

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen
der Universität Karlsruhe
o. Prof. Dr.-Ing. W. Leutzbach

Dr.-Ing. Wolf Laubert

**Betriebsablauf und
Leistungsfähigkeit
von Kleinkabinenbahnstationen**

Heft 15



1977

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (TH).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof.Dr.Ing. W. Leutzbach, der den Anstoß zu dieser Arbeit gab, für seine wohlwollende Unterstützung sowie für die Übernahme des Referates.

Ebenso danke ich Herrn Prof.Dr.-Ing. W. Grabe für viele Anregungen und die Übernahme des Korreferates.

Mein Dank gilt auch Herrn cand.inf. E. Broelsch, der die umfangreichen Programmierarbeiten hervorragend erledigte.

Nicht zuletzt danke ich allen Mitarbeitern des Instituts, die durch ihre konstruktive Kritik viele wertvolle Hinweise gaben.

Wolf Laubert

K u r z f a s s u n g

Laubert, W.:

Betriebsablauf und Leistungsfähigkeit von Kleinkabinenbahnstationen. 88 Seiten; 22 Abbildungen

Es werden die Ablaufvorgänge von Kabinen im Stationsbereich analysiert und anhand der fahrdynamischen Grenzwerte geometrische Randbedingungen für die Stationsabmessungen gefunden.

Die Ablaufvorgänge werden in Simulationsmodellen für große vermaschte Netze und für Stationen nachgebildet, worin die geometrischen Randbedingungen enthalten sind.

Die Ergebnisse geben Hinweise für die optimale Kombination von Warteplätzen sowie von kombinierten Aus- und Einsteigplätzen in einer Off-line-Station.

Die maximale Leistungsfähigkeit einer Station läßt sich mit relativ wenigen Aus- und Einsteigplätzen erreichen.

A b s t r a c t

Laubert, W.:

Performance and Capacity of PRT-Stations for Small Sized Vehicles. 88 pages; 22 illustrations

The performance of small sized vehicles was examined in the station area, and by means of the kinematic limiting value the geometric conditions for the dimensions of the station are found. For closely connected systems and stations the performance is simulated by models which include the geometric conditions.

The results provide for indications of the optimum combination of waiting positions, as well as of combined entrance and exit positions in an off-line station.

The maximum capacity of a station requires relatively few entrance and exit positions.

R é s u m é

Laubert, W.:

Le déroulement de service et la capacité des stations PRT de petits véhicules

88 pages; 22 illustrations

Les déroulements de service de petits véhicules sont analysés dans la zone de station. A l'aide des limites cinétiques, on trouve les conditions géométriques secondaires pour les dimensions de station. Ces déroulements pour de grands réseaux denses et pour des stations sont simulés par des modèles dans lesquels les conditions géométriques secondaires sont impliquées.

Les résultats donnent des indications concernant une combinaison optimum des places d'attente, de sortie et d'entrée dans une station "off-line".

Une capacité maximum de cette espèce de station peut être réalisée avec un relativement petit nombre de places de sortie et d'entrée.

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
1. Einleitung	1
2. Problemstellung	2
3. Systembeschreibung	5
3.1 Kabine	5
3.2 Streckennetz	7
3.3 Station	8
3.3.1 Zugang der Zusteiger	8
3.3.2 Betriebsvorgänge der Kabine	9
3.4 Steuerung	14
3.4.1 Kabine	15
3.4.2 Weiche und Station	15
3.4.3 Netz	17
4. Grundlagen der Simulation	18
4.1 Geometrische und fahrdynamische Gesichtspunkte bei einer Station	18
4.1.1 Ein- und Ausfahrtweiche	21
4.1.2 Verzögerungsbereich	27
4.1.3 Vorrückbereich	28
4.1.4 Ein- und Aussteigbereich	31
4.1.5 Beschleunigungsbereich	31
4.1.6 Stationen mit mehreren Stationsfahrbalken	34
4.1.7 Auswirkungen der fahrdynamischen Grenzwerte auf die Netzdichte	39
4.2 Leerkabinensteuerung	41
4.2.1 Bisher vorliegende Modelle	41
4.2.2 Verwendete Leerkabinensteuerung	43
4.3 Stationsleistungsfähigkeit	43
5. Simulationsmodelle	45
5.1 Modell eines Netzes mit mehreren Stationen	46
5.1.1 Station	46
5.1.2 Einmündung	48
5.1.3 Abzweigung	49
5.1.4 Anlaufdauer und Simulationszeit	50
5.1.5 Anlaufprogramm NETZDATEN	52
5.1.6 Eingabedaten für das Programm KABSIM	52
5.1.7 Darstellung der Ergebnisse von KABSIM	53
5.2 Stationsmodell	55
5.2.1 Eingabedaten für das Stationsmodell	56
5.2.2 Darstellung der Ergebnisse des Stationsmodells	57

6.	Anwendung des Netzmodells KABSIM auf ausgewählte Netze	58
6.1	Netz A	58
6.2	Netz B	59
6.3	Ergebnisse	60
6.3.1	Verkehrsablauf vor der Einfahrt in eine Station	60
6.3.2	Zufluß von Kabinen in die Station	61
6.3.3	Wartezeiten der Zusteiger	62
6.3.4	Abweisungsrate an gesperrten Stationen	63
6.3.5	Einfluß der Abweisungsrate auf die Streckengeschwindigkeit	67
6.3.6	Zeitverluste an Zusammenführungs- weichen	68
7.	Anwendung des Stationsmodells	70
7.1	Grunddaten für die Simulation	70
7.2	Einfluß der Bedarfsanmeldung	72
7.3	Einfluß von Startplätzen	75
7.4	Einfluß der Aussteigplätze	76
7.5	Einfluß der Einsteigplätze	76
7.6	Einfluß der kombinierten Aus- und Einsteigplätze	77
7.7	Einfluß der Warteplätze	80
7.8	Dimensionierung einer Station	82
8.	Zusammenfassung	84
	Literaturverzeichnis	86
	Verzeichnis der Abbildungen	89
	Verzeichnis der Tabellen	90
	Verzeichnis der Anlagen	91
	Anlagen	93

1. Einleitung

Der innerstädtische Verkehr ist zu einem großen Teil geprägt durch ein erhebliches Attraktivitätsgefälle zwischen dem freizügig zur Verfügung stehenden Personenkraftwagen und den öffentlichen Personennahverkehrsmitteln. Diese Diskrepanz führte zu Überlegungen, die Vorteile des Individualverkehrs,

- die zielreine Fahrt,
- eine geringe Wartezeit und
- eine hohe Reisegeschwindigkeit,

auf die öffentlichen Nahverkehrsmittel zu übertragen. Daraus entstand das Konzept eines Kleinkabinenbahnsystems.

Es ist vorstellbar, daß durch eine Erhöhung der Attraktivität im Bereich des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) der Modal Split zugunsten des ÖPNV verändert wird. Die Verkehrsprobleme können dann geringer werden, weil durch diese Verlagerung von Verkehrsanteilen die Höhe der Spitzenbelastungen im Individualverkehr abnimmt und Flächen für den ruhenden Verkehr fortfallen können.

Darin ist u.a. der Grund für die Entwicklung von Kleinkabinensystemen zu sehen, die bislang mehr theoretisch und technisch angelegt war. In Japan, Frankreich, USA und der Bundesrepublik Deutschland sind die Entwicklungen soweit fortgeschritten, daß Erprobungsanlagen in Betrieb genommen wurden.

Wegen der experimentellen Konzeption der Erprobungsanlagen gibt es bisher keinen praktischen Betrieb. Deshalb können die Ablaufvorgänge in Kabinennetzen und Stationen zur Zeit nur theoretisch untersucht werden. Auf dem Gebiet der Kleinkabinenbahnstation liegen vergleichsweise wenig Untersuchungen vor.

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, die wichtigsten Einflußfaktoren auf den Betriebsablauf und die Leistungsfähigkeit von Kleinkabinenbahnstationen zu untersuchen und die Zusammenhänge quantitativ darzustellen.

2. Problemstellung

Beim Betrieb eines Kleinkabinenbahnsystems treten Probleme auf, die neuartig sind, da Kleinkabinenbahnen bisher noch nicht im Einsatz erprobt werden konnten. Die Probleme, die in dieser Arbeit behandelt werden, betreffen den Betriebsablauf einer Off-line-Station. Dazu gehören:

- die Leistungsfähigkeit einer Station unter Berücksichtigung des Betriebsablaufs in einem Netz,
- die Leistungsfähigkeit einer Station unter Berücksichtigung differenzierter Funktionsbereiche,

wobei als wesentliche Randbedingungen die fahrdynamischen Werte und die daraus resultierenden Abmessungen sowie die Fahrbalkenanordnung in einer Station zu berücksichtigen sind.

Vielfach wird unterstellt, daß Stationen jede Art von Verkehrsbelastung bewältigen können, wenn sie nur ausreichend dimensioniert sind. Diese Annahme, die stellvertretend für alle Kleinkabinensysteme für das Cabaientaxi-System der Arbeitsgemeinschaft DEMAG-MBB im Anhang IV der SNV-Studie (1973)⁺ wiedergegeben ist, wird durch eine deterministische Betrachtung des Betriebsablaufs gestützt (vergleiche Abbildung 1).

⁺ Die in Klammern gesetzte Zahl gibt das Jahr der Veröffentlichung der verwendeten Literatur an, deren Verzeichnis sich auf Seite 86 befindet.

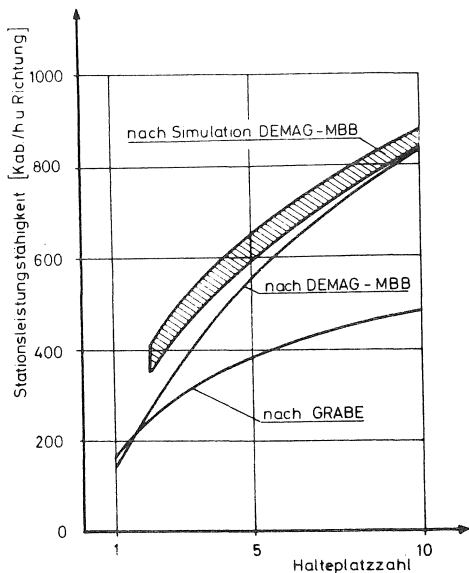


Abb. 1 Theoretische Stationsleistungsfähigkeit von Cabinentaxi-Stationen

Quelle: SNV (1973)

Der deterministische Zusammenhang wird dem wahren Verhalten von Zusteigern, Aussteigern und der Ankunft von Kabinen in den Stationen aber nicht gerecht. Wie bei SCHMIEDEL (1974) nachgewiesen wurde, ist die Ankunft von Zusteigern an einer ÖPNV-Haltestelle ein stochastischer Prozess. Ebenso verhält es sich mit den Ankünften von Kabinen an Stationen (HAENICKE (1977)). Das Verhalten der Aus- und Einsteiger ist nicht für alle Benutzergruppen als gleich zu unterstellen, wie Messungen von BECKER (1975) ergeben haben. Die stochastischen Einflüsse vermindern die deterministisch gewonnenen Werte.

Die Bedienungsmöglichkeit einer Station hängt zunächst vom Zulauf ab. Er ist eine Funktion des Betriebsablaufs im Netz

und der Abfertigung der Stationen, die vor der betrachteten liegen. Der wechselseitige Zusammenhang ist komplex und von Faktoren abhängig wie:

- Art der Vermaschung im Netz und Netzgröße,
- Verteilung der Verkehrsnachfrage im Netz,
- Anzahl der Kabinen im Netz,
- Leerkabinendisposition,
- Ausstattung und Abfertigungsvermögen der Stationen.

Die Wirkung der einzelnen Faktoren auf den Betriebsablauf ist weitgehend unbekannt. Da es bisher keinen realen Betrieb gibt, wird versucht den Betriebsablauf im Netz mit Hilfe der Simulation nachzuvollziehen. Das Zusammenwirken von Kabinen, Zusteigern und Betriebsstrategie wird modellhaft nachgeahmt, während einer bestimmten Zeit beobachtet und ausgewertet.

Stationen werden in den bisherigen Untersuchungen als Einheit verstanden, wobei die Leistungsfähigkeit im wesentlichen von der Größe, d.h. der Anzahl der Plätze abhängt. In dieser Arbeit werden Stationen jedoch in Funktionsbereiche unterteilt, die verschiedene Abfertigungscharakteristiken haben wie

- Einfahren,
- Warten,
- Abfertigen,
- Ausfahren.

Die Problematik besteht in diesem Fall darin, daß die Parameter, die den Zulauf leerer Kabinen in die Station bestimmen, in ihrer Größe und Auswirkung weitgehend unbekannt sind. Die Leistungsfähigkeit einer Station hängt mit dem Zulauf leerer Kabinen zusammen und wird deshalb auch durch die Steuerung des Leerkabinenzulaufs beeinflußt. Die Variation verschiedener Parameter soll die Zusammenhänge zwischen Leistungsfähigkeit, Bedarfssteuerung und Größe der Funktionsbereiche klären.

3. Systembeschreibung

Automatische, selbstfahrende, spurgebundene Kabinen haben andere Fahr- und Betriebseigenschaften als z.B. Personenkraftwagen. Während die PKW-Fahrer auf den Straßen alle Manöver wie Anhalten, Abbiegen, Spurwechsel etc. in eigener Verantwortung durchführen, ist das Fahrverhalten spurgeführter Fahrzeuge allgemein durch das Verhalten des unmittelbaren Vorderfahrzeugs geprägt. Diese Abhängigkeit und die in der Einleitung wiedergegebenen Gesichtspunkte führen zu einem Betriebskonzept, das für alle entwickelten Kleinkabinensysteme gilt:

- vollautomatisierter Betriebsablauf auf der Strecke und in Stationen,
- kleine Kabinen als Transporteinheiten,
- **zielreine Fahrt ohne Zwischenhalt an den passierten Stationen,**
- schnelle Verfügbarkeit der leeren Kabinen.

Stellvertretend für die Kleinkabinensysteme werden viele Details des Cabintaxi-Systems der Arbeitsgemeinschaft DEMAG-MBB übernommen, weil dieses System einen vergleichsweise hohen Entwicklungsstand aufweist und darüber die zuverlässigsten Angaben zu erhalten waren.

3.1 Kabine

Die Fahrzeuge - im weiteren Kabinen oder Kleinkabinen genannt - müssen einen Kompromiß zwischen den Wunschvorstellungen 'komfortables eigenes Fahrzeug' und 'Verkehrsmittel für jedermann' darstellen. Einerseits sollen sie so komfortabel sein, daß sie mit einem eigenen PKW konkurrieren können; andererseits sollen sie einfach und robust sein, weil jedermann ohne Aufsicht darin fahren kann und deshalb die Gefahr des Vandalismus nicht auszuschließen ist.

Die Benutzung und Steuerung ist soweit zu vereinfachen, daß sie auch für technisch weniger begabte Benutzer begreifbar wird. Abbildung 2 zeigt eine Kabine des Cabinentaxi-Systems.

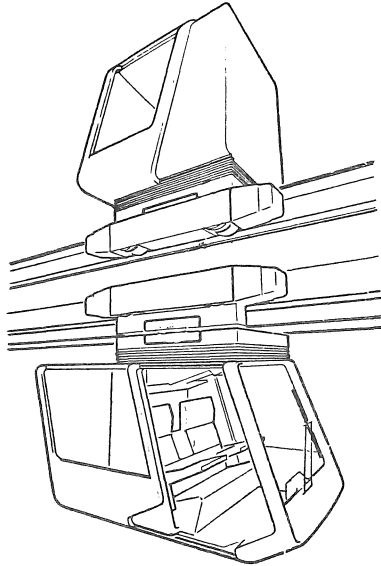


Abb. 2 Kabinen für das Cabinentaxi-System

Quelle: BECKER(1975)

Die Kabine kann folgendermaßen beschrieben werden:

- Abmessungen: Länge/Breite/Höhe 2.3/1.6/1.6 m,
- Große Schiebetür an jeder Seite,
- Sitzbank mit 3 Sitzpositionen,
- im Fußraum kann Gepäck abgestellt werden.

3.2 Streckennetz

Das Streckennetz für ein automatisiertes Kleinkabinensystem ist spur- und richtungsgebunden. Damit entfallen viele Störmöglichkeiten, wie sie beim Straßenverkehr auftreten.

Das Streckennetz läßt sich in die Komponenten

- Strecke
- Weiche
- Station

aufteilen.

Strecke

Strecken sind die Verbindungen zwischen den anderen Komponenten Weiche und Station. Auf ihnen soll die maximale Betriebsgeschwindigkeit gefahren werden. Die sich daraus ergebenden fahrdynamischen Grenzwerte bestimmen die Trassierungselemente des Fahrbalkens.

Durch die Möglichkeit, die Kabine als Stand- oder Hängebahn auszubilden, kann derselbe Fahrbalken Teil zweier unabhängiger Ein-Richtungsnetze sein, die sich in der Fahrtrichtung unterscheiden.

Weiche

Weichen ermöglichen die Verzweigung oder Zusammenführung von Strecken. Sie sind als passive Weichen ausgebildet, d.h. die Spurführungselemente befinden sich in der Kabine. Damit werden die Umschaltzeiten gegenüber den aktiven Weichen eingespart.

Station

Off-line Stationen werden durch Einfahr- und Ausfahrweichen

begrenzt. Die dazwischen liegende Hauptstrecke wird wie eine Strecke behandelt. Alle Brems-, Beschleunigungs-, Aus- und Einsteigvorgänge werden auf der oder den Nebenstrecken durchgeführt.

3.3 Station

Eine Station hat bei jedem Verkehrssystem die Aufgabe, die Verknüpfung verschiedener Aktivitäten zu ermöglichen. In diesem Fall handelt es sich um die zeitliche Zuordnung von Fahrzeugankünften und von Zustiegerankünften. Fahren die Fahrzeuge nach einem vorgegebenen Plan, können nur die Zustieger ihre Ankunftszeit mit dem Fahrplan koordinieren, um möglichst geringe Wartezeiten zu haben. Können jedoch die Ankunftszeiten der Kabinen mit den Ankunftszeiten der Zustieger koordiniert werden, ergibt sich für Zustieger eine attraktive Bedienung.

Dieses Betriebskonzept heißt bedarfsorientierte Bedienung und liegt den folgenden Überlegungen zugrunde.

3.3.1 Zugang der Zustieger

Bei allen spurgebundenen, sich in der Entwicklung befindlichen neuen Kleinkabinensystemen gliedert sich die Aktivität eines Zustiegers in folgende Teilvorgänge:

- Ankunft an der Station und Orientierung,
- Lösen des Fahrscheins,
- Wahl des Fahrtziels; das bewirkt gleichzeitig eine Bedarfsanmeldung für eine Fahrt,
- Zugang zum Fahrsteig,
- Einordnen in eine eventuell vorhandene Warteschlange,
- Einsteigen,
- Starttaste drücken.

In Anlage 1⁺ ist ein Ablaufdiagramm dieser Fahrgastaktivitäten dargestellt.

⁺ Die Anlagen befinden sich ab Seite 93 ff.

Durch Orientierungshilfen und funktionsgerechte Anordnung der verschiedenen Stationsbereiche kann eine Station so gestaltet werden, daß keine schwerwiegenden Orientierungsprobleme für den zusteigenden Fahrgast auftreten.

3.3.2 Betriebsvorgänge der Kabine

Der Bewegungsablauf einer in eine Station einfahrenden Kabine gliedert sich in folgende Teilvorgänge:

- Kabine wird an der Stationseinfahrtweiche in die **Station geführt**,
- Abbremsen,
- Einreihen in die Warteschlange stehender Kabinen,
- Warten,
- Vorrücken zur Position, um Fahrgäste aussteigen zu lassen,
- Vorrücken zur Position, um Fahrgäste einsteigen zu lassen,
- Vorrücken zur Position, um in die Hauptstrecke einfahren zu können,
- Warten auf genügend große Zeitlücke in der Hauptstrecke,
- Abfahren.

Einfahren

Kabinen können nur einfahren, wenn die Einfahrt frei ist. Die Einfahrt kann dadurch blockiert sein, daß zu viele Kabinen in der Station stehen und deshalb die nächstfolgende Kabine beim anschließenden Bremsvorgang in das Lichtraumprofil der Hauptstrecke ragt, womit gegen die Grundvoraussetzung des Betriebes verstoßen würde: Keine Beeinträchtigung des Verkehrsablaufs auf den Hauptstrecken bei den Stationen.

Nähert sich eine Kabine einer Station, so muß in genügender Distanz vor der Station eine Vorrichtung installiert sein, die eine Kommunikation zwischen Kabinen und Stationsrechner

herstellt. An dieser Stelle übermittelt die Kabine ihren Status an die Station. Status bedeutet:

- leer
- besetzt: - Station ist das Ziel
 - Station ist nicht das Ziel.

In Abhängigkeit vom Status entscheidet der Stationsrechner, ob die Kabine in die Station einfahren kann oder nicht nach folgendem Ablaufdiagramm:

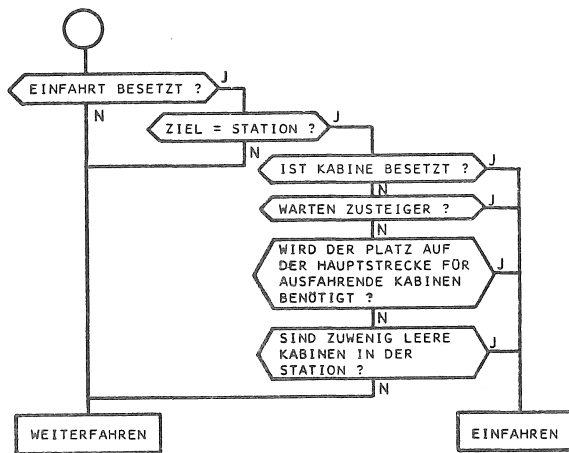


Abb. 3 Ablaufdiagramm für die Regelung der Stationseinfahrt

Danach fahren:

- besetzte Kabinen ein, wenn die Station das angestrebte Fahrtziel ist,

- leere Kabinen ein,
 - wenn die Gesamtzahl der wartenden Zusteiger in der Station größer ist, als die Gesamtzahl der Kabinen in der Station,
 - wenn der Platz, den die Kabine auf der Hauptstrecke belegen würde, für eine Kabine benötigt wird, die die Station besetzt verlassen könnte.
 - wenn zuwenig leere Kabinen in der Station sind, auch wenn keine Zusteiger warten.

Ist die Station besetzt, weil der letzte Platz durch eine Kabine belegt ist, entscheidet der Stationsrechner auf "Weiterfahren", ohne zu prüfen, ob die Kabine besetzt ist und die Station als Ziel hat. Abgewiesene besetzte Kabinen werden bei der nächsten Verzweigungsweiche über den kürzesten Weg wieder zur Zielstation geleitet. Die Problematik der Abweisungen wird im Abschnitt 6.3.4 behandelt.

Abbremsen

In die Station einfahrende Kabinen behalten solange die auf der Hauptstrecke gefahrene Geschwindigkeit, bis sich die Lichtraumprofile beider Kabinen trennen. Die Länge der Trennstrecke wird in Abschnitt 4.1 bestimmt.

Erst nach Durchfahren der Trennstrecke beginnt die Betriebsbremsung. Die Länge des Bremsweges hängt von der Auslegung der Betriebsbremsen und der Betriebsgeschwindigkeit ab.

Vorrücken

Stehen in einer Station aus betrieblichen Gründen nicht alle Positionen, an denen Kabinen stehen können zum Ein- und/oder Aussteigen zur Verfügung, so müssen einfahrende Kabinen immer einen Wartebereich passieren. Ist die Strecke zwischen

der ersten verfügbaren Aussteigeposition und der Position der einfahrenden Kabine frei, kann diese den Wartebereich ohne anzuhalten passieren und auf die Aussteigeposition hin eine Zielbremsung vornehmen.

Ist die erste Aussteigeposition durch eine andere stehende Kabine blockiert, oder befinden sich im Wartebereich stehende Kabinen, muß die einfahrende Kabine im Wartebereich anhalten. Werden nun die vorne liegenden Positionen durch das Wegfahren der blockierenden Kabinen frei, rückt die Kabine selbsttätig auf die nächste freigewordene Position vor. Besetzte Kabinen rücken bis zur ersten verfügbaren Aussteigeposition vor, leere bis zur ersten verfügbaren Einsteigeposition. Neubesetzte Kabinen rücken bis zur Startposition vor. Maßgeblich für das Vorrücken ist die Beendigung von blockierenden Vorgängen auf Positionen, die von der Kabine beim Durchfahren der Station passiert werden müssen. Hierbei können Kabinen innerhalb desselben Funktionsbereichs mehrmals vorrücken.

Aus Sicherheitsgründen soll die maximale Vorrückgeschwindigkeit im Bereich der Fußgängergeschwindigkeit liegen.

Beschleunigen und Ausfahren aus der Station

Sind Kabinen in der Station ausfahrbereit, d.h.

