. 465 - 476
- [114] Wolf, J.: Ermittlung des hinsichtlich der Reisezeit zweckmässigsten Haltestellenabstandes im städtischen Nahverkehr, Dissertation an der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List", Dresden, 1970
- [115] Yearsley, I.: Autobusse in den Städten der Welt, in: Der öffentliche Nahverkehr in der Welt, 42(1993), Februar, S. 69 - 77

- [116] Zeevenhooven, N. H. C. E.: Doppelstockwagen für den Einsatz im Eisenbahnverkehr, in: ZEV-Glasers Annalen, 114(1990), H. 1-2, S. 15 - 23
- [117] Zschweigert, M.: Bahnanlagen des Nahverkehrs, transpress Verlag, Berlin 1982
- [118] Autorenkollektiv: Die Strassenbahnen in der DDR - Geschichte, Technik und Betrieb, Motorbuch Verlag Stuttgart, 1978
- [119] anonym: Una nuova vettura tranviaria a carelli per l'A.T.A.C., in: Trasporti Pubblici, 5(1948), H. 3-4, S. 327 - 330
-

Verzeichnis der wichtigsten Abkürzungen

A_i	Aussteigende Fahrgäste an der Haltestelle i [P]
D_F	Dichte des Fahrgaststromes [P/m^2]
$D_{F,l}$	Fahrgastdichte pro Länge an der Haltekante [P/m]
$D_{F,G}$	Fahrgastdichte im Gangbereich eines Fahrzeuges [P/m^2]
$D_{F,T}$	Fahrgastdichte im Türbereich [P/m^2]
$D_{F,W}$	Fahrgastdichte im Warteraum [P/m^2]
$D_{F,Wmax}$	Maximale Fahrgastdichte im Warteraum [P/m^2]
E_i	Einsteigende Fahrgäste an der Haltestelle i [P]
F	Fahrgastwechselzahl an einer Haltestelle oder Türe [P]
F_K	Fahrgastzahl eines Kurses [P]
F_R	Anzahl der Fahrgäste in einem Referenzzustand [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]
k_D	Korrekturfaktor zur mittleren Fahrgastwechselzeit beim Auftreten von Stehplatzfahrgästen im Türraum [-]
$k_{U,T}$	Zuschlagfaktor zur Fahrgastwechselzeit des ganzen Kurses bei ungleichförmiger Belastung des Türsystems [-]
$k_{l,v}$	Korrekturfaktor zur spezifischen Leistungsfähigkeit für die Höhendifferenz zwischen Perron und Wagenboden [-]
L	Türleistungsfähigkeit der Türe oder des Türsystems [P/s]
L_T	Leistungsfähigkeit der Türe [s/P]
$L_{T,K}$	Nominelle Leistungsfähigkeit des Türsystems eines Kurses [P/s]
$L'_{T,K}$	Effektive Türleistungsfähigkeit des Kurses bei Fahrgastwechselzahl F_i an der Haltestelle i [P/s]
$L_{T,i}$	Leistungsfähigkeit der Türe i [P/s]
L_s	Spezifische Türleistungsfähigkeit [P/sm]
$l_{F,d}$	Horizontaldistanz zwischen den Fahrgästen [m]
$l_{r,i}, l_{r,k}$	Entfernungen i, k von der Türe [m]
$l_{r,max}$	Maximale Zugangsdistanz eines Fahrgastes zur Einstiegstüre [m]
$l_{T,bl}$	Lichte Breite der Türe i [m]
$l_{T,v}$	Höhendifferenz zwischen Perron und Wagenboden [m]
n_H	Zahl der Haltestellen [-]
n_S	Zahl der Türspuren [-]
$n_{T,K}$	Anzahl der Türen pro Kurs [-]
$P_{F,rel}$	Summenhäufigkeit der relativen Fahrgastwechselzahlen [%]
$P_K(\tau)$	Verteilungsfunktion der Fahrgastwechselzeit eines Kurses [-]
$P_{T,i}(\tau)$	Verteilungsfunktion der spezifischen Fahrgastwechselzeit der Türe i [-]
$P_{T,i}(x)$	Dichte der spezifischen Fahrgastwechselzeit der Türe i [ms/P]
Q_K	Momentane Besetzung des Kurses [$P/Kurs$]
$Q_{K,max}$	Maximales Fassungsvermögen des Kurses [$P/Kurs$]
$Q_{K,Qmax}$	Maximale Auslastung des Kurses während einer bestimmten Kursfahrt [$P/Kurs$]
Q_T	Türbelastung [$P/Türe$]
$Q_{T,rel}$	Relative Türbelastung [s]
$Q_{T,relmax}$	Maximale relative Türbelastung eines Kurses [s]
$Q_{T,s}$	Spezifische Türbelastung [P/m]
$q_{F,rel}$	Relative Fahrgastwechselzahl an der Haltestelle i [-]
q_K	Auslastungsgrad des Kurses [-]
q_{KL}	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 Türbreite [-]
$q_{K,ns}$	Wirkungsgrad des Türsystems in Funktion der Türzahl und der Standardabweichung der spezifischen Leistungsfähigkeit der einzelnen Türen [-]
$q_{U,T}$	Ungleichförmigkeitsmass der Türbelastung [-]
$t_{h,f}$	Fahrgastwechselzeit an einer Haltestelle oder Türe [s]
$t_{h,fm}$	Mittlere Fahrgastwechselzeit an einer Haltestelle oder Türe [s/P]
$t_{h,fsi}$	Spezifische Fahrgastwechselzeit an der Türe i [sm/P]
$t_{h,ftot}$	Gesamtfahrgastwechselzeit einer Fahrt [s]
$v_{F,h}$	Horizontalgeschwindigkeit der Fahrgäste oder Fussgänger [m/s]

$v_{F,v}$	Vertikalgeschwindigkeit der Fahrgäste oder Fussgänger [m/s]
ϕ	Öffnungswinkel des Einzugsgebietes einer Türe [-]
$\sigma_{h,fm}$	Standardabweichung der mittleren Fahrgastwechselzeit [s/P]
$\sigma_{L,s}$	Standardabweichung der spezifischen Leistungsfähigkeit [sm/P]
$\sigma_{L'}$	Standardabweichung der effektiven Leistungsfähigkeit des Türsystems [P/s]