- Zusteiger haben in einer bis dahin leergewordenen Kabine Platz genommen, und es befindet sich zwischen der Kabine und der Zusammenführungsweiche am Stationsende keine blockierende Kabine mehr, oder
- eine leere Kabine hat aus betrieblichen Gründen die Station zu verlassen, und sie hat analog zu oben ebenfalls keinen blockierenden "Vordermann" mehr,

so wird der die Station passierende Hauptstrom auf eine ausreichend große Zeitlücke hin untersucht, die das Einschleusen der Kabine gestattet. Eine Zeitlücke ist dann ausreichend,

wenn sie mindestens doppelt so groß ist, wie die einfache Mindestbruttozeitlücke zweier hintereinanderherfahrender Kabinen. Der Start hat so rechtzeitig zu erfolgen, daß die Kabine am Ende der Beschleunigungsstrecke die Betriebsgeschwindigkeit erreichen kann, wenn die gefundene Zeitlücke den Verschneidungspunkt der Lichtraumprofile passiert. Hierbei werden große Anforderungen an die Genauigkeit der Steuerung gestellt. Wegen der tatsächlich auftretenden Toleranzen in den Antriebs- und Steuerungsaggregaten sollte auch die minimale Bruttozeitlücke einen Wert haben, der eine Toleranz enthält.

3.4 Steuerung

Der vollautomatische Betriebsablauf erfordert eine Steuerung, die für definierte Zustände eine bestimmte Reaktion der Kabinen vorsieht. Die Steuerung soll die räumliche und zeitliche Bewegung der Fahrgäste und der Kabinen koordinieren.

Vorschläge der entwickelnden Industrie sehen hierbei entweder eine hierarchisch aufgebaute Steuerung oder eine Zentralsteuerung mittels Rechner vor (SNV(1973)). Der Gedanke der Zentralsteuerung ist jedoch wieder in den Hintergrund getreten, da der Aufwand bei großen Netzen mit sehr vielen gleichzeitig sich bewegenden Kabinen die Grenzen der Leistungsfähigkeit der heute verfügbaren Rechner zu überschreiten droht. Ein weiterer wesentlicher Gesichtspunkt ist der mögliche Ausfall des Steuerrechners oder der Nachrichtenübertragungselemente für die Steuerbefehle und die sich daraus ergebenden Sicherheitsprobleme.

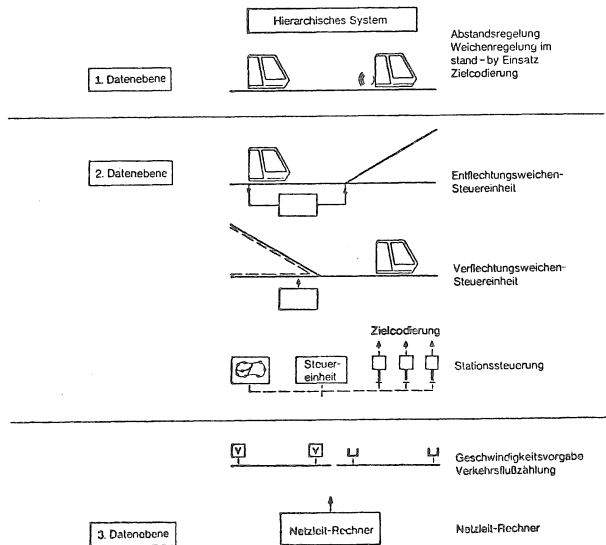


Abb. 4 Zuordnung der Aktivitäten zu den Datenebenen des hierarchischen Systems

Die hierarchisch aufgebaute Steuerung ist übersichtlicher aufgebaut. Hier wird auf drei getrennten Ebenen autonom gesteuert, und die Informationen werden für die übergeordnete Ebene an bestimmten Schnittstellen weitergegeben.

Die drei Ebenen sind:

- die Kabine
- die Stationen und Weichen
- die globale Netzsteuerung

3.4.1 Kabine

Die Kabine wird vom Fahrgast im Gegensatz zum PKW nicht gesteuert, sondern durch die Angabe des kodierten Zieles und durch den Startbefehl in Betrieb gesetzt. Die Reaktion der Kabine hängt danach lediglich noch von den äußeren Gegebenheiten auf dem Fahrweg ab:

- Vorderkabine
- Weichen
- Erreichen der Zielstation.

Die Steuerung der Kabinen ist darauf ausgelegt, die maximal mögliche Betriebsgeschwindigkeit einzuhalten. Diese hängt vom Abstand zur Vorderkabine, der Geschwindigkeit der Vorderkabine und der Geschwindigkeitsdifferenz beider Kabinen ab. Der Datenaustausch zwischen hintereinanderfahrenden Kabinen erfolgt über Sender, gedämpfte Leiter und Empfänger.

3.4.2 Weiche und Station

Die zweite Steuerungsebene umfasst die Weichen und Stationen. Weichen zur Verzweigung oder zur Zusammenführung des Fahrweges und die Stationen einschließlich ihrer Ein- und Ausfahrtweichen sind in der Steuerungshierarchie gleichgestellt. In den Stationen werden die Daten des die Station berührenden Kabinen-

stroms und die Daten der Benutzer gesammelt und verarbeitet.

Der Stationsrechner steuert über die Informationsweitergabe an der Einfahrtsweiche den Zulauf in die Station. Hierzu errechnet er die Betriebszustände "Station besetzt" oder "Einfahrt gestattet" je nach Anlage und Füllung der Stationsfahrwege.

Innerhalb der Station steuert er das Vorrücken leerer und besetzter Kabinen durch die Station.

Beim Ausfahren der Kabinen bestimmt er den Startzeitpunkt in Abhängigkeit von der Verkehrssituation auf dem vorbeiführenden Fahrweg.

Bei ungleichgewichtigen Verkehrsrelationen (sehr viel mehr oder sehr viel weniger ankommende Kabinen als abfahrwillige Fahrgäste) steuert er entweder den notwendigen Zulauf von leeren Kabinen oder das Starten von nicht mehr benötigten leeren Kabinen auf die Strecke.

Da die Zusteiger beim Betreten der Station ihren kodierten Fahrtwunsch an den Stationsrechner mitteilen, ist eine vollständige Information über die Zielwünsche aller in der Station wartenden Fahrgäste gewährleistet. Da auch die Zeitpunkte der Zusteiger-Ankünfte bekannt sind, ist ebenfalls die Wartezeitverteilung bekannt.

Die Angabe, in welcher Richtung einer Verzweigungsweiche eine Kabine fahren muß, ist bei der Weiche festgeschrieben. Hier existiert eine "Kürzest-Weg-Tabelle", die mit dem Fahrzeugziel verglichen wird. Die "Tabelle" wird von der übergeordneten Netzebene je nach der Verkehrssituation im Gesamtnetz errechnet. Sie ist somit zeitabhängig.

An Weichen erfolgt ein Informationsaustausch zwischen Kabine und Weiche, in welcher Richtung (geradeaus oder abbiegend)

das gewünschte Ziel zu erreichen ist. Danach richtet sich die Reaktion der in der Kabine installierten Spurführungselemente.

3.4.3 Netz

Die "dritte Ebene" ist ein Netzrechner. Er übernimmt die Aufgabe der optimalen Disposition von leeren Kabinen und die Bestimmung der optimalen Fahrtrouten aller Kabinen.

Die zur Disposition notwendigen Daten werden von der zweiten Ebene an den übergeordneten Netzrechner weitergegeben. Das Geschehen im Netz ist hier abgebildet durch die Belastung der einzelnen Netzkomponenten mit Kabinen und Fahrgästen.

Bei Überschreiten kritischer Belastungen können Streckenteile gesperrt werden. Das kann durch Änderung von Abzweigmustern (Kürzest-Weg-Tabellen) an den Weichen erfolgen. Zur Bestimmung der tatsächlichen kürzesten Wege im Netz kann der Netzrechner die von den Stationen, Strecken und Weichen erhaltenen Informationen über die Verkehrsstärken verarbeiten und Änderungen der Abzweigmuster berechnen. Diese Neuberechnung kann periodisch erfolgen und somit geänderten Verkehrssituationen Rechnung tragen.

Da der Netzrechner nur "Empfehlungen" an die nachgeordneten Hierarchien weitergibt, übernimmt er keine Verantwortung. Auch bei seinem Ausfall kann ein Betrieb - wenn auch nicht optimal - aufrecht erhalten bleiben, da die Kabinen für ihre Steuerbefehle "eigenverantwortlich" sind.

4. Grundlagen der Simulation

Zur Erstellung des Simulationsmodells ist es nötig, die Netzelemente des Kleinkabinensystems längenmäßig anzugeben. Besondere Sorgfalt erfordert dabei die Station, da sich hierin die wesentlichen Wechsellvorgänge abspielen. Die Länge einer Station beeinflusst zum einen die Aufenthaltszeit einer Kabine, bis sie wieder auf die Hauptstrecke geschickt wird, und zum anderen den minimalen Abstand zu anderen Stationen und damit die Netzdichte.

Eine weitere wichtige Grundlage ist die Behandlung der Leerkabinen im Netz. Da hiervon der Betriebsablauf beeinflusst werden kann, muß die Leerkabinensteuerung im Simulationsmodell berücksichtigt werden.

4.1 Geometrische und fahrdynamische Gesichtspunkte bei einer Station

In der Station eines spurgeführten Verkehrssystems müssen die Kabinen die Bereiche

- Abbremsen,
- Aussteigposition,
- Einsteigposition,
- Beschleunigen

durchlaufen, wobei dieselben Positionen mehrere Funktionen haben können.

Ist dabei die Station mit nur einer Nebenstrecke ausgelegt, ist ein Überholen der Kabinen hier nicht möglich. Sie durchlaufen die Bereiche in der Reihenfolge ihrer Ankünfte. Sind in Fahrtrichtung vorn liegende Bereiche besetzt, so können dadurch weiter zurückliegende Bereiche blockiert werden.

Sind die Sperrvorgänge von zeitlich untergeordneter Bedeutung, so wird eine Station mit einer Nebenstrecke voll betriebsfähig sein. Sollen Sperrungen jedoch unmöglich sein, lassen sich diese Bereiche nur durch die Anordnung von Parallelfahrbalgen umgehen.

Die aufwendigste Möglichkeit besteht darin, daß jeder Folgebereich unter Umgehung der anderen Bereiche direkt erreichbar wird.

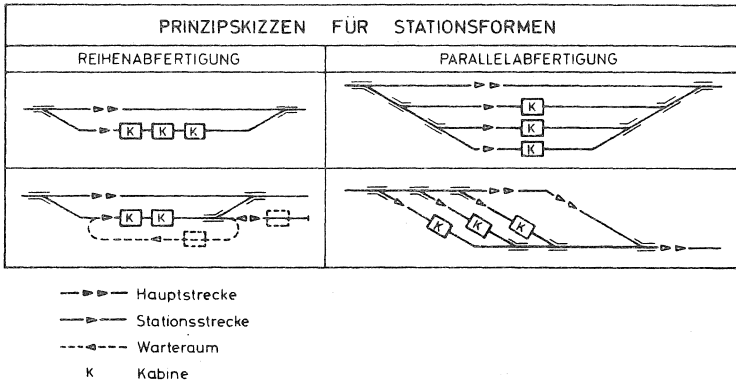


Abb. 5 Stationsausbildung bei Kleinkabinensystemen

Quelle: FELZ, GRABE (1974)

Bei FELZ, GRABE (1974) sind solche Anordnungen beschrieben und bei BERGMANN (1972), SIRBU (1974) und LIOPIROS (1974) auch die Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit der Station erörtert worden. Dabei blieben jedoch die Einflüsse unbeachtet, die sich durch die zusätzliche Zusammenführung von Kabinen ergeben, wenn an blockierten Bereichen vorbeigefahren wird. Werden darüberhinaus noch mehrere Parallelbahnsteige angeboten, vervielfältigen sich diese Einflüsse.

Bei mehr als 2 Parallelbahnsteigen ergeben sich für Zustieger Informationsprobleme. Da nicht immer genügend rechtzeitig bekannt ist, wann Sperrungen und Umfahrungen geschehen, müssen Zustieger entweder kurzfristig zu anderen Umsteigepositionen verwiesen werden, oder sie warten in einer Position auf eine Kabine, während an einer anderen Position eine Kabine auf einen Zustieger wartet.

Ein weiteres Problem besteht in der Erreichbarkeit solcher Positionen. Bei mehreren Parallelbahnsteigen sind die Einstiegspositionen durch die Fahrbalken getrennt. Je nach Bauart des Kleinkabinensystems ist es nur mit Unter- oder Überführungen möglich, diese Positionen zu erreichen. Das kann einen schwerwiegenden Eingriff in die automatische Steuerung bedeuten, wobei die Sicherheit nicht mehr zu gewährleisten ist.

4.1.1 Ein- und Ausfahrtweiche

Da eine Station den Ablauf auf der vorbeiführenden Hauptstrecke nicht beeinflussen soll, dürfen die Abbremsvorgänge erst dann eingeleitet werden, wenn die Kabine das Lichtraumprofil der Hauptstrecke vollständig verlassen hat. Dies geschieht umso schneller, je kleiner der Radius der abbiegenden Strecke ist. Aus physiologischen und fahrdynamischen Gründen darf der Radius nicht zu klein werden. Eine Verminderung der Seitenbeschleunigung durch Überhöhung des Fahrbalkens ist im Weichenbereich aus technischen Gründen nicht möglich.

Wenn die abzweigende Strecke die Form eines Kreisbogens hat, ist die Seitenbeschleunigung p abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit v und dem Radius R des Kreisbogens:

$$p = \frac{v^2}{R} \quad [\text{m/sec}^2].$$

Da die Geschwindigkeit im betrachteten Fall mit 10 m/sec festgelegt ist, hängt die Seitenbeschleunigung nur vom Radius ab, wie Tabelle 1 zeigt.

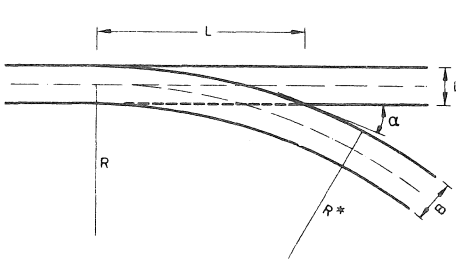
Radius R [m]	40	60	80	100	120
p [m/sec ²]	2.50	1.67	1.25	1.00	0.83

Tabelle 1 Seitenbeschleunigung bei Kurvenfahrt

Radien kleiner 100 m ergeben eine Seitenbeschleunigung, die größer ist als der in der BO-STRAB (1965) zulässige Wert von 1.0 m/sec². Er kann jedoch vertreten werden unter der Annahme, daß in Kleinkabine alle Fahrgäste sitzen.

Im folgenden wird die Verzweigungsweiche beschrieben. Die Ergebnisse dafür gelten analog auch für die Zusammenführungsweiche.

Die notwendige minimale Länge L einer Weiche mit Kreisbogenform ergibt sich aus der Breite des Lichtraumprofils B und dem Radius R. Erst nach der Trennung der Lichtraumprofile darf die Bremsung eingeleitet werden.



$$R^* = R + \frac{B}{2}$$

$$B = R^* \cdot (1 - \cos \alpha)$$

$$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{B}{R^*} \right)$$

$$L = R^* \cdot \sin \alpha$$

$$L = \sqrt{2 \cdot B \cdot R^* - B^2}$$

Abb. 6 Weiche mit Kreisbogen

Die folgende Tabelle zeigt für verschiedene Radien R und Lichtraumprofilbreiten B die notwendigen minimalen Längen L sowie die dazugehörigen Zentriwinkel α .

R [m]	B [m]	α [gon]	L [m]
60	2.0	16.35	15.49
	2.2	17.14	16.25
	2.4	17.89	16.97
	2.6	18.61	17.66
	2.8	19.30	18.33
	3.0	19.97	18.97
80	2.0	14.18	17.89
	2.2	14.86	18.76
	2.4	15.52	19.60
	2.6	16.14	20.40
	2.8	16.75	21.17
	3.0	17.33	21.91
100	2.0	12.69	20.00
	2.2	13.31	20.48
	2.4	13.89	21.91
	2.6	14.45	22.80
	2.8	15.00	23.66
	3.0	15.52	24.49

Tabelle 2 Zentriwinkel α und Entwicklungslängen L einer Weiche mit Kreisbogen

Die optimale Form eines Weichenbogens für ein Personenverkehrssystem wird durch eine Klothoide annähernd erreicht, da die bei der Bogenfahrt auftretende Seitenbeschleunigung mit einem konstanten Ruck allmählich auf den Höchstwert anwächst bzw. wieder abnimmt.

Eine Stationsweiche mit einem Klothoidenbogen und die daran anschließenden Fahrbalkenteile bestehen aus 4 Klothoidenabschnitten derselben Klothoide mit dem Parameter Λ .

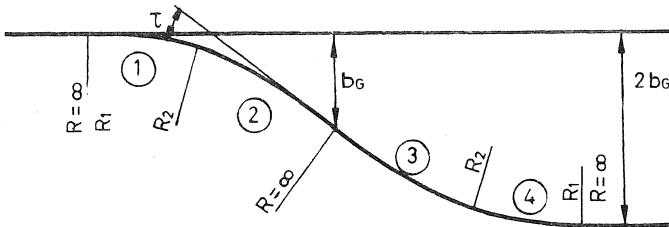


Abb. 7 Stationseinfahrt mit Klothoidenbogen

Aus Symmetriegründen sind die Teile (1) und (4) sowie (2) und (3) jeweils gleich.

Aus Komfortgründen kann zugelassen werden, daß die Radien einen Wert von $R_1 = 120$ m und $R_2 = 60$ m annehmen.

Die minimale Gesamtabrückung $2b_G$ ist damit eindeutig festgelegt. Reicht die erforderliche Abrückung b_{erf} nicht aus, so muß zwischen den Teilen (2) und (3) eine Zwischengerade L_z eingefügt werden, deren Länge sich ergibt zu:

$$L_z = \frac{b_{\text{erf}} - 2b_G}{\text{tg } \tau} .$$

Da sich die auftretenden Winkel τ bei dieser Konstruktion im Bereich $\tau < 6^\circ$ befinden, kann ohne entscheidenden Verlust an Genauigkeit gesetzt werden

$$\begin{aligned} \cos \tau &\approx 1.0 \\ \text{tg } \tau &\approx \tau . \end{aligned}$$

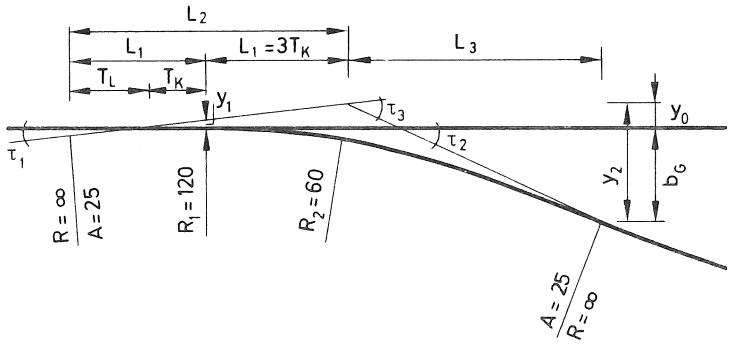


Abb. 8 Weiche mit Klothoidenbogen

Die Klothoide kann nicht durch eine explizit anzugebende Funktion $y = f(L)$ beschrieben werden. Im verwendeten Bereich lässt sie sich jedoch nach LORENZ et al. (1971) ausreichend genau durch die kubische Parabel

$$y = \frac{L^3}{6A^2}$$

ersetzen.

Wegen des Bildungsgesetz der Klothoide gilt:

$$L_1 = \frac{A^2}{R_1} \quad ,$$

$$L_2 = L_3 = \frac{A^2}{R_2} \quad .$$

Für die Berechnung der Abrückung b_G gilt:

$$b_G = y_2 - y_0 \quad ,$$

$$y_2 = L_3 \cdot \text{tg} \tau_2 \quad ,$$

$$\tau_2 = \tau_3 - \tau_1 ,$$

$$\tau_1 = \frac{L_1}{2R_1} = \frac{L_2}{8R_2} ,$$

$$\tau_3 = 2 \cdot \frac{L_2}{2R_2} = \frac{L_2}{R_2} .$$

Wegen der Beziehung

$$T_L = 2T_K$$

und

$$L_1 = 3T_K$$

folgt aus dem Strahlensatz:

$$y_0 = 4y_1 .$$

Damit läßt sich b_G errechnen:

$$b_G = L_3 \cdot \text{tg} \tau_2 - 4y_1 ,$$

$$b_G = \frac{19 \cdot L_2^3}{24 \cdot A^2} .$$

Die notwendige Länge L der Trennstrecke ist bei einer Licht-
raumprofilbreite B ebenfalls nur vom Parameter A der ge-
wählten Klothoide abhängig.

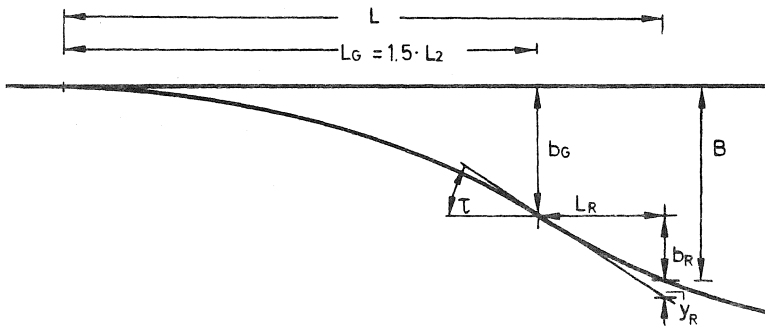


Abb. 9 Trennstrecke bei einer Weiche mit Klothoidenbogen

$$b_R = B - b_G ,$$

$$b_R = L_R \cdot \operatorname{tg} \tau - Y_R ,$$

$$\operatorname{tg} \tau = \frac{7 \cdot L_2^2}{8 \cdot A^2} ,$$

$$Y_R = \frac{L_R^3}{6A^2} ,$$

$$b_R = L_R \cdot \frac{7 \cdot L_2^3}{8 \cdot A^2} - \frac{L_R^3}{6A^2} .$$

Für die von HANNOVER (1974) vorgeschlagenen Parameter $A = 25$, $R_1 = 120$ m und $R_2 = 60$ m für das Cabintaxi-System ergeben sich für L_R folgende Werte:

- bei der Standbahn ($B = 2.06$ m) : $L_R = 4.28$ m
- bei der Hängebahn ($B = 1.94$ m) : $L_R = 3.28$ m .

Somit wird die notwendige Länge L der Trennstrecke

$$L = L_G + L_R$$

- bei der Standbahn $L = 19.92$ m,
- bei der Hängebahn $L = 18.92$ m.

Diese Werte sind größer als die bei Verwendung eines Kreisbogens mit demselben minimalen Radius von 60 m sich ergebenden Werte. Die mit einem Radius von 100 m sich ergebende Trennstreckenlänge (20.00 m) entspricht etwa der mit den o.a. Parametern durchgeführten Trassierung mit Klothoidenabschnitten.

4.1.2 Verzögerungsbereich

Die Länge des Verzögerungsbereichs ist von den fahrdynamischen Werten Geschwindigkeit, Verzögerungsverlauf und Ruck abhängig.

Zum Komplex Verzögerung und Ruck liegen für Kabinenbahnen eine Vielzahl teilweise voneinander abweichender Berichte vor (GEBHARD (1972), ANDERSON (1972), BO-STRAB (1965), HANNOVER (1974), DAIS und KORNHAUSER (1973)). Da hier fahrdynamische Größen außer von fahrzeugtechnischen auch von physiologischen Gesichtspunkten aus bewertet werden müssen, gibt es dazu keine allgemeingültigen Aussagen.

Für das Cabintaxi-System von DEMAG-MBB liegen Messungen vor, die auch die große Bedeutung der Endruckzeit für den Fahrkomfort hervorheben (BECKER (1975)).

So ergibt sich ein Bremsvorgang, der in drei Phasen abläuft:

- Konstanter Ruck zu Beginn der Bremsung,
- Konstante Verzögerung,
- Konstanter Ruck zur Beendigung des Bremsvorgangs mit einer Endruckzeit von 1.0 bis 1.7 sec.

Der Bremsweg ergibt sich aus folgender Gleichung, die durch Integration aus den Bewegungsgleichungen der drei Phasen hergeleitet wird:

$$L_{\text{Brems}} = \frac{v^2}{2 \cdot b} + \frac{v \cdot b}{2 \cdot k_v} + \frac{b^3}{24 \cdot k_o^2} - \frac{b^3}{k_v^2} .$$

Bei BECKER(1975) werden die für den Betriebsfall als komfortabel angesehenen Werte wie folgt angegeben:

konstante Verzögerung	$b = 2.55$ [m/sec ²],
konstanter Anfangsruck	$k_v = 20$ [m/sec ³],
konstanter Endruck	$k_o = 2$ [m/sec ³].

Damit ergibt sich ein Bremsweg von

$$L_{\text{Brems}} = 20.48 \text{ [m]} .$$

Die zum Abbremsen benötigte Zeit beträgt dann

$$T_{\text{Brems}} = \frac{v}{b} + \frac{b}{2k_v} + \frac{b}{2k_o} ,$$

$$T_{\text{Brems}} = 4.62 \text{ [sec]} .$$

Die dazugehörige mittlere Betriebsbremsverzögerung errechnet sich zu

$$b_b = \frac{v^2}{2 \cdot L_{\text{Brems}}} = 2.45 \text{ [m/sec}^2\text{]} .$$

4.1.3. Vorrückbereich

Um aus Positionen, in denen eine Kabine steht, zu weiter vorn liegenden zu gelangen, müssen Kabinen über geringe Wegstrecken vorrücken. Dazu müssen Kabinen beschleunigen und wieder abbremsen, wie in folgender Schemazeichnung der Beschleunigung/Verzögerung über die Zeit dargestellt ist.

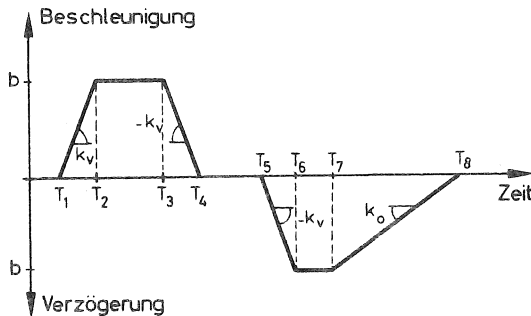


Abb. 10 Beschleunigungs- und Verzögerungsprofil

In der Station treten für das Fahren folgende Randbedingungen auf:

- Die Strecke, auf der das Vorrücken zum Abschluß gebracht werden muß, ist durch die Anzahl n der vorzurückenden Plätze der Länge L_0 vorgegeben ($n \cdot L_0$).
- Die maximal erreichbare Geschwindigkeit v_H ist aus Sicherheitsgründen gering.

Die Dauer eines Vorrückvorganges ergibt sich aus folgender Rechnung (vergleiche hierzu die Bezeichnungen aus Abb. 10):

$$T_4 - T_1 = \frac{v_H}{b} + \frac{b}{2k_V} + \frac{b}{2k_O} ,$$

$$T_8 - T_5 = \frac{v_H}{b} + \frac{b}{2k_V} + \frac{b}{2k_O} ,$$

$$\begin{aligned} T_5 - T_4 &= \frac{n \cdot L_0 - L_{\text{Beschl}} - L_{\text{Brems}}}{v_H} \\ &= \frac{n \cdot L_0}{v_H} - \frac{v_H}{b} - \frac{b}{k_V} - \frac{b^3}{24 \cdot v_H \cdot k_V^2} + \frac{b^3}{24 \cdot v_H \cdot k_O^2} , \end{aligned}$$

$$T_{\text{ges}} = \frac{n \cdot L_0}{v_H} + \frac{v_H}{b} + \frac{b}{k_V} + \frac{b}{2k_O} - \frac{b^3}{24 \cdot v_H \cdot k_V^2} + \frac{b^3}{24 \cdot v_H \cdot k_O^2} .$$

Dieser Zusammenhang gilt unter folgenden Voraussetzungen:

- Die maximale Verzögerung/Beschleunigung b wird erreicht,
- die maximale Haltstellengeschwindigkeit v_H wird erreicht,
- das Vorrücken geschieht über n Stellplatzlängen L_0 .

In der folgenden Tabelle 3 werden die Vorrückzeiten T_{ges} über n Stellplatzlängen wiedergegeben.

n	T_{ges} [sec]
1	2.31
2	3.56
3	4.81
4	6.06
5	7.31
6	8.56

Tabelle 3 Vorrückzeiten T_{ges} in Abhängigkeit von der Anzahl n der Vorrückplätze

Für jeden weiteren Vorrückplatz ergeben sich $T = 1.25$ sec mehr.

4.1.4 Ein- und Aussteigebereich

Die Länge des Ein- und Aussteigebereiches hängt von der Zahl der Kabinen ab, die gleichzeitig abzufertigen sind. Sie beträgt dann ein Vielfaches der Aufstell-Länge der Kabinen und des Abstands zwischen ihnen. Bei Kleinkabinen ist das ca. 2.50 m.

4.1.5 Beschleunigungsbereich

Nach Verlassen der letzten Abfertigungsposition gelangen die Kabinen in den Beschleunigungsbereich. Innerhalb dieses Bereichs muß aus dem Stand mit $v = 0$ m/sec bis zur Betriebsgeschwindigkeit $v = 10$ m/sec beschleunigt werden. Hierfür gelten die unter 4.1.3 angegebenen fahrdynamischen Grenzwerte.

Die Länge dieses Bereiches ergibt sich dann zu:

$$\begin{aligned} L_{\text{Beschl}} &= \frac{v^2}{2b} + \frac{v \cdot b}{2k_v} \\ &= \frac{10^2}{2 \cdot 2.55} + \frac{10 \cdot 2.55}{2 \cdot 20} \end{aligned}$$

$$L_{\text{Beschl}} = 20.25 \text{ [m] .}$$

Die dafür benötigte Zeit beträgt

$$\begin{aligned} T_{\text{Beschl}} &= \frac{v}{b} + \frac{b}{k_v} \\ &= \frac{10}{2.55} + \frac{2.55}{20} \end{aligned}$$

$$T_{\text{Beschl}} = 4.05 \text{ [sec] .}$$

Die Gesamtlänge einer Off-line-Station ergibt sich aus der Summe der Längen der Einzelbereiche.

In der folgenden Tabelle ist für eine Station mit 6 Abfertigungspositionen für einen Weichen-Radius von 60 m und einem Lichtraumprofil von 2,40 m die minimale Gesamtlänge in Abhängigkeit von fahrdynamischen Grenzwerten dargestellt.

k_v [m/sec ³]	k_o [m/sec ³]	b [m/sec ²]	L [m]	T^* [sec]
20	2	1.5	116.39	26.8
		2.0	100.02	23.7
		2.5	90.35	21.8
		2.55	89.60	21.7
		3.0	84.05	20.7
20	5	1.5	116.36	26.6
		2.0	99.95	23.4
		2.5	90.21	21.4
		3.0	83.82	20.2
20	10	1.5	116.36	26.5
		2.0	99.94	23.4
		2.5	90.19	21.3
		3.0	83.78	20.1
10	2	1.5	117.14	26.9
		2.0	101.02	23.7
		2.5	91.60	21.9
		3.0	85.54	20.7
5	2	1.5	118.64	27.0
		2.0	103.01	23.8
		2.5	94.08	22.0
		3.0	88.51	20.9

Tabelle 4 Gesamtlängen und Durchfahrzeiten einer Off-line-Station mit einer Nebenstrecke

* Für die Durchfahrzeit T wird angenommen, daß die Kabine zweimal über 3 Positionen vorrückt.

Eine Erhöhung des Endrucks k_o ergibt eine Längenersparnis von wenigen cm.

Eine Verminderung des Anfangsrucks k_v ergibt eine geringe Verlängerung.

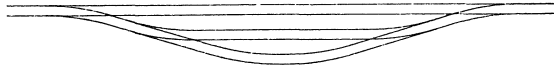
Daraus wird ersichtlich, daß die Ruckwerte nur eine untergeordnete Bedeutung haben. Sie können deshalb zur Optimierung des Fahrkomforts für den Benutzer weitgehend geändert werden, ohne auf die Dimensionierung der Stationslänge bestimmend zu wirken.

Der entscheidende Einfluß auf die Längenentwicklung geht von der höchstzulässigen Beschleunigung bzw. Verzögerung aus.

4.1.6 Stationen mit mehren Stationsfahrbalken

Im Abschnitt 4.1 wurde erläutert, wann aus betrieblichen Gründen Stationen angeboten werden müssen, die mehrere Stationsfahrbalken haben. Dafür gibt es u.a. folgende 3 Anordnungsmöglichkeiten:

RADIUS = 60.00
LICHTRAUMPROFIL = 2.60
BAHNSTEIGBREITE = 4.00



Typ I

RADIUS = 60.00
LICHTRAUMPROFIL = 2.60
BAHNSTEIGBREITE = 4.00



Typ II

RADIUS = 60.00
LICHTRAUMPROFIL = 2.60
BAHNSTEIGBREITE = 4.00



Typ III

Abb. 11 Stationen mit mehreren Stationsfahrbalken

Die verschiedenen Typen sind - von einer geraden Hauptstrecke ausgehend - aus Kreisbögen und Geraden zusammengesetzt. Ihre Längen und Breiten hängen außer von den notwendigen Längen für die Brems-, Abfertigungs- und Beschleunigungsbereiche noch vom Weichenradius, von der Breite der Lichtraumprofile und der notwendigen Bahnsteigbreite (für das Aus- und Einsteigen) ab.

Längenentwicklung

Es wird die Längenentwicklung bei zwei Stationsfahrbalken für die drei Typen abgeleitet. Für zusätzliche Fahrbalken kann die Längenentwicklung analog durchgeführt werden.

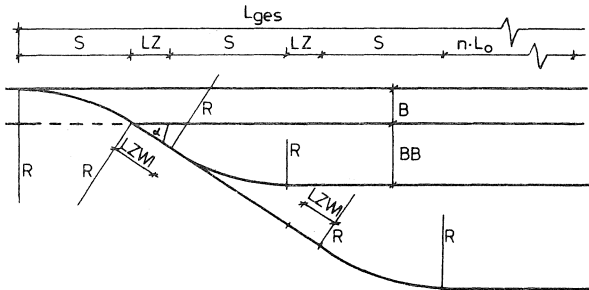


Abb. 12 Stationslänge für Typ I

$$\alpha = \arccos(1 - B/R)$$

$$S = \sqrt{2 \cdot R \cdot B - B^2}$$

$$LZWI = (BB - B) / \sin \alpha$$

$$LZ = LZWI \cdot \cos \alpha$$

$$L_{Iges} = 2(3 \cdot S + 2 \cdot LZ) + n \cdot L_0$$

Damit die Kabine auf dem zweiten Stationsfahrbalken zum Stillstand kommt, muß eine genügend lange Bremsstrecke vorhanden sein. Die Längen der zweiten Zwischengeraden und des dritten Kreisbogens zusammen müssen dazu ausreichen. Bei einem Radius $R = 60$ m einer Bahnsteigbreite $BB = 4.0$ m und einer Lichttraumprofilbreite $B = 2.6$ m ist diese Bedingung erfüllt.

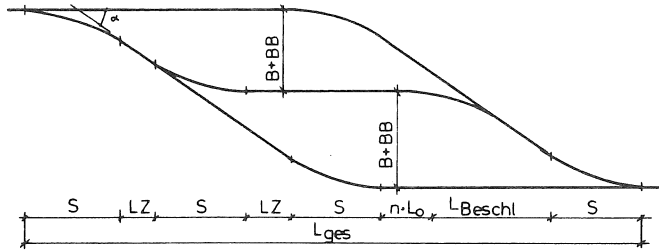


Abb. 13 Stationslänge für Typ II

$$L_{IIges} = 4 \cdot S + 2 \cdot LZ + n \cdot L_O + L_{Beschl}$$

Bei Typ II muß nach dem Aufstellbereich der Länge $n \cdot L_O$ eine Beschleunigungsstrecke L_{Beschl} vorgesehen werden. Sie ist nach den fahrdynamischen Gleichungen aus Abschnitt 4.1.5 zu bemessen.

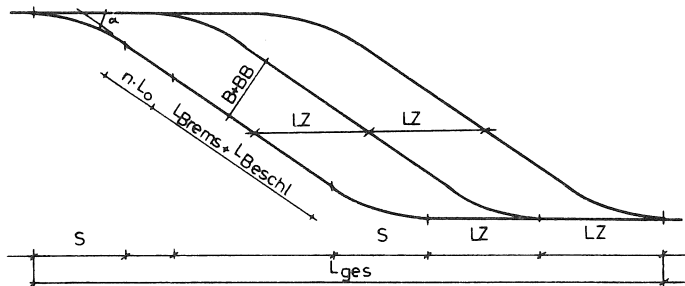


Abb. 14 Stationslänge für Typ III

$$LZ = (BB + B) / \sin \alpha$$

$$L_{IIIges} = 2 \cdot S + 2 \cdot LZ + (n \cdot L_O + L_{Brem} + L_{Beschl}) \cdot \cos \alpha$$

Hier wird die gesamte Verzögerung/Beschleunigung auf der Bahnsteigeraden durchgeführt. Die Längen bemessen sich nach Abschnitt 4.1.2 und 4.1.5 .

Breitenentwicklung

Die Breitenentwicklung der Stationstypen ergibt sich ebenfalls aus den geometrischen Beziehungen:

$$B_I = 3 \cdot B + 2 \cdot BB$$

$$B_{II} = 3 \cdot B + 2 \cdot BB$$

$$B_{III} = 3 \cdot B + (n \cdot L_O + L_{Brems} + L_{Beschl}) \cdot \sin \alpha$$

Bei den Typen I und II ist die Gesamtbreite von der Bahnsteigbreite abhängig, während bei Typ III die Gesamtbreite davon unabhängig ist.

Abbildung 15 zeigt an einem Beispiel für $R = 60 \text{ m}$, $B = 2.40 \text{ m}$ und den in den Abschnitten 4.1.2 und 4.1.5 angenommenen fahrdynamischen Werten die Abhängigkeit der Stationslänge und der Gesamtbreite von der gewählten Bahnsteigbreite.

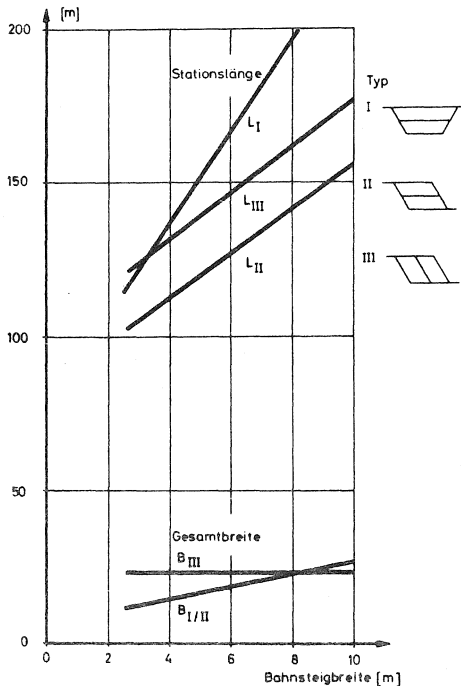


Abb. 15 Länge und Breite für verschiedene Stationstypen

Während die Gesamtbreite nur geringfügig zunimmt, wirkt sich die Bahnsteigbreite besonders stark bei Typ I auf die Länge aus. Am günstigsten schneidet in beiden Dimensionen Typ II ab.

Wird die durch die Gesamtstation überstrichene Fläche betrachtet, gilt dies in erhöhtem Maße. Bei einer Verbreiterung der Bahnsteige von z.B. 2.4 m auf 6.0 m ergibt sich folgendes:

	Bahnsteigbreite		Veränderung [%]
	2.4 m	6.0 m	
	Fläche	[m ²]	
Typ I	835	1815	117
Typ II	625	1000	60
Typ III	780	1370	75

Tabelle 5 Flächenbedarf für verschiedene Stationstypen in Abhängigkeit von der Bahnsteigbreite

Aus diesen Überlegungen heraus ist der Typ II bei Stationen mit mehreren Stationsfahrbalken der geeignetste Typ.

Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß durch die Verschwenkung der Hauptstrecke bei den Typen II und III weitere Probleme auftreten können, die u.a. im Bereich der Stadtgestaltung liegen. Sie werden hier nicht weiter behandelt.

4.1.7 Auswirkungen der fahrdynamischen Grenzwerte auf die maximale Netzdichte

Die in Abschnitt 4.1.6 abgeleiteten Größen für Ausrundungsradien und Entwicklungslängen stellen Minimalwerte dar, die nicht die Regel sein sollten.

Für ein rasterförmiges Netz, wie es z.B. bei KORNHAUSER und MAC EVADDY (1974) und auch weiter unten (s. Anlage 5) untersucht wird, kann eine minimale Rasterweite RW abgeleitet werden.

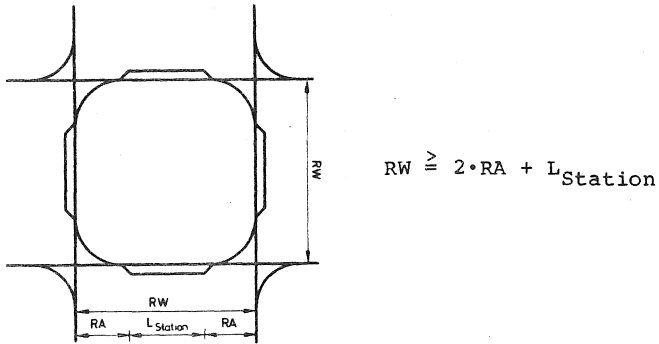


Abb. 16 Minimale Rasterweite RW für ein Streckennetz

Bei Verwendung einer Klothoide $A = 25$, einem Anfangsradius $R = 120$ m und einem Endradius $R_{\min} = 30$ m errechnet sich RA wie folgt:

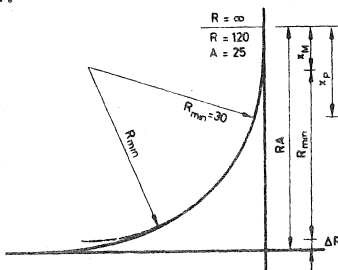


Abb. 17 Länge RA bei der Übergangsrampe

$$RA = \Delta R + R_{\min} + x_m$$

$$\Delta R \approx \frac{L^2}{24 \cdot R_{\min}} \approx 0.6 \text{ [m]}$$

$$x_m \approx 0.5 \cdot x_p \approx 0.5 \left(L - \frac{L^3}{40 \cdot R^2} \right)$$

$$x_m \approx 10.30 \text{ [m]}$$

$$RA = 0.6 + 30 + 10.30 \quad *)$$

$$RA \approx 41 \text{ [m]}.$$

Die minimale Rasterweite ergibt sich demnach zu:

$$RW \geq 2 \cdot 41 + 90 = 172 \text{ [m]}.$$

Diese Rasterweite ist größer als z.B. die meisten Straßenabstände in der Karlsruher Innenstadt.

*) Die Verwendung eines Radius von 30 m setzt wegen der erhöhten Seitenbeschleunigung eine Überhöhung des Fahrbalkens voraus, die nach HANNOVER(1975) ca. 5° betragen muß.

4.2 Leerkabinensteuerung

Bei der Simulation des Betriebsablaufs ist die Steuerung nachzubilden, die im realen Betrieb ein Netzrechner übernimmt. Eine seiner wichtigsten Aufgaben ist die Steuerung des Leerkabinenumlaufs.

4.2.1 Bisher vorliegende Modelle

Bei SCHARMACK (1972) und YORK (1974) wird auf Algorithmen verwiesen, die einen optimalen Leerkabinenumlauf erzeugen. Auf diese Algorithmen kann jedoch nicht zurückgegriffen werden:

Bei SCHARMACK wird eine geschlossene Ringstrecke untersucht; der Ablauf in Netzen kann noch nicht erfaßt und gesteuert werden.

Bei YORK wird die Verteilung der Leerfahrten von Station i nach Station j als bekannt vorausgesetzt. Diese Verteilung ist jedoch nicht immer bekannt. Darüberhinaus gelten für Stationen vereinfachte Abfertigungsbedingungen wie z.B.: es warten nur Kabinen oder nur Zustieger.

Die vorliegende Arbeit zielt jedoch auf eine realistischere Gestaltung des Betriebsablaufs in einer Station ab.

Bei WADDEL et al. (1974) wird ein Verfahren vorgestellt, das die Leerkabinendisposition optimieren kann. Es handelt sich um eine 3-Stufen-Prozedur, die -periodisch in kurzen Zeitabständen angewandt - folgendes bewirkt:

- Abschätzen des zu erwartenden Defizits oder Überschusses an Leerkabinen für einen bestimmten Zeitabschnitt,
- Verteilen des Defizits oder des Überschusses an Leerkabinen auf die betreffenden Stationen mit Hilfe eines Standard-Transport-Algorithmus,
- Erstellen einer Liste für jede Station, die die Zielanweisungen für sukzessiv verfügbare Leerkabinen enthält.

Da in großen Streckennetzen die Transportzeiten größer werden als die Zeitabstände, nach deren Verlauf die Prozedur neu aufgerufen wird, wird das Streckennetz in Teilgebiete gegliedert, in denen zuerst ein Ausgleich von Defizit und Überschuß stattfindet. Der dann noch auftretende Überschuß wird mit Hilfe einer ähnlichen Prozedur auf die anderen Teilgebiete verteilt.

Durch Setzen von Prioritäten, wie z.B. Berücksichtigung, wie viele Passagiere in den Stationen warten oder auch, ob Stationen große Defizite haben, kann die Prozedur so modifiziert werden, daß eine optimale Leerkabinenverteilung vorgenommen wird, die zu vertretbar geringen Wartezeiten und kurzen Warteschlangen der Passagiere in den Stationen führt.

Dieses Verfahren erscheint sehr wirkungsvoll und ist überdies relativ einfach. Es kam hier jedoch nicht zur Anwendung, weil die periodischen Aufrufe während der Simulation die Rechenzeiten um ein Mehrfaches erhöhen und der benötigte Kernspeicher nicht zur Verfügung steht.

Bei GODFREY (1973) werden für eine Ringstrecke mit 4 Off-line-Stationen zwei Verfahren verglichen:

- leere Kabinen werden zu der nächst gelegenen Station mit einem Bedarf geschickt,
- leere Kabinen werden immer dann ohne Ziel auf die Hauptstrecke weitergeleitet, wenn mehr als eine bestimmte Anzahl leerer Kabinen in der Station stehen. Kommen leere Kabinen an Stationen mit einem Bedarf vorbei, werden sie in diese Station geleitet.

Bei diesem Vergleich waren die Wartezeiten der Zusteiger beim ersten Verfahren um ein Vielfaches größer als beim zweiten.

Auch bei SIRBU (1974) wird dieses zweite Verfahren mit Erfolg bei der Simulation des Betriebsablaufs in einem doppelringförmigen Netz verwendet.

Da nach diesem Verfahren leere Kabinen kein Ziel haben, ergeben sich Probleme bei den Verzweigungsweichen: In welche Richtung soll weitergefahren werden.

4.2.2 Verwendete Leerkabinensteuerung

In der Regel fahren Kabinen bei Verzweigungsweichen in die Richtung, die auch die voranfahrende Kabine eingeschlagen hat, es sei denn, sie sind besetzt und ihr Ziel ist über die andere Richtung schneller erreichbar. In dem Fall, daß alle leeren Kabinen in die Richtung der letzten besetzten mitfahren, werden die leeren in die Netzteile geleitet, die auch von den besetzten angestrebt werden. Die leeren Kabinen fahren also genau dahin, wo nach dem Aussteigen der Fahrgäste dann leere Kabinen in den Stationen zur Verfügung stehen. Hierdurch wird nicht dafür gesorgt, daß auch in die Teile des Netzes mit einem Leerkabinen-Defizit leere Kabinen geschickt werden. Das kann jedoch erreicht werden, wenn zumindest ein Teil leerer Kabinen an Verzweigungsweichen in die Richtung gelenkt wird, in die die vorherfahrende Kabine nicht fuhr. Bei LAUBERT (1975) wird gezeigt, daß bei einer Aufteilung von 50% zu 50% eine entscheidende Verbesserung der Bedienungshäufigkeit abseits gelegener Stationen erreicht werden kann.

Bei Fehlen eines Algorithmus zur Verteilung von Leerkabinen wird deshalb diese "Wechselstrategie" empfohlen.

4.3 Stationsleistungsfähigkeit

Die Attraktivität eines Kleinkabinensystems wird für den Benutzer durch die Leistungsfähigkeit der Station bestimmt.

Der Begriff der Leistungsfähigkeit ist nicht einheitlich festgelegt. LEUTZBACH (1975) hat versucht, die im Zusammenhang mit dem Begriff der Leistung stehenden Begriffe systematisch zu ordnen. Die Übertragung auf den Komplex der Stationsleistungs-

fähigkeit ist jedoch nicht ohne weiteres möglich, da hier verschiedene Mengen von Elementen gleichzeitig in einem Begriff zusammenzufassen sind. Es ist auch zu unterscheiden zwischen einem theoretischen oder rechnerischen Höchstwert und einem praktischen Wert mit einer qualitativen Bewertung.

Im weiteren wird deshalb der Begriff der Leistungsfähigkeit wie folgt verwendet:

- Summe der Aus- und Einsteigvorgänge von Fahrgästen in der Zeiteinheit unter Angabe der mittleren Wartezeit und der Belastung der Zulaufstrecke.

5. Simulationsmodelle

Da es sich bei der bedarfsorientierten Betriebsweise um stochastische Vorgänge handelt, können die Angaben über z.B. die Leistungsfähigkeit nicht aus den gegebenen Daten deterministisch gewonnen werden.

Die Wechselwirkungen von Hauptstrecke und Station sind mannigfaltig. Darüberhinaus gibt es noch keine Station im realen Betrieb. Deshalb bleibt nur die Simulation der Bewegungsvorgänge und ihrer Koordination als Untersuchungsmethode.

Bei den Simulationen von DAIS und KORNHAUSER (1973), LIOPIROS (1974) sowie KORNHAUSER und MAC EVADDY (1974) wurde jeweils nur eine Station isoliert betrachtet und auf der vorbeiführenden Hauptstrecke ein Verkehrsfluß angenommen, der nach vorgegebenen Verteilungen der vollen und leeren Kabinen, der vorbei- oder einfahrenden Kabinen und der Zeitlücken zusammengesetzt war. Welche Verteilungen jedoch auf den Strecken eines Streckennetzes vorhanden sind, ist bis jetzt nicht nachgewiesen worden. Die bisherigen Aussagen beruhen auf nicht geprüften Annahmen. Aus diesem Grund ist es erforderlich, den Betriebsablauf einer Station nicht isoliert zu betrachten, sondern in seiner Wechselbeziehung mit dem Betriebsablauf in einem Streckennetz.

Es wurde deshalb ein modulares Programmsystem entwickelt, das aus möglichst einfachen Bausteinen aufgebaut ist und das große Streckennetze nachzubilden gestattet.

Um auch die Auswirkungen auf einzelne Stationen besser untersuchen zu können, wurde ein weiteres Simulationsmodell entwickelt, das es erlaubt, die Funktionsbereiche

- Warten,
- Vorrücken,
- Aus- und Einsteigen sowie
- Abfahren

näher zu untersuchen.

5.1 Modell eines Netzes mit mehreren Stationen

Über die Grundzüge dieses Modells wurde bei BAHM/LAUBERT (1975) berichtet. In der Zwischenzeit konnte der Modell-
aufbau verbessert werden. Das Programm KABSIM ist in SIMULA
67 für das Betriebssystem EXEC der UNIVAC 1108 des Rechen-
zentrums der Universität Karlsruhe geschrieben. Eine voll-
ständige Dokumentation liegt beim Institut für Verkehrs-
wesen der Universität Karlsruhe vor*. Im folgenden wird
deshalb nicht mehr das gesamte Programm in allen Einzel-
heiten, sondern nur in groben Umrissen beschrieben. In Anlage 2
ist das Strukturdiagramm wiedergegeben.

Das Programm KABSIM simuliert den Betrieb einer modell-
haft dargestellten Kleinkabinenbahn, die in Abschnitt 2
dargestellt wurde. Während der Simulation werden Meßwerte
gesammelt, die Aufschluß über den Betriebsablauf innerhalb
des Systems geben. Nach Ablauf der Simulation werden die Meß-
werte statistisch ausgewertet und ausgedruckt.

Das Netz wird aus den drei Bauteilen

- Station
- Einmündung
- Verzweigung

aufgebaut, deren Anzahl, Größe und Zusammensetzung so ge-
wählt werden können, daß geschlossene Netze entstehen.

5.1.1 Station

Im Stationsbauteil werden die folgenden Größen und Aktivi-
täten bearbeitet:

- Länge des Bauteils,
- Anzahl der Ein- und Aussteigeplätze,
- Fahrgasterzeugung,
- Bauteileinfahrt,
- Stationseinfahrt,

* Dokumentation zum Programmsystem KABSIM, Institut für
Verkehrswesen, Universität (TH) Karlsruhe, 1977

- Vorbeifahrt,
- Verzögern,
- Vorrücken,
- Abbremsen,
- Beschleunigen,
- Ein- und Aussteigen,
- Stationsausfahrt,
- Bauteilausfahrt.

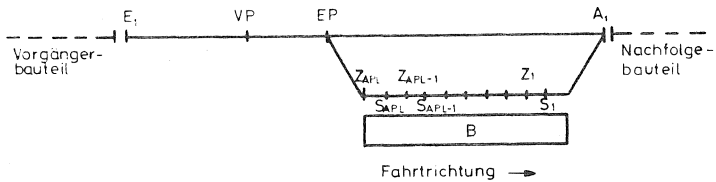


Abb. 18 Stationsschema

- E_1 - Einfahrtspunkt für das Bauteil
- VP - Verzögerungspunkt
- EP - Einfahrtspunkt für die Station
- A_1 - Ausfahrtspunkt aus dem Bauteil
- B - Bahnsteig
- $Z_{APL} \dots Z_2$ Zwischenpunkte für das Vorrücken oder Abbremsen
- Z_1 - Zwischenpunkt für das Abbremsen oder die Stationsausfahrt
- $S_{APL} \dots S_2$ Kabinenstellplätze für das Ein-/Aussteigen oder das Beschleunigen
- S_1 - Kabinenstellplatz für das Ein-/Aussteigen oder die Stationsausfahrt.

In Erweiterung der bei BAHM/LAUBERT (1975) erläuterten Modelle wurde folgende Verbesserung vorgenommen:

- Um zu verhindern, daß eine Zielkabine am Einfahrtspunkt EP auf eine gesperrte Station stößt und abgewiesen wird,

verzögert sie beim Überfahren des Verzögerungspunktes VP ihre Fahrt solange, bis entweder die Stationseinfahrt wieder frei geworden ist, oder die Kabine durch weiteres Abbremsen oder Stehenbleiben nachfolgende Kabinen behindern würde, wenn die Stationseinfahrt gesperrt ist.

- Um eine realistische Nachbildung der Ein- und Ausstiegszeiten zu erreichen, werden beide Vorgänge mit je einer Normalverteilung $N(\sigma/\mu)$ im Programm eingegeben, wobei Einzelwerte, die außerhalb des 3σ - Bereiches liegen (0.3 % aller Fälle) auf die Größe des bei 3σ liegenden Wertes verändert werden.

5.1.2 Einmündung

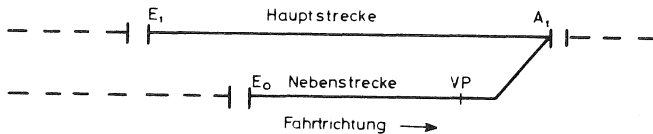


Abb. 19 Einmündungsschema

- E_1 - Einfahrpunkt für die Hauptstrecke
- E_0 - Einfahrpunkt für die Nebenstrecke
- VP - Verzögerungspunkt
- A_1 - Ausfahrpunkt aus dem Bauteil

Ist der Abschnitt der Hauptstrecke (slot), den beim Zusammenführungspunkt eine Kabine aus der Nebenstrecke kommend belegen würde, besetzt, dann wird diese Kabine beim Passieren des Punktes VP solange verzögert, bis ein freier slot auf der Hauptstrecke den Zusammenführungspunkt passiert.

5.1.3 Abzweigung

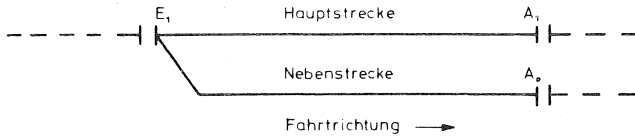


Abb. 20 Abzweigungsschema

- E_1 - Einfahrpunkt
- A_1 - Ausfahrpunkt in die Hauptstrecke
- A_0 - Ausfahrpunkt in die Nebenstrecke

Am Einfahrpunkt E_1 werden die besetzten Kabinen auf die Haupt- oder Nebenstrecke geleitet, je nachdem, wie der kürzeste Weg zur Zielstation verläuft. Leere Kabinen werden nach der "Wechselstrategie" alternierend auf die Haupt- oder Nebenstrecke geleitet.

ASTA - Anzahl der beim Netzaufbau verwendeten Stationen

$W_1 \dots W_{ASTA}$ - Weichenmuster (Kürzest-Weg-Tabelle, vergl. Seite 15), das aufgrund der Netzvorgabe für jedes Abzweigungsbauteil gesondert bestimmt wird.

Für ein Abzweigungsbauteil mit dem Weichenmuster $W_1 \dots W_{ASTA}$ gilt:

- $W_i = 1$ der Weg über die Hauptstrecke zur Station i ist kürzer als der Weg über die Nebenstrecke,
- $W_i = 0$ der Weg über die Nebenstrecke zur Station i ist kürzer als der Weg über die Hauptstrecke,
- $W_i = 2$ der Weg über die Hauptstrecke zur Station i ist genauso lang wie der Weg über die Nebenstrecke. In diesem Fall folgt die Kabine der letzten vorangefahrenen Kabine.

5.1.4 Anlaufdauer und Simulationszeit

Die Parameter, die das Betriebsverhalten beschreiben, z.B. die mittlere Wartezeit, die Kabinenankunftsintensitäten in den Stationen, sollen über den Beobachtungszeitraum konstant bleiben, damit das Betriebsverhalten stationär bleibt, und eine Realisation der stochastischen Größen möglich wird.

Zu Beginn der Simulation werden zunächst leere Kabinen in das Netz eingebracht, deren Anzahl AKAB vorzugeben ist. Weil dann der Anteil leerer oder besetzter Kabinen ständig verändert wird, ist hier das Betriebsverhalten instationär. Der Auswertzeitraum kann also erst beginnen, wenn sich nach einer gewissen Anlaufzeit das System in einen stationären Zustand eingependelt hat. Anlage 3 zeigt dieses Einpendeln während der Anlaufzeit für ein Beispiel.

Der Verlauf der mittleren Wartezeit ist für das dargestellte Beispiel instationär, weil hierbei auch die monoton wachsenden Wartezeiten der Zusteiger, die an Stationen mit ständig ungenügender Leerkabineversorgung warten (vergl. Seite 62), in den Mittelwert eingehen.

Es hat sich nach verschiedenen Probeläufen als zweckmäßig erwiesen, in 5-Sekunden-Intervallen auf den ersten freien Stellplatz jeder nicht gesperrten Station je eine leere Kabine zu stellen, bis alle AKAB Kabinen auf diese Weise in das Streckennetz eingebracht sind. Jede neu hinzukommende Kabine wird sogleich einem der Vorgänge 'Vorrücken', 'Einsteigen' oder 'Stationsausfahrt' unterzogen, je nachdem ob Zusteiger warten oder nicht.

Es ist zu erwarten, daß nach

$$T = \frac{AKAB}{ASTA} \cdot 5 \text{ sec}$$

alle Kabinen in das Netz eingebracht sind. Für die Dauer T_{Anl}

der Anlaufzeit wird zweckmäßigerweise

$$T_{Anl} = 3 T$$

gewählt, damit sich teilweise auftretende Überlastungen der Stationen mit zu vielen leeren Kabinen wieder abbauen können. Sind nach Ablauf von T_{Anl} noch nicht alle Kabinen im Netz untergebracht, wird der Simulationslauf mit einer Fehlermeldung abgebrochen.

Um die Simulationsergebnisse statistisch abzusichern, muß der Umfang einer Stichprobe genügend groß sein. Dies läßt sich erreichen, indem eine Mindestdauer der Simulation nicht unterschritten wird.

Die Mindestsimulationsdauer wird nach den Kriterien

- Kabinenankünfte und
- Zusteigerankünfte

bestimmt, indem in Abhängigkeit von Kabinen- und Zusteigerankunftsintensitäten, vom Konfidenzniveau und vom relativen Fehler ein Mindeststichprobenumfang (Minstdauer) vorhanden sein muß.

$$n \geq \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{e_r^2 \cdot \mu^2}$$

- mit
- n erforderliche Simulationsdauer in Zeiteinheiten
 - t Wert der t-Verteilung
 - e_r relativer Fehler
 - μ Mittelwert der Ankunftsverteilung
 - σ Standardabweichung der Ankunftsverteilung

Da die Anzahl der Ankünfte poissonverteilt ist, entspricht die Genauigkeit der Schätzung der Standardabweichung der einer Stichprobe mit einem Umfang > 100 . Daher kann anstelle des t-Wertes der z-Wert der standardisierten Normalverteilung genommen werden.

Bei einem Konfidenzniveau $\gamma = 0.955$ ergibt sich $t = 2.0$. Der relative Fehler wird zu 2% zugelassen.

Da für die Poissonverteilung gilt $\mu = \sigma^2$, vereinfacht sich obige Formel zu:

$$n \geq \frac{10000}{\mu} .$$

Das ergibt einen Zusammenhang zwischen Simulationsdauer und Ankunftsintensität, für die ein statistisch gesichertes Ergebnis erwartet werden kann. Bei einer Simulationsdauer von 3600 sec müssen demnach mindestens 3 Ankünfte/h, bei einer Dauer von 1800 sec mindestens 6 Ankünfte/h zugrundeliegen. Da bei den Zustiegern Intensitäten dieser Größenordnung vorkommen, wird im folgenden der Betriebsablauf über 1800 sec simuliert.

5.1.5 Anlaufprogramm NETZDATEN

Um den Rechenzeitaufwand für die Simulationsläufe sinnvoll einzuteilen, werden Daten, die nur die geometrische Anordnung der Bauteile betreffen, in einem Vorlaufprogramm NETZDATEN verarbeitet, das gleichzeitig den ersten Teil des Eingabedatensatzes für das Programm KABSIM erzeugt.

Das Programm NETZDATEN

- prüft die Eingabedaten für den Netzaufbau,
- bestimmt aufgrund dieser Daten die Weichenmuster für die Abzweigungsbauteile,
- berechnet die Matrix der Entfernungen zwischen je 2 Stationen über die jeweils kürzeste Streckenverbindung im Netz,
- gibt an, welche Fahrtbeziehungen im Netz 'sinnvoll' sind.¹⁾

5.1.6 Eingabedaten für das Programm KABSIM

Der Eingabedatensatz berücksichtigt, daß in einem vorhandenen Netz verschiedene Betriebssituationen nachgebildet werden. Deshalb besteht er aus einem statischen und einem dynamischen

¹⁾ Da hier ein Einrichtungsverkehr betrachtet wird, bewegen sich die Kabinen auf 'Schleifen'. Auf der gewählten Spur von Station i nach Station j ist eine Fahrt nur 'sinnvoll', wenn die Streckenentfernung zwischen i und j in der Fahrtrichtung dieser Spur kürzer ist als in der entgegengesetzten Fahrtrichtung der anderen Spur.

Teil. Der statische Teil wird vom Programm NETZDATEN erzeugt, und enthält Angaben über:

- Anzahl verwendeter Bauteile,
- Bauteil-Längen,
- Bauteil-Positionen $[x_i, y_i]$,
- Bauteil-Verbindungen,
- Weichenmuster,
- Entfernungsmatrix $[d_{ij}]$.

Der dynamische Teil enthält frei wählbare Angaben über:

- Beförderungsnachfrage $[F_{ij}$ in Pers/h],
- Parameter der Ein- und Aussteigezeitenverteilungen,
- Länge des Anlaufzeitraumes und der Beobachtung,
- Anzahl der Abfertigungspositionen in den Stationen,
- Anzahl der im Netz befindlichen Kabinen.

Die fahrdynamischen Werte sind aus programmiertechnischen Gründen im Programm fest vorgegeben:

Slot-Länge	= 10 m
Betriebsgeschwindigkeit v	= 10 m/sec
Stationsgeschwindigkeit v_H	= 2 m/sec
Betriebsbeschleunigung b	= 2 m/sec ²
Betriebsverzögerung b	= -2 m/sec ²

5.1.7 Darstellung der Ergebnisse des Programms KABSIM

Die Ergebnisse des Simulationslaufes, die sich auf die gesamte Beobachtungsdauer beziehen, werden u.a. durch folgende Kennwerte dargestellt:

- Wartezeit - Gesamtwartezeit der Fahrgäste, die während der Beobachtungsdauer auf den Bahnsteigen aller Stationen eingestiegen sind. Als Wartezeit eines Fahrgastes zählt der Zeitraum von seiner Ankunft in der Station bis zum Zeitpunkt, an dem er in eine Kabine einzusteigen beginnt.

- Gesamtfahrtlänge - Streckenlänge, die Kabinen besetzt oder leer zurückgelegt haben.
- Umwegfaktor - Mit der Anzahl aller beendeten Fahrten F_{ij} gewichteter Mittelwert der Quotienten der kürzesten Entfernung im Netz zur Luftlinienentfernung zur Beurteilung der Netzbedienungs-güte.

$$U = \frac{1}{\sum_{ij} F_{ij}} \cdot \sum_{ij} \left(F_{ij} \cdot \frac{d_{ij}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \right)$$

- Einfahrtverzögerung - Summe aller Verzögerungszeiten, die anfallen, weil eine Station gesperrt ist und eine ein-fahrende Kabine auf der Hauptstrecke abbremst, ohne eine nachfolgende zu beeinflussen.
- Stationsaufenthaltsdauer - Mittelwert der Aufenthaltsdauer der Kabinen in Stationen von Einfahrt- bis Ausfahrtweiche.
- Matrizen:
 - Anzahl beendeter Leerfahrten,
 - Anzahl begonnener und beendeter Fahrten,
 - durchschnittliche Wartezeit der Fahrgäste,
 - Anzahl noch wartender Fahrgäste bei Simula-tionsende;
- ein Schaubild über die Zeit (vergl. Anlage 3),
 - das den Verlauf der Auslastung aller Bauteile mit fahrenden Kabinen angibt,
 - das den Verlauf der Auslastung aller Kabinen mit Fahrgästen angibt,
 - das den Verlauf der durchschnittlichen Warte-zeit der Fahrgäste angibt;
- für die einzelnen Stationen:
 - Angaben über die vorgegebene und tatsächliche Belastung mit Quell- und Zielverkehr,
 - Zahl der abgewiesenen besetzten Kabinen,
 - Zahl der am Simulationsende noch wartenden Fahrgäste;

- für die Einmündungsbauteile:
 - Angabe über die Belastung mit besetzten und leeren Kabinen auf Haupt- und Nebenstrecke,
 - Summe der Verzögerungszeiten durch Abbremsen auf der Nebenstrecke,
 - maximale Anzahl gleichzeitig stehender, wartender Kabinen auf der Nebenstrecke;
- für auszuwählende Stationen folgende Verteilungen mit Angabe von Mittelwert und Standardabweichung:
 - Fahrgastankunftsverteilung,
 - Kabinenankunftsverteilung,
 - Wartezeitverteilung der Fahrgäste,
 - Reisegeschwindigkeitsverteilung*,
 - Streckengeschwindigkeitsverteilung**;
- für auszuwählende Einmündungsbauteile:
 - Verteilung der Verzögerungszeiten,
 - Verteilung der Anzahl gleichzeitig wartender Kabinen auf der Nebenstrecke.

5.2 Stationsmodell

Eines der Hauptanliegen des Simulationsmodells KABSIM ist es, den Betriebsablauf in einem Netz nachzubilden, wobei die Stationsbauteile nur grob nachgebildet sind.

Um die Vorgänge innerhalb einer Station mikroskopisch betrachten zu können, wurde ein verfeinertes Stationsmodell gebildet, das den in Abschnitt 3. geschilderten Betriebsablauf nachbildet. Hierin lassen sich die einzelnen Funktionsbereiche

- Wartepositionen,
- Aussteigpositionen,
- Einstiegspositionen

längenmäßig angeben. Somit kann der Versuch unternommen werden, die Ausstattung einer Station mit diesen Funktions-

* Die Reisegeschwindigkeit ist hier definiert als Quotient aus dem zurückgelegten Weg zwischen Quell- und Zielstation und aus der Zeit, die für diesen Weg benötigt wird, einschließlich der Wartezeit in der Station.

** Die Streckengeschwindigkeit ist hier definiert als Quotient aus dem zurückgelegten Weg zwischen Quell- und Zielstation und aus der Zeit, die für diesen Weg benötigt wird, ausschließlich der Wartezeit in der Quellstation.

bereichen in Abhängigkeit von der Belastung der Hauptstrecke und der Zahl der Ein- und Aussteigenden zu optimieren. Das Modell ist in FORTRAN V für das UNIVAC Betriebssystem des Rechenzentrums der Universität Karlsruhe geschrieben. Es arbeitet zeitorientiert, wobei die Größe des Zeitschritts eingegeben wird.

5.2.1 Eingabedaten für das Stationsmodell

Folgende Daten können unter anderem eingegeben werden:

- Stationsbeschreibung,
 - Nr. des vordersten und des letzten Platzes, auf dem eingestiegen werden kann,
 - Zahl der Kabinen in der Station, bei deren Unterschreiten leere Kabinen angefordert werden sollen,
 - Nr. des Platzes, der als letzter besetzt sein darf, wenn ein Bedarf an Leerkabinen angemeldet werden soll,
 - Nr. des Platzes, bei dessen Inanspruchnahme durch haltende Kabinen weiter vorn stehende Kabinen unbesetzt gestartet werden können,
- Zeit, nach der eine weiter hinten abfahrbereit stehende besetzte Kabine eine weiter vorn stehende leere Kabine zur Abfahrt veranlassen kann,
- Mittelwert und Streuung der Ein- und Ausstiegszeiten,
- Zahl der Zusteiger pro Stunde,*
- mittlere Belastung der Stationshauptstrecke pro Stunde,*
- Anteil an Zielkabinen zur Station,*
- Anteil an Leerkabinen,*
- Angaben zur Fahrdynamik wie Geschwindigkeit, Verzögerung, Beschleunigung und Ruck.

* Eingabewerte aus KABSIM-Programm

5.2.2 Darstellung der Ergebnisse des Stationsmodells

Da der Weg der Kabinen sowohl zeitlich als auch räumlich durch die verschiedenen Funktionsbereiche der Station verfolgt wird, können die Funktionsbereiche gut daraufhin überprüft werden, ob sie ausreichend oder sogar überdimensioniert sind. Anlage 4 zeigt einen Ausschnitt der Bewegungen der Kabinen im Stationsbereich.

Außer statistischen Angaben über die tatsächlichen Belastungen der Gesamtstation durch Kabinen und Zusteiger enthält das Ergebnisprotokoll auch die Angaben über die Belastung der Funktionsbereiche.

Insbesondere enthält es Angaben über:

- die Blockierung der Einfahrt (Station durch besetzte Kabinen für weiter einfahrende gesperrt),
- die Blockierung der Ausfahrt (Kabinen finden auf der Hauptstrecke nicht sofort eine genügend große Zeitlücke und müssen warten),
- die Austauschvorgänge beim Aus- und Einsteigen (aus wievielen Kabinen wurde nur ausgestiegen, in wieviele sowohl aus- als auch eingestiegen).

Aus diesen Angaben können Rückschlüsse über die zweckmäßige Ausstattung bei vorgegebenen Belastungen getroffen werden.

6. Anwendung des Netzmodells KABSIM auf ausgewählte Netze

Zu Testzwecken wurde für das Netzmodell KABSIM ein einfaches 'Kreuznetz' bestehend aus zwei sich je zweimal schneidenden Ringstrecken mit Übergangsmöglichkeiten von einer zur anderen gebildet. Über erste Anwendungen wurde bei LAUBERT et al. (1975) berichtet.

Um diese Aussagen besser untermauern zu können, wurden zwei weitere Testnetze A und B gebildet. Beiden Netzen liegt ein identisches Stationsraster mit 39 Stationen zugrunde. Die Abstände der Trassenachsen betragen je 400 m.

Die bediente Fläche beträgt in beiden Fällen ca. 6.7 km^2 . Dieses Gebiet entspricht etwa einer mittleren Kleinstadt mit etwa 60.000 Einwohnern^{*)}. Das Verkehrsaufkommen in der Spitzenstunde beträgt dann 6.000 bis 7.000 Fahrten/h.

Bei einer gleichmäßigen Verteilung der Fahrtziele über die Stationen entspricht das in etwa 5 Fahrten von jeder Quelle zu jeder Zielstation. In der weiteren Untersuchung werden auch 7 bzw. 9 Fahrten je Zielstation angenommen, um so Überlastungserscheinungen analysieren zu können.

6.1 Netz A

Das Netz A hat quadratische Raster mit einem Achsabstand von 400 m. Die Fahrtrichtungen in den durchgehenden Strecken sind alternierend angeordnet (s. Anlage 5).

An den Schnittpunkten sind Übergänge in andere Strecken über Weichen möglich. Jeder Übergang besteht aus je zwei Verzweigungsweichen und je zwei Verflechtungsweichen.

^{*)} Nach HÜTTMANN (1976) kann bei einer mittleren Kleinstadt bei einer mittleren Geschosßflächenzahl von 0.5 ein mittlerer Flächenbedarf von ca. $110 \text{ m}^2/\text{Einwohner}$ angenommen werden.

Als Hauptstrecken sind jeweils die Durchgangsstrecken definiert, d.h. die Kabinen, die die Fahrtrichtung ändern, sind wartepflichtig.

Das Netz hat 39 Stationen und je 45 Verzweigungen und Verflechtungen. Die Gesamt-Strecken-Länge beträgt 31.5 km.

Anlage 6 zeigt die Matrix der Verkehrsbeziehungen. Es werden nur diejenigen in die Untersuchung einbezogen, die in der betrachteten Fahrtrichtung einen kürzeren oder gleichlangen Weg gegenüber der Gegenrichtung haben (vergl. Fußnote S. 52). Es sind dies 952 von 1482 möglichen Beziehungen, entsprechend 64%.

6.2 Netz B

Das Netz B hat ebenfalls quadratische Raster mit einem Achsabstand von 400 m. Im Gegensatz zu Netz A sind jedoch in den weiter außenliegenden Bereichen mehrere Maschen herausgenommen worden. Zusätzlich sind die Außenmaschen durch viertelkreisförmige Bögen verbunden, sodaß ein geschlossener Außenring entsteht (s. Anlage 7).

Das Netz hat 39 Stationen und je 17 Verzweigungen und Verflechtungen. Die Gesamt-Strecken-Länge beträgt 24.2 km.

Anlage 8 zeigt die Matrix der Fahrtbeziehungen. Die Zahl der in die Untersuchung einbezogenen Fahrtbeziehungen beträgt 794 von 1482 möglichen, das entspricht 54 %.

6.3. Ergebnisse

Im folgenden werden die Ergebnisse der Simulationsläufe, die den Betriebsablauf in einer Station betreffen, beispielhaft erläutert.

6.3.1 Verkehrsablauf vor der Einfahrt in eine Station

Die Ergebnisse der Simulationsläufe des KABSIM-Programms lassen eine Analyse des Verkehrsablaufs auf den Strecken anhand der Verteilung der Zeitlücken zwischen hintereinanderfahrenden Kabinen zu.

Anlage 9 zeigt beispielhaft eine Zeitlückenverteilung vor einer Stationseinfahrt, die für eine Verkehrsstärke von 1100 Kabinen/h gefunden wurde. Ein Chi-Quadrat-Test ergab, daß auch mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10% die Hypothese, daß die Zeitlückenverteilung eine negative Exponentialverteilung ist, nicht abgelehnt werden konnte.

Dieser Test wurde für das Netz A und B an einer Vielzahl von Strecken durchgeführt und bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,1$ konnte in keinem Fall die Hypothese einer negativen Exponentialverteilung abgelehnt werden.

Dieses Ergebnis ist wichtig, denn es erlaubt für die detaillierte Untersuchung der Vorgänge innerhalb der Station die Verwendung einer einfachen Funktion, um den Zulauf zur Station auf der Hauptstrecke zu beschreiben.

Eine weitere Analyse betrifft die Auslastung der Strecken mit leeren und besetzten Kabinen. In Anlage 10 ist als Beispiel für einen Simulationslauf (Netz A, 810 Kabinen im Umlauf, $F_{ij} = 7$ Fahrten/h) das Verhältnis leerer Kabinen zur Gesamtzahl über der Verkehrsbelastung aufgetragen. Der Bereich

der Verkehrsstärke schwankt zwischen 400 Kabinen/h und 2100 Kabinen/h, die Auslastung zwischen 0% und 84% leerer an der Gesamtzahl. Hier ist kein Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und dem Anteil der leeren Kabinen festzustellen. Deshalb kann für die detaillierte Stationsuntersuchung der Anteil an leeren Kabinen unabhängig von der Verkehrsstärke gewählt werden.

6.3.2 Zufluß von Kabinen in die Station

Im Gegensatz zum Streckenteil vor einer Stationseinfahrt sind die Zeitlücken aller Kabinen, die in die Station einfahren, nicht nach der negativen Exponentialfunktion verteilt. Die Störung wird durch die Ausstattung der Station bewirkt:

- Anzahl der Funktionsplätze,
- Bedarfsanmeldung,
- Verzögerung vor Einfahrt möglich,

und ist von der Belastung auf der Hauptstrecke abhängig.

Die Anlagen 11 und 12 zeigen beispielhaft diese Zeitlücken-Verteilungen. Bei dem Chi-Quadrat-Test mußte die Hypothese auf negative Exponentialverteilung bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0.01$ abgelehnt werden.

Da die Einfahrt in eine Station kein unabhängiges Ereignis ist, liegt die Vermutung nahe, daß die zugrundeliegende Verteilungsfunktion eine logarithmische Normalverteilung ist. Wegen der geringen Anzahl von Wertepaaren wurde eine nähere Untersuchung nicht durchgeführt, zumal die Verteilungsfunktion im Rahmen dieser Untersuchung ohne Bedeutung ist.

6.3.3 Wartezeiten der Zusteiger

Wie im Abschnitt 3.4.3 erläutert wurde, ist die ausreichende Versorgung der Stationen, die ein Leerkabinendefizit haben, das Ziel einer optimalen Leerkabinendisposition. Die in der Simulation verwendete "Wechselstrategie" ist zwar praktisch, aber nicht optimal. Beim Netz A werden z.B. die Stationen 4,10 und 11 und beim Netz B die Stationen 3 bis 7 aufgrund ihrer Randlage bei zunehmender Kabinenauslastung nicht mehr mit genügend Leerkabinen versorgt, so daß hier ein ständiger Fehlbedarf herrscht. Das drückt sich in einer monoton zunehmenden Wartezeit aus. Deshalb können diese speziellen Stationen nicht betrachtet werden. Die restlichen Stationen in beiden Netzen werden mit einer ausreichenden Zahl von Kabinen versorgt.

In Anlage 13 sind die Summenhäufigkeitslinien für die Wartezeiten aller Zusteiger für verschiedene Stationsausbildungen dargestellt und zwar für 4, 6 und 8 Abfertigungsplätze.

Mithilfe des Kolmogoroff-Smirnoff-Tests konnte nachgewiesen werden, daß sich die Wartezeitverteilungen für verschiedene Stationsausbildungen signifikant voneinander unterscheiden.

Bei allen Stationsausbildungen wartet niemand länger als 2 min ; bei 8 Plätzen warten 95% weniger als 1 min und bei 6 bzw. 4 Plätzen warten 97% der Zusteiger weniger als 1 min.

Die mittlere Wartezeit ist bei der Station mit 4 Plätzen am geringsten (15,3 sec) und steigt bei 6 Plätzen auf 16.7 sec und bei 8 Plätzen auf 22.6 sec .

Dies scheint ein Widerspruch zu sein, denn eine Vergrößerung der Abfertigungskapazität soll die Wartezeit verringern. Mit der größeren Zahl der Stellplätze nimmt jedoch die Aufenthaltszeit einer Kabine in der Station zu und zwar umso mehr,

desto mehr Plätze vorgerückt werden muß. Deshalb ist eine Verfügbarkeit nicht unmittelbar gegeben, sondern erst nach der Zeit, in der die Kabine vorrückt. Diese Vorrückzeit ist es auch, die zur Verlängerung der Wartezeit führt. In der Größenordnung entspricht sie in etwa der Verlängerung der Wartezeit.

Die geringfügig verlängerte Wartezeit kann in Kauf genommen werden, weil die Vermehrung der Abfertigungsplätze andere Vorteile für den Betrieb erbringt (vergl. Seite 80).

6.3.4 Abweisungsrate an gesperrten Stationen

Die Abweisungsrate ist der Quotient aus abgewiesenen Kabinen und der Verkehrsbelastung der Zulaufstrecke vor der Station.

Die Rate sollte für ein attraktives Verkehrsangebot sehr klein sein. DAIS und YORK (1974) geben als zumutbare Grenze einen Wert von 0,5% an.

Bei den Simulationsergebnissen konnte eine Abhängigkeit der Abweisungsrate von folgenden Größen nachgewiesen werden:

- Stationsgröße,
- Überschuß an Leerkabinen,
- Art und Maß der Bedarfsanmeldung.

- Stationsgröße

Der gravierendste Einfluß auf die Abweisungsrate geht vom Platzangebot der Station aus. Tabelle 6 zeigt als Beispiel die Ergebnisse von 3 Simulationsläufen für je 30 min Echtzeit für Netz A für die Stationen, die bei 4, 6 und 8 Abfertigungsplätzen noch Abweisungsraten größer null aufwiesen.

Station Nr.	Quell- verk. [Kab/h]	Ziel- verk. [Kab/h]	Haupt- strecke [Kab/h]	Abweisungsrate [%]		
				Plätze		
				4	6	8
4	136	216	440	7.63	3.18	1.42
10	284	68	416	0.48	0.49	0.48
13	114	240	1668	2.18	0.48	0.62
19	176	176	1828	2.55	0.11	0.11
22	176	176	1078	1.29	0.19	0.39
26	160	196	1706	2.12	0.35	0.26
27	104	248	1488	3.72	1.08	0.45
29	68	284	1530	2.60	1.44	0.43
30	132	222	1766	0.98	0.29	0.15
32	58	292	1898	5.48	2.62	0.58
37	140	212	604	3.64	0.62	0.37

Tabelle 6 Abweisungsraten bei unterschiedlicher Stationsgröße

Durch die Verdoppelung der Abfertigungsplätze kann somit die Abweisungsrate bis auf ca. 10% des ursprünglichen Wertes vermindert werden.

Überschuß an Leerkabinen

Kabinen werden fast nur an den Stationen abgewiesen, die einen rechnerischen Überschuß an Leerkabinen aufweisen, weil im Mittel mehr Fahrgäste aussteigen als einsteigen wollen. Das ist ebenfalls aus Tabelle 6 herauszulesen.

Diese überschüssigen Kabinen verlassen die Station leer. Herrscht auf der Hauptstrecke eine große Verkehrsstärke, schaffen sich diese Kabinen Platz, indem sie leere Kabinen in die Station beordern, um auf den freigewordenen Platz der Hauptstrecke einzufahren.

Dieses Auswechseln ist für die meisten Abweisungen verantwortlich. Um zu besseren Ergebnissen zu kommen, wurde das Ablaufschema für die Stationseinfahrt (Abb. 3) dahin geändert, daß leere Kabinen dann nicht aus der Station ausfahren, wenn sie dafür eine andere leere in die Station schicken würden. Diese Änderung ist problematisch, weil dadurch eventuell besetzte Kabinen, die hinter einer leeren auf die Ausfahrt warten, behindert werden. Da jedoch gerade an den Stationen, an denen diese Probleme auftreten, eine unterdurchschnittliche mittlere Wartezeit vorhanden ist, ist diese Änderung keine bedeutende Verschlechterung für die Zustieger.

Art und Maß der Bedarfsanmeldung

Bei GODFREY (1974) wird über verschiedene Schwellenwerte der Bedarfsanmeldung berichtet. Die Wartezeiten sind immer dann am geringsten, wenn eine Kabine mehr in der Station zur Verfügung steht als für die Befriedigung des Bedarfs notwendig ist.

Dieser Schwellwert wurde für diese Arbeit übernommen. Es zeigte sich jedoch, daß durch das Hereinholen von zusätzlichen Kabinen die Abweisungsrate immer dann sehr hoch ist, wenn in der Station im Mittel ein Leerkabinenüberschuß vorhanden ist. Durch die Änderung der Bedarfsmeldung in der Weise, daß für diese Stationen keine zusätzlichen Kabinen angefordert werden, konnte die Abweisungsrate verringert werden, wie Tabelle 7 zeigt.

Station	Quell- verk. [Kab/h]	Ziel- verk. [Kab/h]	Haupt- strecke [Kab/h]	Mindest- Puffer	Abweisungsrate [%]
36	82	186	2572	1	1.09
	82	186	2536	0	0.24
37	40	228	2574	1	2.87
	40	228	2564	0	2.26

Tabelle 7 Abweisungsrate bei verschiedenen Bedarfsmeldungen für eine Station mit 8 Plätzen

Am Beispiel der Station 37 zeigt sich, daß bei einem großen Kabinenüberschuß und einer großen Verkehrsstärke auf der Hauptstrecke eine Verringerung der Abweisungsrate nur noch begrenzt erreichbar ist.

Für diese Fälle muß die Kombination verschiedener Maßnahmen einsetzen, wie sie im Abschnitt 7.8 beschrieben ist.

6.3.5 Einfluß der Abweisungsrate auf die Streckengeschwindigkeit

Nach Definition gehen in die Streckengeschwindigkeit nur die Zeitverluste ein, die eine Kabine während einer Fahrt durch Wartezeiten an Einmündungen oder durch Verzögerungen vor Stationseinfahrten erfährt. Abgewiesene Kabinen müssen zudem einen längeren Weg als den der kürzesten Route zur Zielstation fahren. Das drückt sich in einem zusätzlichen Zeitverlust aus.

Dieser Zeitverlust ist mindestens so groß, wie die Fahrt-dauer auf der kürzesten Schleife zurück zur abweisenden Station. Durch Augenschein ist ersichtlich, daß im Netz A (Anlage 5) die kürzeste Schleife die Umfahrung eines Quadrats ist. Die Fahrtlänge beträgt 1600 m und der Zeitverlust 160 sec.

Im Netz B (Anlage 7) herrschen für einige Stationen auf dem Außenring, z.B. Nr. 12 oder Nr. 28 extrem schlechte Bedingungen. Die Länge der kürzesten Schleife beträgt 4000 m und der Zeitverlust mindestens 400 sec.

Durch diese Umwegfahrten erreichen die abgewiesenen Kabinen bezogen auf den kürzesten Weg von Quelle zu Ziel Streckengeschwindigkeiten von 1-2 m/sec. Das bedeutet, daß in diesen Fällen das Ziel in der gleichen Zeit auch zu Fuß erreichbar gewesen wäre.

Wird darüberhinaus berücksichtigt, daß der mittlere gewichtete Umwegfaktor $U = 1.70$ im Netz A und $U = 1.96$ im Netz B beträgt, verschlechtert sich die Attraktivität zunehmend.

6.3.6 Zeitverluste an Zusammenführungsweichen

Die Ergebnisse der Simulation lassen eine Beurteilung der Zeitverluste an den Zusammenführungsweichen im Verhältnis zu anderen Zeitverlusten zu.

In Anlage 14 ist für 2 Simulationsläufe die Häufigkeitsverteilung von Zeitverlusten an Einnündungen dargestellt.

Die Wahrscheinlichkeit für das gleichzeitige Eintreffen von 2 Kabinen an einer Einnündung, die denselben Platz auf der weiterführenden Strecke beanspruchen, hängt von den Intensitäten λ der beiden Verkehrsströme ab.

Für den Fall des gleichzeitigen Eintreffens muß die Kabine aus dem Nebenstrom verzögern und eventuell bis zum Stillstand abbremsen, bis eine Zeitlücke im Hauptstrom verfügbar wird.

In Anlage 15 ist der Verlauf der Verlustzeit innerhalb des simulierten Zeitraums von 30 min in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke des zusammengeführten Hauptstroms dargestellt. Im Mittel betrug die Belastung der Hauptstrecken 690 Kabinen/h und die der Nebenstrecke 580 Kabinen/h.

Die Zeitverluste durch die Verzögerungen an den Einnündungen sind bezogen auf eine Kabine sehr gering. Der maximale Verlust liegt bei 10 sec für eine beobachtete Kabine. Der mittlere Verlust liegt bei 0,3 sec mit einer Standardabweichung von 0,6 sec.

Gegenüber den Zeitverlusten der Fahrgäste, die diese durch das Warten auf leere Kabinen oder durch eine Umwegfahrt wegen einer blockierten Station erfahren, treten die Verluste durch die Zusammenführungsweichen in den Hintergrund.

Nicht die Verlustzeiten an Zusammenführungsweichen, sondern die Abfertigungskapazität der Stationen bestimmt das Leistungsvermögen eines Kleinkabinennetzes und damit dessen Attraktivität. Diese Aussage wird durch die Ergebnisse der Untersuchungen von HAENICKE(1977) bestätigt.

7. Anwendung des Stationsmodells

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Grundlagen für die mikroskopische Simulation einer Kleinkabinenstation erläutert und der qualitative Einfluß auf die Leistungsfähigkeit dargestellt.

Mithilfe der verfeinerten Betrachtung an einer einzelnen Station sollen auch die Größenordnungen der Einflüsse bestimmt werden.

Im einzelnen werden folgende Einflußfaktoren untersucht:

- Bedarfsanmeldung,
- Startplätze,
- Aussteigplätze,
- Einsteigplätze,
- Kombinierte Ein- und Aussteigplätze,
- Warteplätze.

7.1. Grunddaten für die Simulation

Wie beim Abschnitt 6.3.1 nachgewiesen wurde, kann als Verteilungsfunktion der Zeitlücken für den Zulauf von Kabinen zu Stationen die negative Exponentialverteilung mit einer Mindestzeitlücke in der Größe der Bruttokabinenabstände angenommen werden. Somit kann durch Angabe der mittleren Zeitlücke ein stochastischer Fahrzeugstrom mithilfe eines Zufallszahlengenerators erzeugt werden. Durch Angabe eines Prozentsatzes wird in besetzte und leere Kabinen unterteilt.

Die Zusteigerankünfte werden auf die gleiche Art mithilfe eines Zufallszahlengenerators auf der Grundlage einer negativen Exponentialverteilung erzeugt. Auch hier genügt die

Angabe der mittleren Zeitlücke als Kehrwert der Zusteigerintensität. Da im Stationsmodell nicht nach Zusteigerzielen unterschieden werden muß, genügt dieser einfache Prozess.

Der dritte Zufallseinfluß geht von den Aus- und Einsteigezeiten aus. Durch Angabe des Mittelwertes und der Standardabweichung werden diese Zeiten mithilfe einer vom Betriebssystem des Rechners zur Verfügung gestellten Prozedur nach einer Normalverteilung erzeugt. Die Station selber wird durch Angabe der Anzahl der verschiedenen Funktionsplätze und der geometrischen und fahrdynamischen Werte für die Längen der Trennstrecken sowie der Brems- und Beschleunigungsbereiche definiert.

7.2. Einfluß der Bedarfsanmeldung

Über die Bedarfsanmeldung steuert eine Station den Zulauf von leeren Kabinen.

Bei deterministischer Betrachtung des Betriebsablaufs ist nur dann in einer Station ein Bedarf an leeren Kabinen vorhanden, wenn im Mittel weniger besetzte Kabinen ankommen als Zusteiger abfahren wollen. In der Realität ist der Zulauf jedoch von zufälliger Natur und deshalb eine Bedarfsanmeldung unabhängig vom Verhältnis ankommender besetzter Kabinen zu Zusteigern, um die Wartezeiten gering zu halten.

Im Stationsmodell wird die Bedarfsanmeldung wie folgt gesteuert:

- Erst, wenn eine vorzugebende Zahl von letzten Plätzen durch Kabinen unbesetzt ist, wird die Anmeldung wirksam.
- Bei Unterschreiten einer vorzugebenden Zahl von Kabinen (Mindestpuffer), die sich in der Einfahrt oder auf den Plätzen befinden, werden Leerkabinen angefordert.

Die beiden Zahlen wurden für verschiedene Verkehrsstärken der Hauptstrecke und für verschiedene Verhältnisse von ankommenden besetzten Kabinen zu Zusteigern variiert.

Am Beispiel einer Station mit 10 Plätzen, die sowohl zum Aussteigen als auch zum Einsteigen bestimmt sind, werden die Auswirkungen dargestellt.

Es zeigt sich, daß die Abweisungsrate im Gegensatz zur Wartezeit bei der Verwendung verschiedener Startzahlen des Zufallszahlengenerators starken Schwankungen unterworfen ist. Deshalb sind bei der Darstellung der Abweisungsrate in Anlage 16

nur die Bereiche wiedergegeben, in denen sich die Ergebnisse bewegen. Zwischen der Abweisungsrate und der Verkehrsstärke der Zulaufstrecke besteht kein Zusammenhang.

Es kann aber festgestellt werden, daß sich die geringste Abweisungsrate bei einem Mindestpuffer von 1 einstellt.

Dieses Ergebnis wird durch den Verlauf der mittleren Wartezeit bestätigt. Die Wartezeiten sind sehr gering und im Bereich der Verkehrsstärken größer 800 Kabinen/h unabhängig von der Verkehrsstärke. Sie nehmen jedoch aufgrund der höheren Abweisungsrate bei größeren Mindestpuffern zu, wobei die minimale Wartezeit bei einer Puffergröße von 1 gefunden wurde.

Bei einem Verhältnis von ankommenden besetzten Kabinen zu Zustiegern ≤ 1 bleibt diese Tendenz bestehen, zeigt sich jedoch nicht mehr so klar, wie in Anlage 17 dargestellt ist.

Hier sind die Abweisungsrate höher als in Anlage 16, da jetzt die Stationsplätze wegen mehr Ein- und Aussteigevorgängen länger belegt sind und eine größere Anzahl leerer Kabinen in die Station geholt wird.

Bei einer zufällig günstigen Folge von besetzten Kabinen und leeren Kabinen kann die Abweisungsrate auch bei größeren Mindestpuffern die Werte erreichen, die sich bei einer optimalen Puffergröße 1 ergeben.

Die mittleren Wartezeiten sind auch für diesen Belastungsfall sehr gering, da durch die ständige Versorgung mit leer werdenden Kabinen praktisch keine Warteschlangen von Zustiegern entstehen.

Es wurde auch untersucht, welchen Einfluß eine Bedarfsanmel-

ung hat, die erst dann wirksam wird, wenn mehrere letzte Plätze unbelegt sind.

Es zeigte sich, daß die Ergebnisse mit denen der Mindestpuffergröße 0 vergleichbar sind, unabhängig von der gewählten Mindestpuffergröße. Die Erklärung liegt darin, daß die letzten Plätze nur selten leer sind und damit die Anmeldung kaum wirksam wird.

Die Bedarfsanmeldung einer Station sollte daher immer von einer Mindestpuffergröße 1 ausgehen, unabhängig davon, welche Plätze in der Station frei oder belegt sind.

7.3. Einfluß von Startplätzen

Startplätze haben die Funktion, abfahrbereite Kabinen aufzunehmen, die auf diesem Platz solange verweilen können, bis auf der Hauptstrecke eine Zeitlücke zum Einfädeln gefunden ist. Die Startplätze sollen nicht durch Ein- und Aussteigevorgänge von Zustiegern in ihrer Funktion beeinträchtigt werden.

Für das Stationsmodell wurde für jeweils verschiedene Verkehrsstärken und Aussteiger-Zusteiger-Verhältnisse die Anzahl der Startplätze variiert.

q [Kab/h]	Start- plätze	A-E plätze	\bar{w} [sec]	AR [%]	Start- plätze	A-E plätze	\bar{w} [sec]	AR [%]
2000	0	7	27	3.4	0	7	27	3.4
	1	7	23	2.8	0	8	31	2.0
	2	7	21	0.8	0	9	20	0.9
	3	7	22	0.5	0	10	29	1.1
2500	0	7	27	3.0	0	7	27	3.0
	1	7	20	2.4	0	8	22	2.0
	2	7	20	1.0	0	9	16	1.4
	3	7	25	0.9	1	10	28	0.6
3000	0	7	17	3.0	0	7	17	3.0
	1	7	17	2.2	0	8	19	1.9
	2	7	16	0.9	0	9	22	1.7
	3	7	16	0.5	0	10	18	1.8
3500	0	7	19	3.5	0	7	19	3.5
	1	7	13	2.0	0	8	15	2.1
	2	7	10	1.8	0	9	21	1.9
	3	7	12	1.1	0	10	11	1.5

Tabelle 8 Mittlere Wartezeit \bar{w} und Abweisungsrate AR in Abhängigkeit von der Belastung q und der Anzahl von Startplätzen

Als Ergebnis eines Beispiels zeigt sich aus Tabelle 8, daß die Anlage von Startplätzen keinen signifikanten Einfluß auf die mittlere Wartezeit der Zustieger hat. Die Abweisungsrate kann dagegen durch die Anlage von Startplätzen verringert werden. Diese Verminderung ergibt sich jedoch nicht aus der speziellen Funktion der Startplätze, sondern aus dem Umstand, daß in der

Station mehr Plätze zur Verfügung stehen. Im rechten Teil der Tabelle sind die Ergebnisse für gleiche Belastungen wiedergegeben, wenn anstelle der Startplätze gleichviele kombinierte Aus- und Einsteigplätze (A-E-Plätze) vorhanden sind. Sowohl für die mittlere Wartezeit als auch für die Abweisungsrate ergeben sich ähnliche Werte wie bei der Anordnung von gleichvielen Startplätzen.

In Anlage 4 ist für eine Station mit 10 Plätzen und davon 2 Startplätzen bei einer Verkehrsstärke von 2000 Kabinen/h und 400 Zustiegern/h deutlich zu sehen, daß praktisch nur der 1. Platz als Startplatz dient. Der 2. Platz wird immer übersprungen.

Es wird deshalb empfohlen, wenn überhaupt nur einen Startplatz anzulegen und weitere Plätze dann mit anderen Funktionen zu belegen.

7.4 Einfluß der Aussteigplätze

Aussteigplätze haben die Funktion, Fahrgäste aus den Kabinen aussteigen zu lassen. Stehen mehrere Aussteigplätze zur Verfügung, wird immer bis zu dem Platz vorgerückt, der am weitesten vorn liegt. Anlage 18 zeigt die typische Verteilung der Platzausnutzungen bei einer Station mit 10 Plätzen und 3 bis 10 Aussteigplätzen. Es ist deutlich zu erkennen, daß bei diesem Beispiel ca. 85 % der Aussteigvorgänge auf den ersten 5 Plätzen stattfinden. Die darüberhinaus verfügbaren Plätze werden kaum zum Aussteigen beansprucht.

7.5 Einfluß der Einsteigplätze

Einsteigplätze haben die Funktion, Zustieger in die Kabine einsteigen zu lassen. Stehen mehrere Einsteigplätze zur Verfügung, steigt der Zustieger in die am weitesten vorne stehende Kabine ein. Für das Beispiel aus Anlage 18 ist in Anlage 19 die Platzausnutzung für die Einsteigplätze dargestellt. Auch hier ist deutlich zu erkennen, daß ca. 90 % der Einsteigvorgänge auf den ersten 5 Plätzen stattfinden. Die darüberhinaus verfügbaren Plätze werden nur wenig ihrer Funktion entsprechend benutzt.

7.6 Einfluß der kombinierten Aus- und Einsteigplätze

Kombinierte Aus- und Einsteigplätze (A-E-Plätze) dienen dem Aus- und Einsteigen auf derselben Position einer Station, ohne daß zwangsläufig von einer Aussteig- zu einer Einsteigposition vorgerückt werden muß.

Bei einer Station mit einer zunehmenden Zahl von A-E-Plätzen nimmt der Anteil der Kabinen ab, die während des Haltes sowohl zum Aus- als auch zum Einsteigen auf derselben Position benutzt werden, wie aus Abbildung 21 ersichtlich ist.

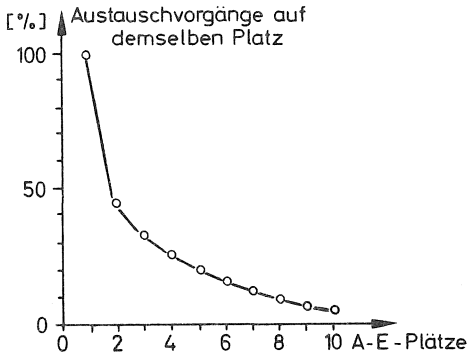


Abb. 21 Aus- und Einsteigvorgänge auf derselben Position ohne vorzurücken

Das bedeutet, daß mit zunehmender Zahl von A-E-Plätzen die Kombination von Aus- und Einsteigvorgang auf derselben Position nicht zum Tragen kommt und die Wirkung aufgehoben ist, weil zeitaufwendige Vorrückbewegungen zwischen Aus- und Einsteigvorgängen zwischengeschaltet werden.

Stationen mit kombinierten A-E-Plätzen haben gegenüber solchen mit monofunktionalen Aus- bzw. Einsteigplätzen den Vorteil, daß sie kürzer sind. Betrieblich bringt das den Nachteil mit sich, daß sich Ein- und Aussteiger an den Kabinentüren begegnen und behindern können. Wegen der geringen Länge ist eine solche Station jedoch besser zu überschauen. Monofunktionale Plätze bringen gegenüber den kombinierten A-E-Plätzen keinen Vorteil, sondern eher den Nachteil, daß jede Kabine mindestens 2 Mal anhält, während im anderen Fall ein gewisser Anteil von Kabinen nur einmal anhält und somit die Aufenthaltszeit geringer wird.

Es wird deshalb vorgeschlagen, nur kombinierte A-E-Plätze vorzusehen, deren Zahl jedoch zu begrenzen ist. Zu Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Zahl der A-E-Plätze und der Zahl der Aus und Einsteigvorgänge wurden Stationen mit 20 Positionen mit verschiedenen starken Hauptstrecken- sowie Ein- und Aussteig-Intensitäten belastet und die Anzahl der A-E-Plätze variiert.

Als Ergebnis ist in Anlage 20 zu sehen, daß ab 10 A-E-Plätzen die Zahl der Aus- bzw. Einsteigvorgänge nur noch sehr langsam steigt. Hier liegt die Grenze der praktischen Stationsgröße. Die Aus- und Einsteigvorgänge hängen stark von der mittleren Aus- bzw. Einsteigzeit \bar{t} ab. Je länger diese andauert, desto geringer ist die Leistungsfähigkeit. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls aus Anlage 20 ersichtlich. In Tabelle 9 sind die Grenzen der praktischen Leistungsfähigkeit für 10 A-E-Plätze wiedergegeben.

	Einsteiger/h	Aussteiger/h
$\bar{t} = 6 \text{ sec}$	800	600
$\bar{t} = 8 \text{ sec}$	650	480

Tabelle 9 Grenzen der praktischen Leistungsfähigkeit

Die Zahl der möglichen Aussteigvorgänge ist generell geringer als die der Einsteigvorgänge. Das ist damit zu erklären, daß die Kabinen der Einsteiger weniger potentielle Blockierungsmöglichkeiten für ihre Abfahrt haben als die Aussteiger und deshalb die Station schneller räumen können und somit für neue Einsteiger schneller Platz machen. Die Kabinen der Aussteiger können zusätzlich durch die Vorrückvorgänge und weiter vorne liegende Einsteigvorgänge in ihrer Bewegung blockiert werden, was sich im verminderten Durchsatz ausdrückt.

Diese Aussage gilt jedoch nur bis zu einer Hauptstreckenbelastung bis 2500 Kabinen/h. Darüberhinausgehende Verkehrsstärken beeinflussen die Stationsausfahrt, so daß in der Station ein Rückstau entsteht, der hierin alle Bewegungen stoppt. Das bedeutet eine Reduktion der oben genannten Zahlen.

7.7 Einfluß der Warteplätze

Warteplätze haben die Funktion, Kabinen aufzunehmen, die nicht direkt auf Abfertigungsplätze vorrücken können. Auf den Warteplätzen selber darf nicht ausgestiegen werden, um bei Freiwerden von belegten Abfertigungsplätzen ohne Verzug vorrücken zu können und somit die Warteplätze für neu in die Station einfahrende Kabinen freizumachen. Aus diesem Grunde können Warteplätze außerhalb des Abfertigungsbereichs von Stationen angeordnet sein.

Zur Untersuchung des Einfluß des Warteplätze wurden Stationen mit n -Positionen angenommen und bei gleichen äußeren Verkehrsbelastungen die Zahl der Warteplätze von $n-1$ bis 0 vermindert.

Als Ergebnis ist in Anlage 21 der Verlauf der Aus- und Einsteigvorgänge, der mittleren Wartezeit und der Abweisungsrate bei einer Station mit $n = 10$ Positionen dargestellt.

Es ist deutlich zu erkennen, daß der Verlauf der Abweisungsrate bei 4 - 7 Warteplätzen ein Minimum aufweist. Weniger aber auch mehr Warteplätze haben höhere Abweisungsrate zur Folge.

Dieses gefundene Minimum korrespondiert mit einem Maximum an Aus- und Einsteigvorgängen bei gleicher Anzahl von Warteplätzen.

Die mittlere Wartezeit der Zusteiger erreicht bei 4 - 5 Warteplätzen einen zumutbaren Wert. Der Verlauf der Kurven ist für 300 Aussteigvorgänge und für eine mittlere Zusteigerbelastung von 300 Zusteigewünschen/h und für eine hohe Zusteigerbelastung von 600 Zusteigewünschen/h qualitativ ähnlich. Die gefundene Konfiguration mit 5 Warte- und 5 A-E-Plätzen ist für beide Belastungsfälle optimal.

Bei darüberhinausgehenden Belastungen erhöht eine vermehrte Zahl von Warteplätzen die Abfertigungsrate nicht.

Für die Bestückung einer Station gilt deshalb, daß mindestens 2 und maximal 7 Warteplätze anzuordnen sind, in Abhängigkeit von der Anzahl der A-E-Plätze.

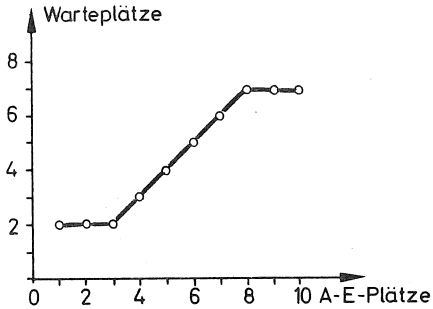


Abb. 22 Empfohlene Anzahl von Warteplätzen in Abhängigkeit von der Anzahl der Aus- und Einsteigplätze

7.8 Dimensionierung einer Station

In den vorhergehenden Abschnitten sind die Einflüsse verschiedener Positionsfunktionen erläutert worden. Sie sind die Grundlagen zur Dimensionierung einer eingleisigen Station. Als oberste Zustiegsbelastung gelten 800 Einsteigvorgänge/h und 600 Aussteigvorgänge/h.

Zunächst ist für die Aus- und die Einsteigvorgänge eine mittlere Zeitdauer zu wählen. Aus Anlage 20 ist dann für eine vorgegebene Belastung mit Ziel- und Quellverkehr die dazugehörige Zahl von A-E-Plätzen zu wählen, wobei die größere Zahl zu nehmen ist. Die zu dieser Zahl dazugehörige Anzahl von Wartepätzen ergibt sich aus Abbildung 22.

Im allgemeinen stellt sich hiernach ein Betriebsablauf mit geringen Abweisungsrate und niedrigen Wartezeiten ein.

Bei großen Leerkabinen-Defiziten oder -Überschüssen oder sehr hoher Dichte im Hauptstrom kann es jedoch zu hohen Abweisungsrate oder zu größeren Wartezeiten kommen.

In Anlage 22 ist ein Ablaufdiagramm gegeben, mithilfe dessen der Betriebsablauf durch Änderung der Stationsausstattung verbessert werden kann. Hierin sind die Ergebnisse der Abschnitte 7.2 bis 7.7 qualitativ wiedergegeben.

Die Veränderungen betreffen die Steuerungsebenen "Station" und "Netz". Zunächst wird festgestellt, ob bei einer kleinen Abweisungsrate die Wartezeiten zu groß sind. In diesem Fall liegt die Strecke, an der sich die Station befindet, in einem Netzbereich, der nicht mit genügend Leerkabinen versorgt wird. Hier kann nur eine Verbesserung der Leerkabinendisposition einen befriedigenden Betriebsablauf bewirken.

Bei einer sehr hohen Abweisungsrate kann entweder durch

- Änderung der Bedarfsanmeldung oder durch
- Vermehrung von Warteplätzen oder durch
- Anlage von Startplätzen oder durch
- Vermehrung von A-E-Plätzen

eine Verbesserung erreicht werden, je nach Randbedingung aus dem Ablaufdiagramm.

Dieses Schema gilt nicht für Sonderfälle wie:

- nur sehr viele Aussteiger oder
- nur sehr viele Einsteiger,

weil hier die Funktionsfähigkeit nur von der Versorgung mit Leerkabinen oder der Entsorgung von Leerkabinen abhängt.

8. Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war es, die wichtigsten Einflußfaktoren auf den Betriebsablauf und die Leistungsfähigkeit einer Kleinkabinenbahnstation zu untersuchen und die Zusammenhänge quantitativ darzustellen.

Zunächst wurden die Ablaufvorgänge von Kabinen im Stationsbereich analysiert und anhand der fahrdynamischen Größen Ruck, Beschleunigung und Betriebsgeschwindigkeit die geometrischen Randbedingungen gefunden (s. Abschnitte 3. und 4.). Die Ablaufvorgänge wurden in Simulationsmodellen für große vermaschte Netze und für eine Station nachgebildet, worin die geometrischen Randbedingungen enthalten sind (s. Abschnitt 5.). Durch Variation maßgeblicher Größen konnten die gesuchten Zusammenhänge gefunden werden (s. Abschnitte 6. und 7.).

Die Ergebnisse der Simulationen beziehen sich auf den Betriebsablauf und die Leistungsfähigkeit von Stationen. Es sind dies im wesentlichen folgende:

- Der Zulauf von Kabinen zu einer Stationseinfahrtweiche ist ein Poisson-Prozeß, während der Zulauf der in die Station einfahrenden Kabinen keinen Poisson-Prozeß darstellt, da hier bereits Rückwirkungen des Betriebsablaufs auf den Zulauf wirksam werden.
- Unterschiedliche Stationsgrößen führen zu statistisch signifikant unterschiedlichen Wartezeitverteilungen der Zusteiger.
- Die Abweisungsrate ist abhängig von der Stationsgröße, vom Leerkabinenüberschuß sowie von Art und Maß der Bedarfsmeldung. Über die Blockumfahrungen abgewiesener Kabinen beeinflusst die Abweisungsrate ebenfalls die Reisegeschwindigkeit.

- Um eine hohe Attraktivität zu erreichen, sind die Warte- und Verlustzeiten innerhalb der Station niedrig zu halten. Die Verlustzeiten während einer Fahrt im Netz sind im Verhältnis zu den Verlustzeiten in der Station sehr gering.
- Die Leistungsfähigkeit (Summe der Aus- und Einsteigvorgänge) hängt ab vom Zeitbedarf für das Aus- und Einsteigen sowie von der Zahl der verfügbaren kombinierten Aus- und Einsteigplätze (A-E-Plätze). Stationen mit 10 A-E-Plätzen auf einem Stationsfahrbalken können maximal 600 Aussteiger und 800 Einsteiger je Stunde abfertigen bei einem mittleren Zeitbedarf von je 6 sec für das Aus- und Einsteigen. Mehr als 10 A-E-Plätze bringen keinen nennenswerten Leistungszuwachs.

Die vorliegende Arbeit stellt einen Beitrag dar zur Klärung der Fragen des Betriebsablaufs und der Leistungsfähigkeit einer Station mit einem Stationsfahrbalken. Zur weiteren Klärung der Probleme von Kleinkabinenbahnstationen sollten die Einflüsse weiter untersucht werden, die in dieser Arbeit nur gestreift wurden:

- mehrere Stationsfahrbalken,
- haben andere als die untersuchten Netzformen einen Einfluß,
- Netzdichte in Abhängigkeit von der Beanspruchung.

Mit höchster Priorität sollte aber das Problem der abgewiesenen Zielkabinen weiter untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- Anderson, I.E. Planning for personal rapid transit, University of Minnesota, Task force on new concepts in urban transportation, Minneapolis 1972
- Bahn, G.
Laubert, W. Modelle zur Simulation des Betriebsablaufs von neuen Personennahverkehrssystemen, Vorläufiger Bericht Nr. 20, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, 1975
- Becker, K. Über den Einfluß von Fahrgeschwindigkeit und Streckennetz auf Verkehrsmenge und Kostenstruktur einer neuartigen Kabinenbahn, Fördertechnische Mitteilungen, DEMAG-Fördertechnik, Wetter (Ruhr) 1975
- Bergmann, D.R. Capacity of automated fixed guideway transportation System Stations with multiple loading positions: Station capacities for personal rapid transit systems. Vortrag anl. der 41. Tagung der Operation Research Society of America, New Orleans 1972
- BO-Strab Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen, Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe e.V. (VÖV), Köln 1965
- Dais, J.L.
Kornhauser, A.L. Economic and environmental aspects of PRT - A further study. Vortrag anl. Intersociety Conference on Transportation, Denver 1973
- DEMAG-MBB Systemanalyse Nahverkehrsmittel Cabinentaxi, Wetter (Ruhr) 1971
- Felz, H.
Grabe, W. Neue Verkehrssysteme im Personennahverkehr, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1974
- Gebhard, J.W. Acceleration and comfort in public ground transportation. Transportation programs report TPR 002, John Hopkins University, Silver Spring 1970
- Godfrey, M.B. An economic analysis of operating policies and station designs for a closed loop PRT-network. Vortrag anl. 44. National Meeting of Operation Research Society of America, San Diego 1973
- Godfrey, M.B. Economic and performance evaluations of operating policies for a closed loop PRT-network, in Personal Rapid Transit II, Minneapolis 1974

- Haenicke, W. Der Einfluß von Verflechtungen in einem bedarfsorientierten Nahverkehrssystem auf die Reisegeschwindigkeit, Heft 13 der Schriftenreihe des Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, 1977
- Hannover, H.O.
Spöler, H.G. Trassierungsgrundlagen und Lastannahmen für das Cabintaxi, Teil I und II, in: Verkehr und Technik, Heft 3, 1974 und Heft 6, 1975
- Hüttmann, R. Netzgestaltung von Kabinenbahnen, Grundsätze-Planungsverfahren - Empfehlungen, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Technische Universität Hannover, 1976
- Kornhauser, A.L.
Mac Evaddy, P. A quantitativ analysis of synchronous vs. quasi synchronous network operations of dual-mode and PRT systems, unveröffentlichtes Manuskript 1974
- Laubert, W. Betriebsprobleme an einer Haltestelle eines hypothetischen, bedarfsorientierten Teilverkehrssystems, in Heft 6 der Schriftenreihe des Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, 1972
- Laubert, W.
Leutzbach, W.
et al. Betriebliche Probleme im Zusammenhang mit neuen Nahverkehrssystemen, Untersuchung mit Unterstützung der DFG, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, im Manuskript vervielfältigt, 1975
- Leutzbach, W "Überall ist Babylon- ein Beitrag zu einigen Begriffen im Verkehrswesen", in: Internationales Verkehrswesen, Heft 5, 1975
- Liopiros, K.J. PRT station operational strategies and capacities, in Personal Rapid Transit II, Minneapolis 1974
- Lorenz, H. Trassierung und Gestaltung von Straßen und Autobahnen, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1971
- Scharmack, D.K. Optimal empty vehicle shuttling in demand activated urban transportation systems, Ph.D. Thesis, University of Minnesota, 1972
- Schniedel, R. Ankunftsverteilungen von Fahrgästen an Haltestellen öffentlicher Verkehrsmittel, Vertiefungsarbeit, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, 1974

- Sirbu, M.A. Station configuration, network operating strategies and station performance, in Personal Rapid Transit II, Minneapolis 1974
- SNV - Vergleichende Untersuchung über bestehende und künftige Nahverkehrstechniken, Studiengesellschaft Nahverkehr Hamburg, 1973
- Wadell, M.C. Disposition of empty vehicles in a personal rapid transportation, John Hopkins et al. University, Silver Spring, 1974
- York, H.L. The simulation of a PRT system operating under quasi synchronous control, in Personal Rapid Transit II, Minneapolis 1974

Verzeichnis der Abbildungen

- 1 Theoretische Stationsleistungsfähigkeit von Cabisentaxi-Stationen
- 2 Kabinen für das Cabisentaxi-System
- 3 Ablaufdiagramm für die Regelung der Stationseinfahrt
- 4 Zuordnung der Aktivitäten zu den Datenebenen des hierarchischen Systems
- 5 Stationsausbildung bei Kleinkabinensystemen
- 6 Weiche mit Kreisbogen
- 7 Stationseinfahrt mit Klothoidenbogen
- 8 Weiche mit Klothoidenbogen
- 9 Trennstrecke bei einer Weiche mit Klothoidenbogen
- 10 Beschleunigungs- und Verzögerungsprofil
- 11 Stationen mit mehreren Stationsfahrbalken
- 12 Stationslänge für Typ I
- 13 Stationslänge für Typ II
- 14 Stationslänge für Typ III
- 15 Länge und Breite für verschiedene Stationstypen
- 16 Minimale Rasterweite für ein Streckennetz
- 17 Länge von Übergangsrampen
- 18 Stationsschema
- 19 Einmündungsschema
- 20 Abzweigungsschema
- 21 Aus- und Einsteigvorgänge auf derselben Position ohne vorzurücken
- 22 Empfohlene Anzahl von Warteplätzen in Abhängigkeit von der Anzahl der Aus- und Einsteigplätze

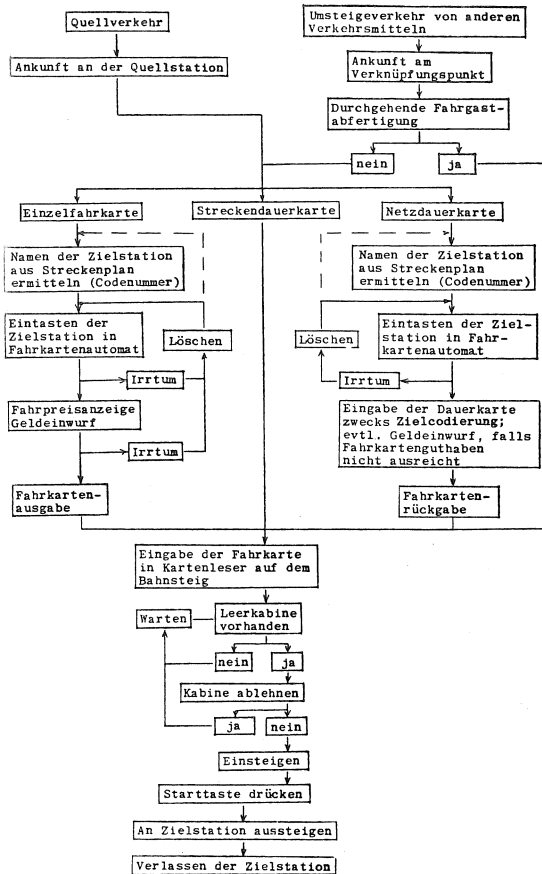
Verzeichnis der Tabellen

- 1 Seitenbeschleunigung bei Kurvenfahrt
- 2 Zentriwinkel und Entwicklungslängen einer Weiche mit Kreisbogenform
- 3 Vorrückzeiten in Abhängigkeit von der Anzahl der Vorrückplätze
- 4 Gesamtlängen und Durchfahrtzeiten einer Off-line-Station mit einer Nebenstrecke
- 5 Flächenbedarf für verschiedene Stationstypen in Abhängigkeit von der Bahnsteigbreite
- 6 Abweisungsraten bei unterschiedlicher Stationsgröße
- 7 Abweisungsraten bei verschiedenen Bedarfsanmeldungen für eine Station mit 8 Abfertigungsplätzen
- 8 Mittlere Wartezeit und Abweisungsrate in Abhängigkeit von der Belastung und der Anzahl der Startplätze
- 9 Grenze der praktischen Leistungsfähigkeit

Verzeichnis der Anlagen

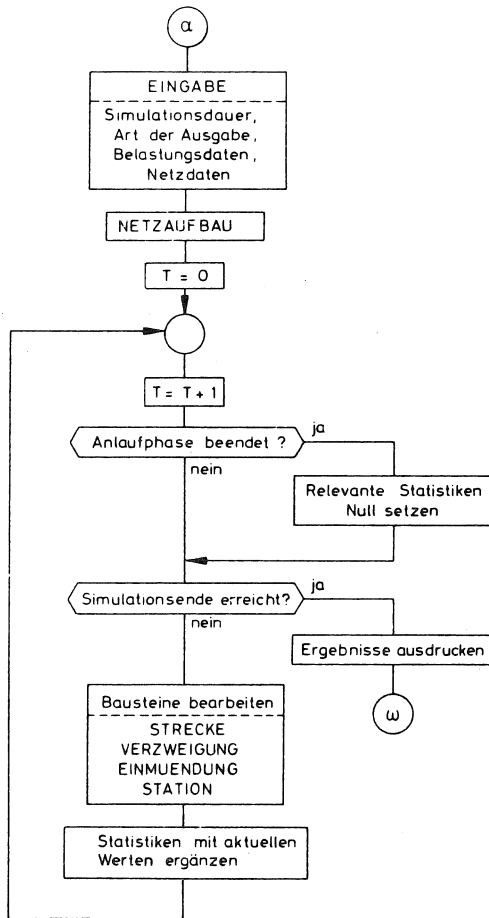
- 1 Ablaufdiagramm des Einsteigvorgangs beim Cabintaxi
- 2 Strukturdiagramm für das Programm KABSIM
- 3 Verlauf der Strecken- und Kabinenauslastung sowie der mittleren Wartezeit über die Simulationszeit
- 4 Fahrlinien von Kabinen in einer Station
- 5 Netz A
- 6 Matrix der Fahrtbeziehungen für Netz A
- 7 Netz B
- 8 Matrix der Fahrtbeziehungen für Netz B
- 9 Zeitlückenverteilung der Kabinen vor einer Stationseinfahrt
- 10 Anteil Leerkabinen in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung
- 11 Zeitlückenverteilung der Kabinenankünfte in einer Station in Abhängigkeit von der Stationsgröße (Randlage)
- 12 Zeitlückenverteilung der Kabinenankünfte in einer Station in Abhängigkeit von der Stationsgröße (Zentrale Lage)
- 13 Summenhäufigkeiten der Wartezeiten von Zustiegern in Abhängigkeit von der Stationsgröße
- 14 Häufigkeitsverteilung von Wartezeiten an Einmündungen
- 15 Zusammenhang zwischen Verzögerungszeiten und Verkehrsstärke
- 16 Wartezeit und Abweisungsrate in Abhängigkeit von der Mindestpuffergröße
- 17 Wartezeit und Abweisungsrate in Abhängigkeit von der Mindestpuffergröße
- 18 Aussteigvorgänge in Abhängigkeit von der Zahl der Aussteigplätze
- 19 Einsteigvorgänge in Abhängigkeit von der Zahl der Einsteigplätze

- 20 Maximal mögliche Ein- und Aussteigvorgänge in Abhängigkeit von Aus- und Einsteigplätzen
- 21 Leistungsfähigkeit, mittlere Wartezeit und Abweisungsrate in Abhängigkeit von der Anzahl der Warteplätze
- 22 Ablaufdiagramm zur Verbesserung des Betriebsablaufs



Ablaufdiagramm des Einsteigvorgangs beim Cabinentaxi

Quelle: SNV (1973)

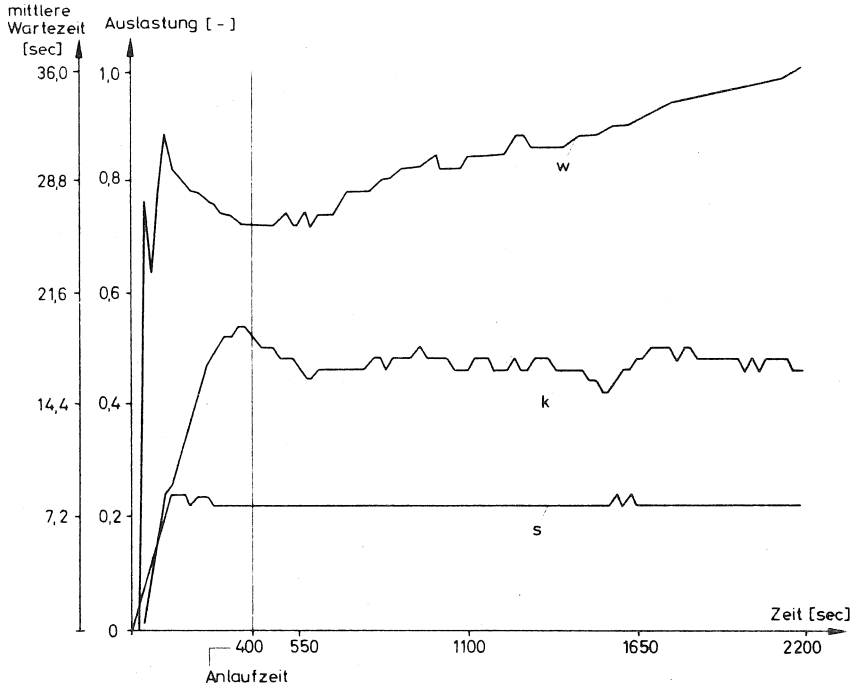


Strukturdiagramm für das Programm KABSIM

Netz A

310 Kabinen im Umlauf

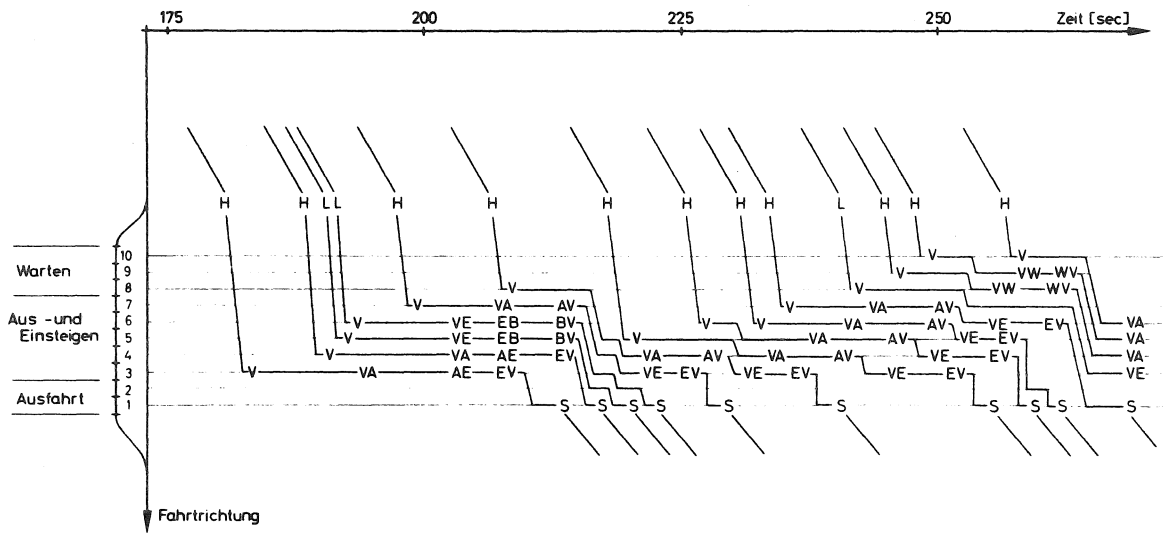
$F_{ij} = 7$ Fahrten/h



w = mittlere Wartezeit
s = Streckenauslastung
k = Kabinenauslastung

Verlauf der Strecken- und Kabinenauslastung sowie der mittleren Wartezeit über die Simulationszeit

- H : Besetzte Kabine fährt in Station ein
 - L : Leere Kabine fährt in Station ein
 - V-V : Vorrücken bis zum Stillstand
 - A-A : Aussteigen
 - E-E : Einsteigen
 - B-B : Besetzte Kabine wartet, bis die vordere Position frei wird
 - W-W : Besetzte Kabine wartet auf Warteplätzen, bis zum ersten freien Ausstiegplatz vorgerückt werden kann
 - V-S : Vorrücken zu den Startplätzen, Ausfahren
- Es ist immer Beginn und Ende eines Vorgangs angegeben

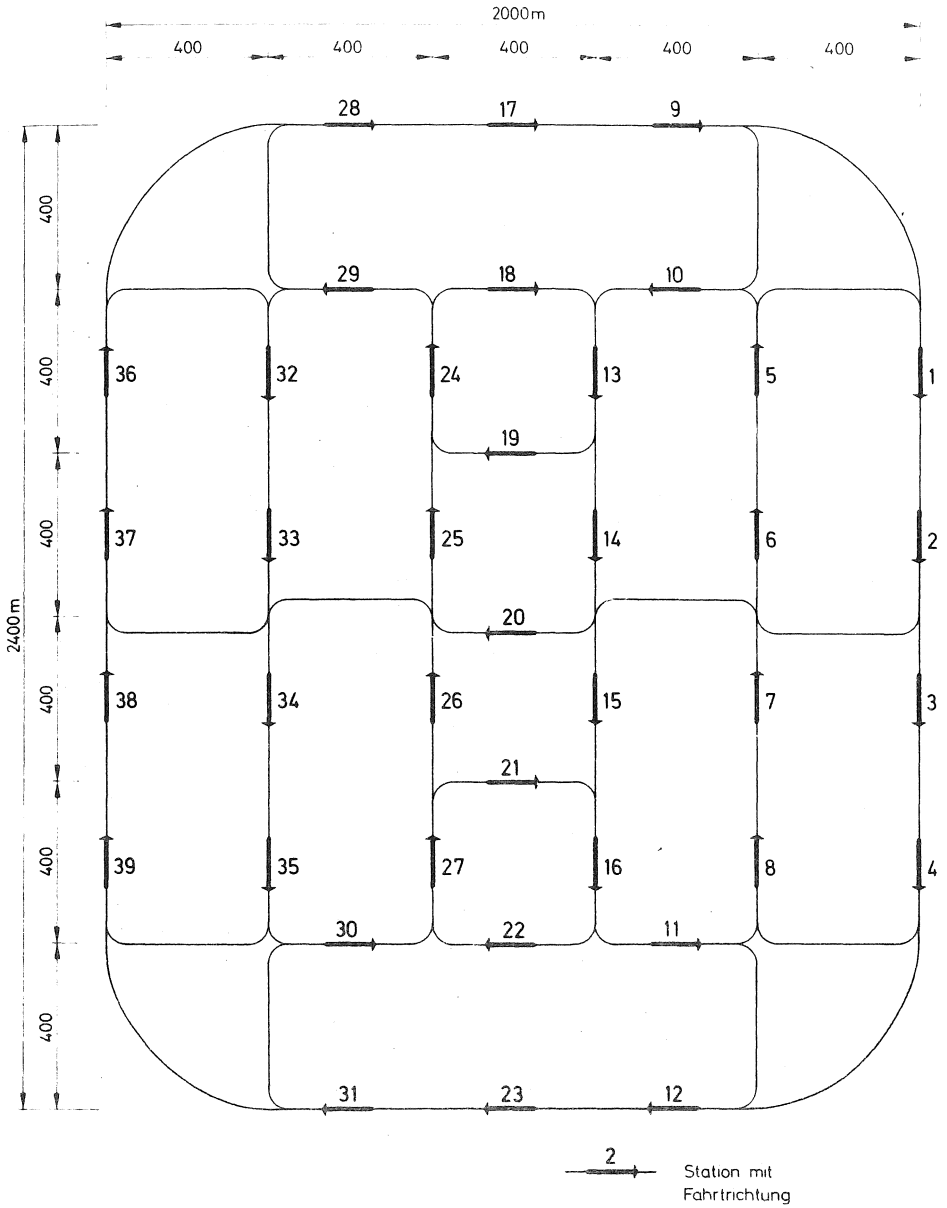


Fahrplänen von Kabinen in einer Station
 (zur besseren Übersicht sind die Fahrplänen
 der die Station passierenden Kabinen nicht
 wiedergegeben)

NACH VON	1				2				3				3												
	2	4	6	8	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8	9										
1	-	+	0	+	+	+	0	+	0	0	0	0	0	0	-	-	0	-	0						
2	-	+	+	0	+	+	+	+	+	0	-	+	+	+	+	+	0	-	0	+	0				
3	0	-	+	-	+	0	0	0	0	+	0	-	+	+	+	+	0	-	0	+	0				
4	0	-	-	-	-	0	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	0	-	0				
5	0	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+				
6	-	0	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	-	0	-	0				
7	-	0	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	-	0			
8	-	-	0	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	0	-	0		
9	0	+	+	+	+	+	0	0	0	-	-	+	+	+	+	+	0	+	+	+	0	0	-	0	
10	-	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	
11	0	-	0	-	-	-	0	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	
12	0	-	0	-	-	-	0	0	-	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	
13	0	-	-	0	-	0	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	0	0	-	0	
14	+	0	-	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	-	0	+	+	+	+	0	
15	+	+	0	-	0	-	0	-	+	+	+	+	+	+	+	+	0	-	0	+	0	+	0	-	0
16	+	+	0	-	0	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	0
17	-	0	-	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	0
18	-	0	-	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	-	0	+	+	+	+	0	
19	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	-	0	+	+
20	-	0	-	-	0	-	-	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	0
21	+	0	+	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	-	0	-	0
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	+	+	0	-	0	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
24	0	+	0	+	+	+	0	-	0	0	0	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	
25	-	0	+	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	-	0	-	0	+	+	
26	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	-	0	-	0	+	+	
27	-	+	0	-	+	+	0	0	0	0	+	-	+	+	+	+	+	0	+	0	-	0	+	0	
28	-	-	+	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	0	-	0	+	0	
29	-	0	-	-	-	0	0	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	-	0	+	+	0
30	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	-	0	-	0	+	+	0
31	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	0	-	0	+	+
32	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	0	-	0	+	+
33	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
34	+	0	+	+	+	+	+	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
35	+	0	+	+	+	+	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
36	-	0	-	+	-	-	-	0	0	-	0	+	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
37	-	0	-	0	-	-	-	0	0	-	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	-	0	+	+	0
38	0	-	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	-	-	-	-	-	-
39	+	0	-	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	-	0	+	+	0

- + ≙ sinnvoll
- ≙ nicht sinnvoll
- 0 ≙ gleiche Reisezeit über beide Richtungen

Matrix der Fahrtbeziehungen für Netz A

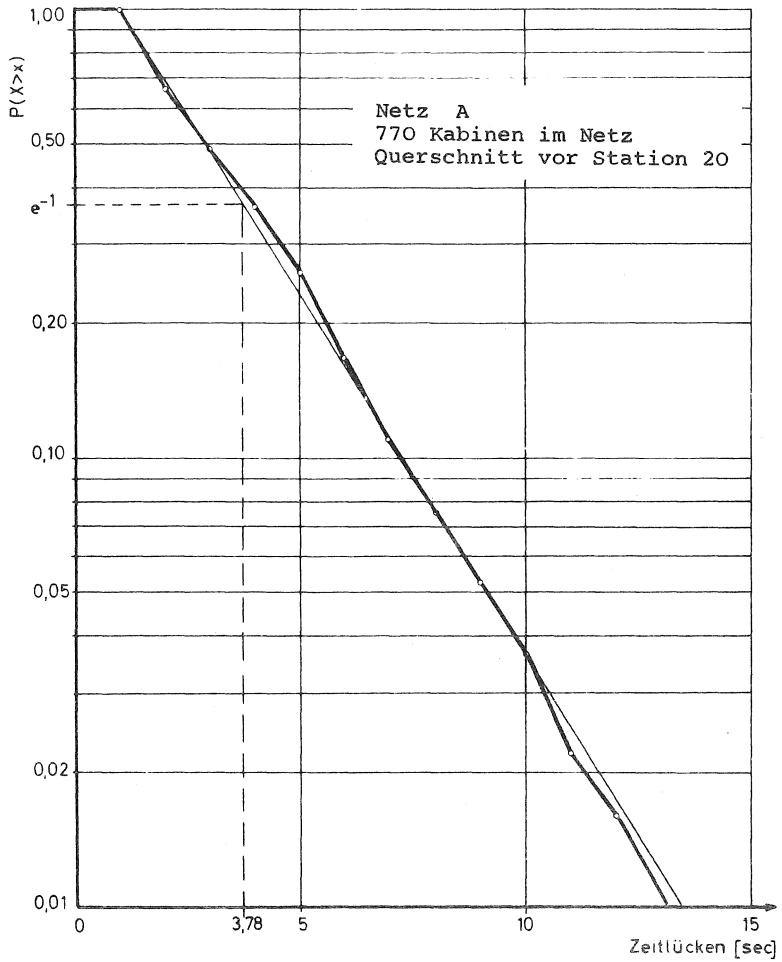


Netz B

NACH VON	1				2				3				3									
	2	4	6	8	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8	9		
1	-	+	+	+	-	0	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	
2	-	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3	-	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	-	-	-	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
5	+	+	0	-	-	-	-	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
6	+	0	-	+	-	-	-	+	+	+	0	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
7	+	0	-	+	-	-	-	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
8	0	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
9	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
10	-	-	-	-	-	0	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
11	+	+	+	+	+	0	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+
13	-	-	-	-	0	-	+	+	+	+	+	+	0	-	0	+	-	+	+	+	+	+
14	-	-	-	-	0	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
15	-	-	-	-	0	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
16	-	-	-	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+
17	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	-	+	+	+	+
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	0	+	+	+	0	-	0	0	0	0	-	+	0	-	+	+	+
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
29	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

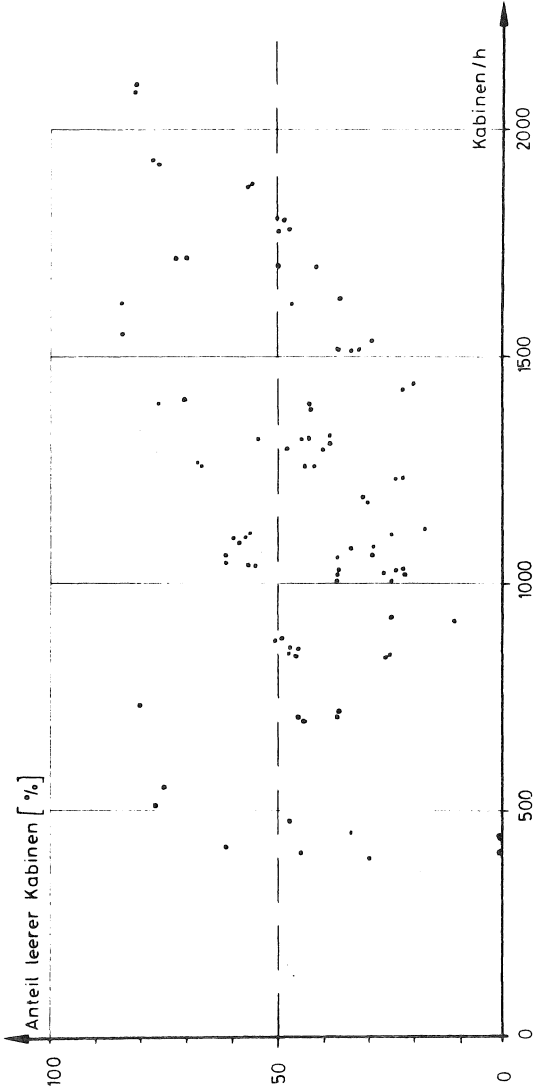
- + ≙ sinnvoll
- ≙ nicht sinnvoll
- 0 ≙ gleiche Reisezeit über beide Richtungen

Matrix der Fahrtbeziehungen für Netz B

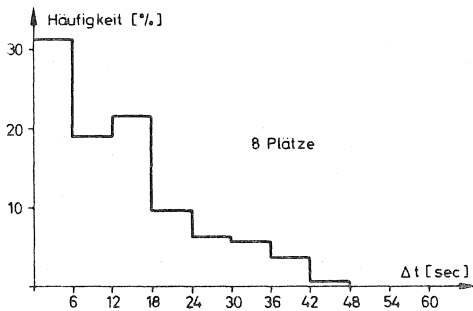
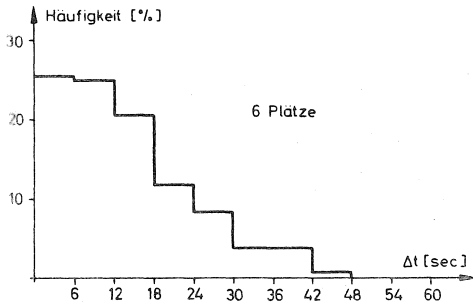
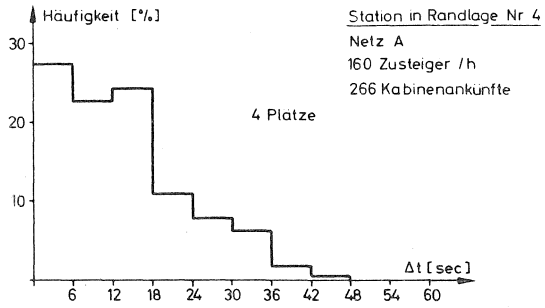


Zeitlückenverteilung der Kabinen vor einer Stationseinfahrt

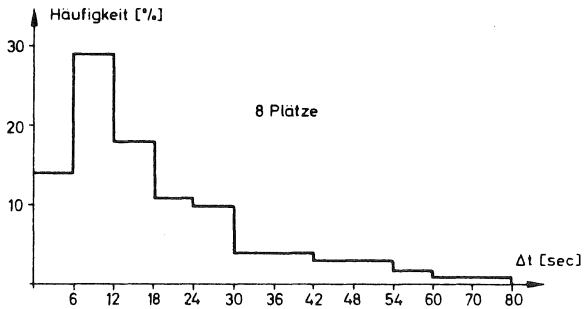
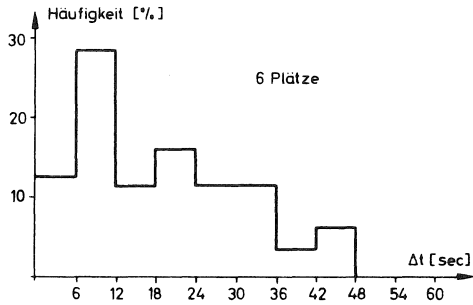
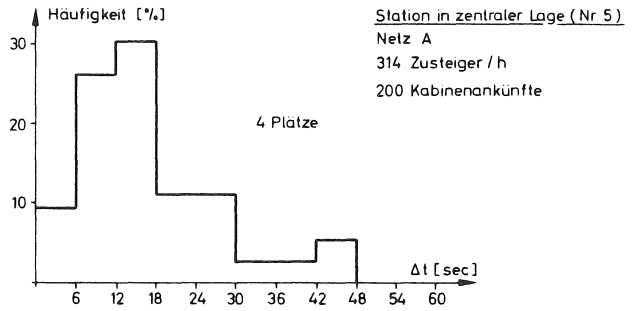
Netz A
810 Kabinen im Umlauf
 $F_{ij} = 7$ Fahrten/h



Anteil Leerkabinen in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung



Zeitlückenverteilung der Kabinenankünfte in einer Station in Abhängigkeit von der Anzahl der Plätze je Station



Zeitlückenverteilung der Kabinenankünfte in einer Station in Abhängigkeit von der Anzahl der Plätze je Station

Summenhäufigkeiten der Wartezeiten von Zustellern
 in Abhängigkeit von der Stationsgröße

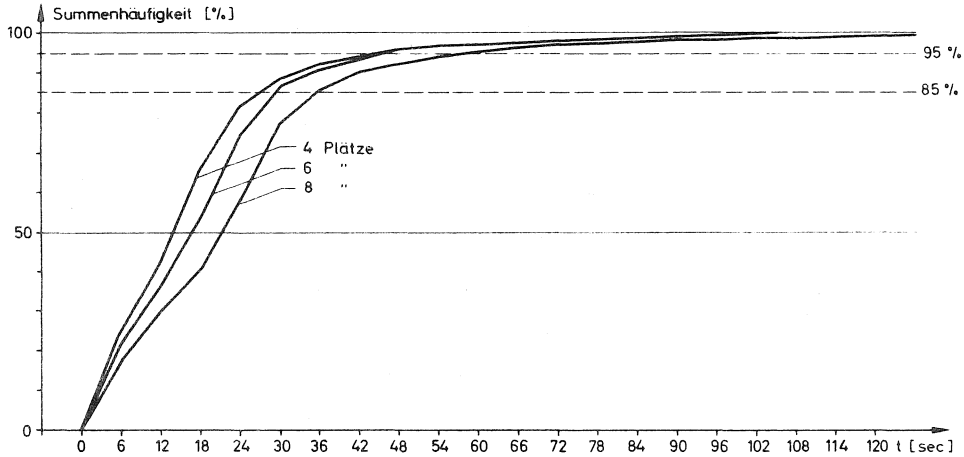
Kolmogoroff-Smirnoff-Test:

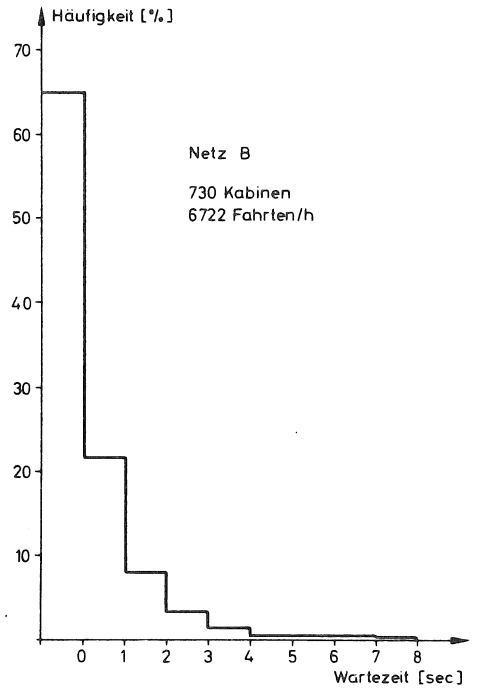
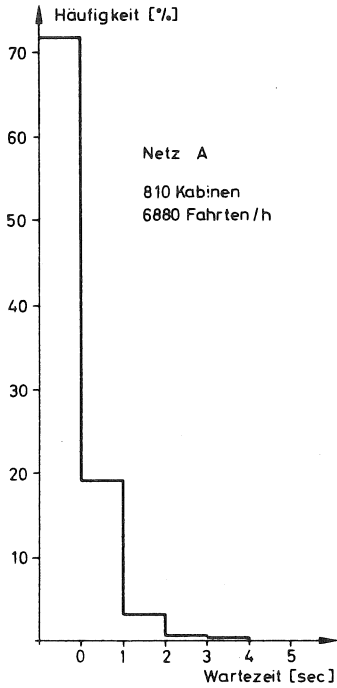
Hypothese: Die Wartezeiten für Stationen mit 4 und 6 Plätzen (I) bzw. mit 6 und 8 Plätzen (II) sind auf dieselbe Weise verteilt.

Signifikanzniveau: $\alpha = 0.01$

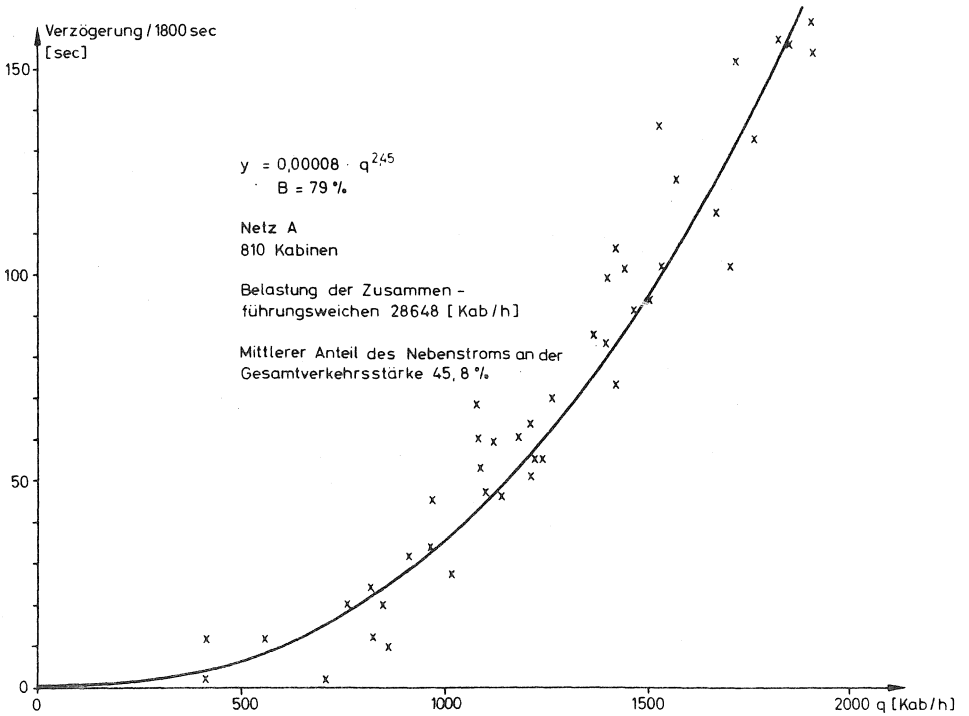
Prüfgröße : $D = 1.63/\sqrt{n}$

	n	D	D _{beob}	
I	3165	0.03	0.115	^ Hypothese ablehnen
II	3158	0.03	0.158	^ Hypothese ablehnen

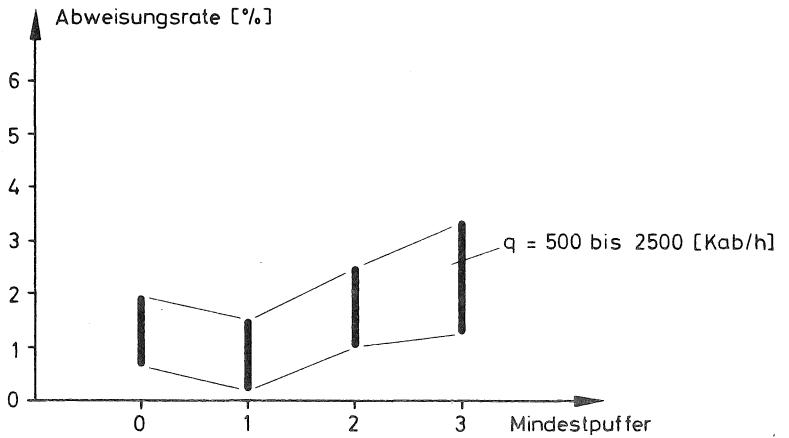
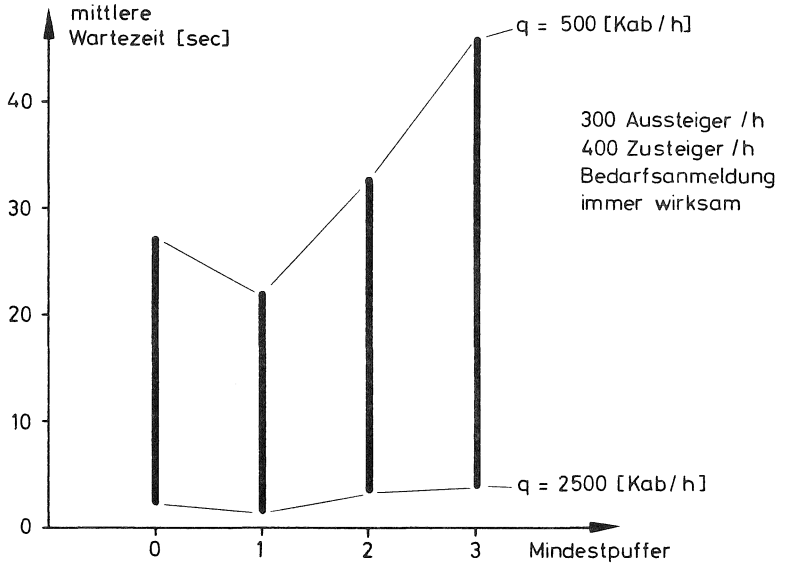




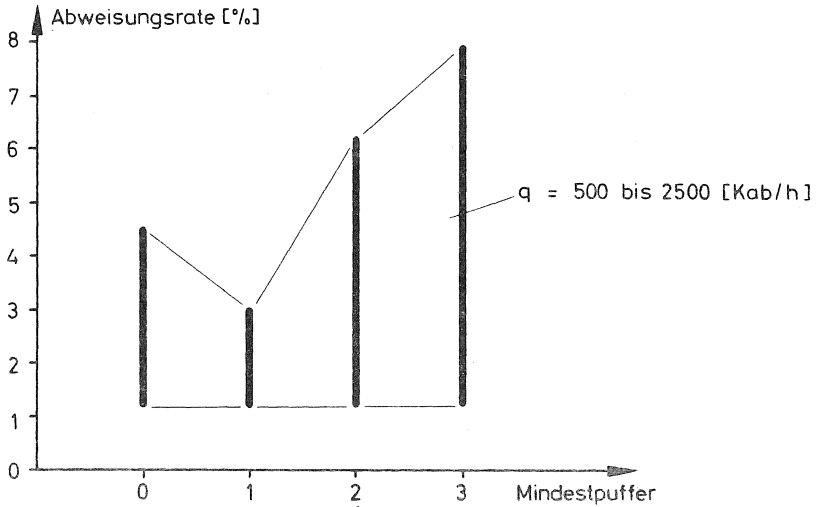
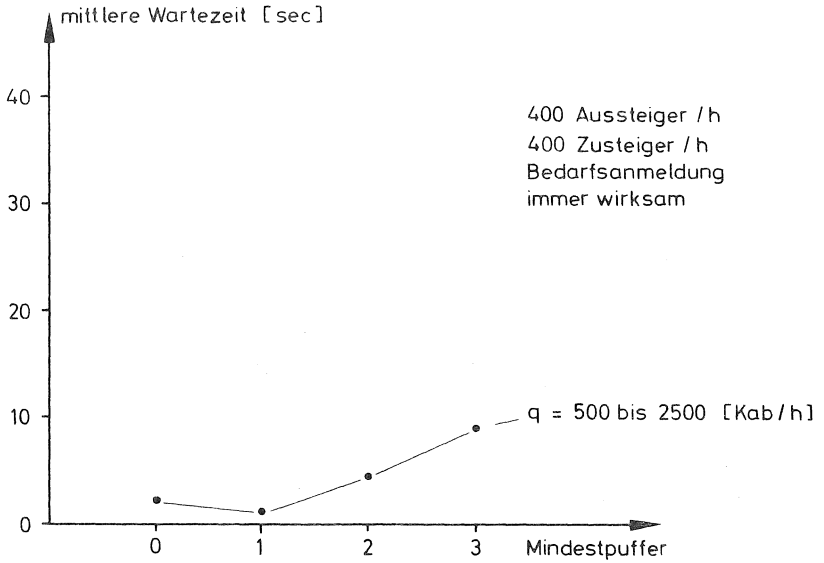
Häufigkeitsverteilungen von Wartezeiten an Einmündungen



Zusammenhang zwischen Verzögerungszeiten und Verkehrsstärke

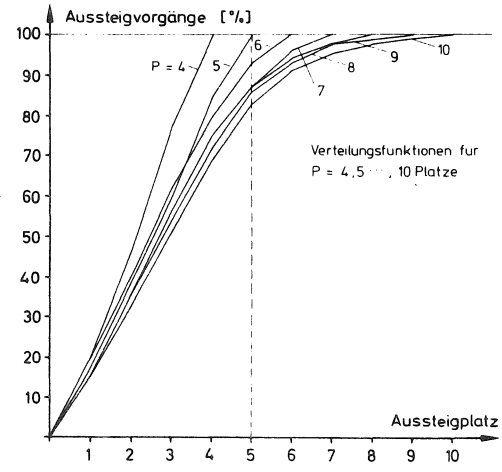
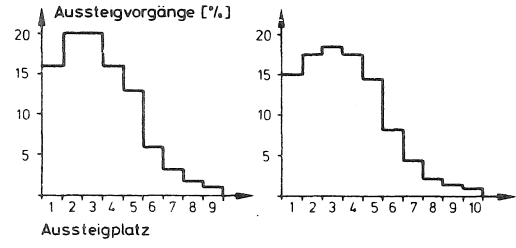
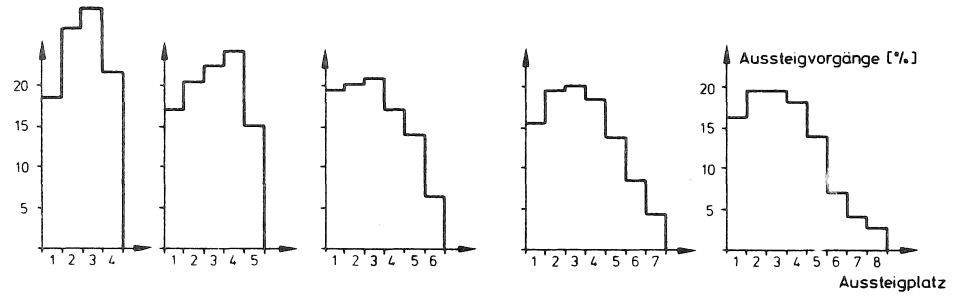


Wartezeit \bar{w} und Abweisungsrate in Abhängigkeit von der Mindestpuffergröße (Beispiel)

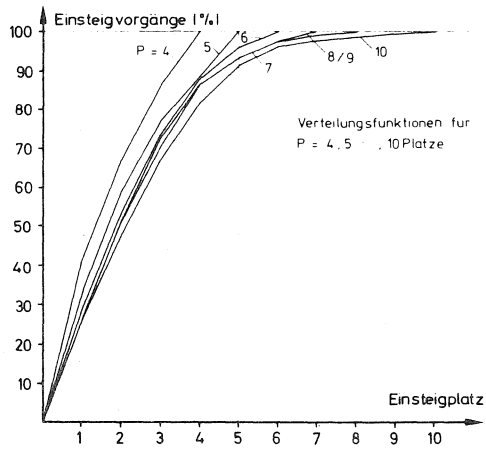
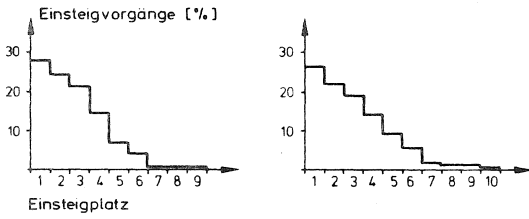
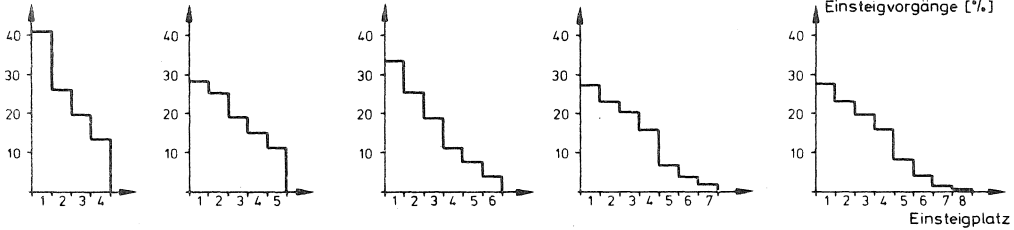


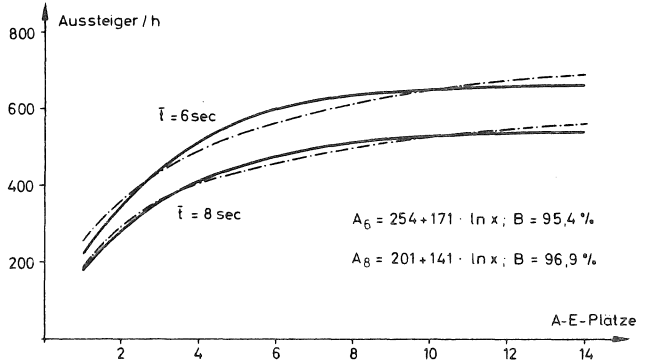
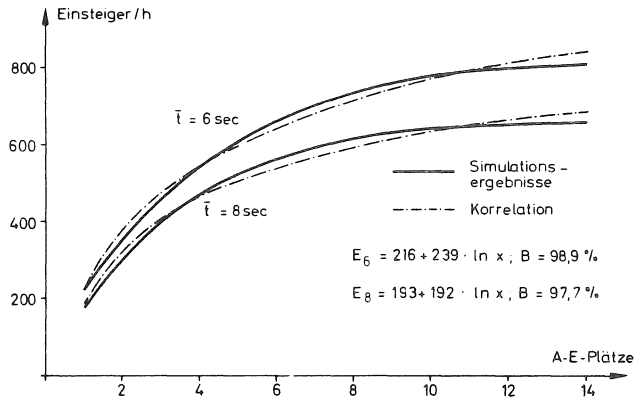
Wartezeit \bar{w} und Abweisungsrate in Abhängigkeit von der Mindestpuffergröße (Beispiel)

Aussteigvorgänge in Abhängigkeit von der Zahl der Aussteigplätze



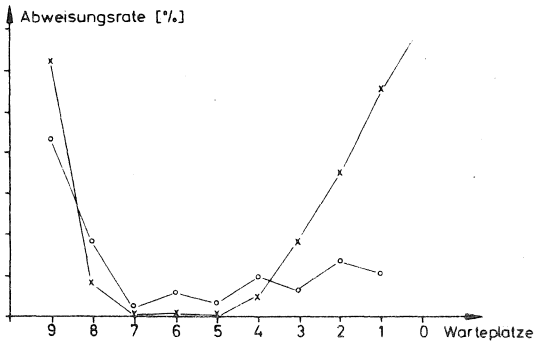
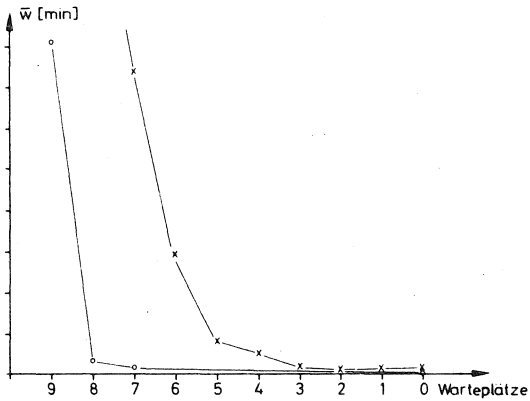
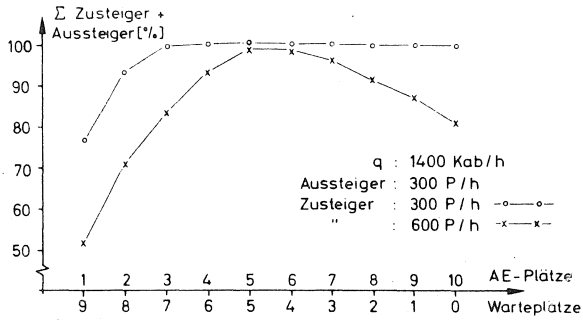
Einsteigvorgänge in Abhängigkeit von der Zahl der Einsteigplätze



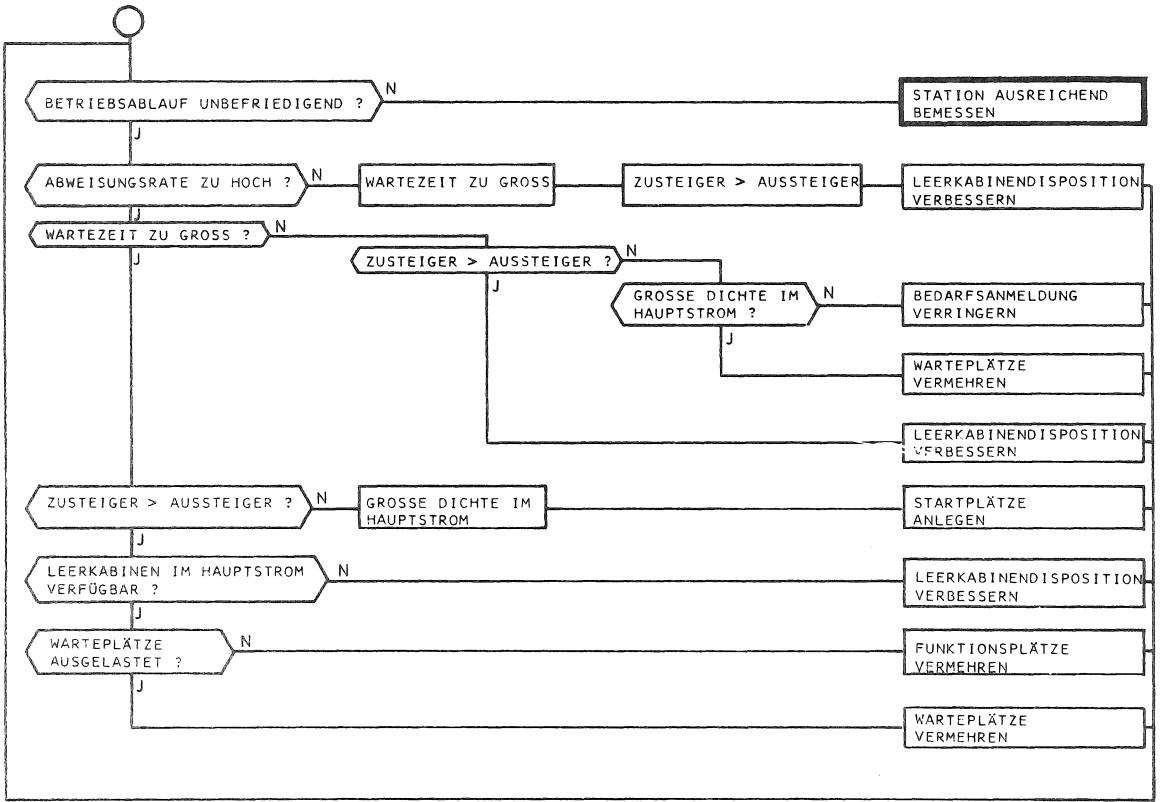


Maximal mögliche Ein- und Aussteigvorgänge in
Abhängigkeit von Aus- und Einsteigplätzen

\bar{t} : mittlere Aus- bzw. Einsteigzeit



Leistungsfähigkeit, mittlere Wartezeit und Abweisungsrate in Abhängigkeit von der Anzahl der Warteplätze



Ablaufdiagramm zur Verbesserung des Betriebsablaufs

Veröffentlichungen aus dem Institut für Verkehrswesen

Schriftenreihe des Instituts

- Heft 1: Baron, P.S.: Weglängen als Kriterium zur Beurteilung von Fluggast-Empfangsanlagen; 1967
- Heft 2: Stoffers, K.E.: Berechnung von optimalen Signalzeitplänen; 1968
- Heft 3: Koehler, R.: Verkehrsablauf auf Binnenwasserstraßen - Untersuchungen zur Leistungsfähigkeitsberechnung und Reisezeitverkürzung; 1968
- Heft 4: Böttger, R.: Die numerische Behandlung des Verkehrsablaufs an signalgesteuerten Straßenkreuzungen; 1970
- Heft 5: Droste, M.: Stochastische Methoden der Erfassung und Beschreibung des ruhenden Verkehrs; 1971
- Heft 6: 10 Jahre Institut für Verkehrswesen; 1973
- Heft 7: Bey, I.: Simulationstechnische Analyse der Luftfracht-
abfertigung; 1972
- Heft 8: Wiedemann, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses; 1974
- Heft 9: Köhler, U.: Stabilität von Fahrzeugkolonnen; 1974
- Heft 10: Thomas, W.: Sensitivitätsanalyse eines Verkehrsplanungs-Modells; 1974
- Heft 11: Pape, P.: Weglängen-Reduzierung in Fluggast-Empfangsanlagen durch flexible Vorfeldpositionierung; 1976
- Heft 12: Koffler, Th.: Vorausschätzung des Verkehrsablaufs über den Weg; 1977
- Heft 13: Haenicke, W.: Der Einfluß von Verflechtungen in einem bedarfsorientierten Nahverkehrssystem auf die Reisegeschwindigkeit; 1977
- Heft 14: Bahm, G.: Kabinengröße und Betriebsablauf neuer Nahverkehrssysteme; 1977
- Heft 15: Laubert, W.: Betriebsablauf und Leistungsfähigkeit von Kleinkabinenbahnstationen; 1977
- Heft 16: Sahling, B.-M.: Verkehrsablauf in Netzen - Ein graphentheoretisches Optimierungsverfahren-; 1977

Anderweitig publizierte Forschungsberichte

- Leutzbach, W.; Bexelius, S.: Probleme der Kolonnenfahrt, Heft 44 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik" Bundesminister für Verkehr, Bonn 1966
- Lenz, K.-H.: Ein Beitrag zur Anwendung der Theorie der Warteschlangen; Heft 66 der Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen. Kirschbaum Verlag, Bad Godesberg; 1966
- Ernst, R.: Verkehrsablauf an Straßenknoten; Heft 60 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1967
- Wiedemann, R.: Verkehrsablauf hinter Lichtsignalanlagen - Untersuchungen über die Ausbreitung von Fahrzeugpuls; Heft 74 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1968
- Ziegler, M.: Wegewahl als Regelkreis - Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Wegewahl, Reisezeiten und Verkehrsmengen; Heft 99 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1970
- Dilling, J.: Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken; Heft 151 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik" Bundesminister für Verkehr, Bonn 1973
- Findeisen, H.-G.: Das Verhalten verkehrsrechtlich untergeordneter Fahrzeuge an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen; Heft 178 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1975
- Brilon, W.: Unfallgeschehen und Verkehrsablauf (Teil I), Warteschlangenmodell des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen (Teil II); Heft 201 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik" Bundesminister für Verkehr, Bonn 1976

Vorläufige Berichte des Instituts

- Nr. 1: Leutzbach, W.; Koehler, R.: Binnenwasserstraßenverkehr als Zufallsverteilung; 1964
- Nr. 2: Eick, P.: Experimentelle Überprüfung des Folgetests von WALD; 1964
- Nr. 3: Bexelius, S.: Größen der Verkehrstheorie - ihre Definition und Anwendung; 1965
- Nr. 4: Leutzbach, W.; Ernst, R.: Untersuchung über den Einfluß der Fahrbahnmarkierung auf das Verhalten der Fahrzeuglenker; 1965
- Nr. 5: Gullón Löw, M.: Die Planung des spanischen Stadt- und Landstraßennetzes; 1965
- Nr. 6: Bexelius, S.: An extended Model for Car Following; 1965
- Nr. 7: Bexelius, S.: Beschreibung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf verschiedene Arten von Engpässen; 1965
- Nr. 8: Leutzbach, W., Lenz, K.-H.: Wartezeitverluste an Schleusen; 1966
- Nr. 9: Martin, W.: Zeitstudie über die Passagierabfertigung am Flughafen Stuttgart; 1967
- Nr. 10: Droste, M.: Parkraumerhebungen in Intervallen; 1968
- Nr. 11: Leutzbach, W.: Bewegung als Funktion von Zeit und Weg; 1968 (reprinted in Transportation Research, Vol. 3 (1969) 421-428)
- Nr. 12: Droste, M.: Die Berechnung optimaler Signalzeitenpläne als Problem der ganzzahligen linearen Programmierung; 1969
- Nr. 13: Ludes, K.; Siegener, W.: Untersuchung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf riskantes Fahrverhalten; 1969
- Nr. 14: Haight, F.A.: Problems in Transport Safety; 1970
- Nr. 15: Dilling, J.: Reisegeschwindigkeit und Straßencharakteristik; 1970
- Nr. 16: Coblenz, H.S.: Transportation Planning and Social Issues: Function and Dysfunction; 1971

- Nr. 17: Köhler, U.: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsganglinie bzw. Geschwindigkeitsprofil und Häufigkeitsdichte der Geschwindigkeiten; 1971
- Nr. 18: Brilon, W.: Der Zusammenhang zwischen räumlich-zeitlichen Kennwerten des Verkehrsablaufs und lokal ermittelten Parametern; 1973
- Nr. 19: Vásárhely, B.: Stochastische Simulation an Straßenkreuzungen nach dem "rechts-vor-links-Prinzip", 1974
- Nr. 20: Bahm, G.; Laubert, W.: Modelle zur Simulation des Betriebsablaufs von neuen Personennahverkehrssystemen; 1975
- Nr. 21: Wiedemann, R.; Brilon, W.; Brannolte, U.: Simulation des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen; 1977

Institutsnotizen

- Nr. 1: Bisbee, E.F.: Beispiele zur Transportanalyse; 1967
(übersetzt von W. Siegener)
- Nr. 2: Vergleich einiger Verkehrserzeugungs- und Verteilungsmodelle; Seminarbericht SS 1968
- Nr. 3: Berechnungsbeispiel zum Verkehrsablauf an Engpässen; Seminarbericht WS 1968/69
- Nr. 4: Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit des Straßennetzes und der Kapazität des Parkraums; Seminarbericht SS 1969
- Nr. 5: Brilon, W.: Erzeugung von Zufallszahlen; 1970
- Nr. 6: Dilling, J.: Charakteristik des Verkehrsablaufs auf einem Autobahnabschnitt; 1970
- Nr. 7: Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit verschiedener Ausbauvarianten einer Straßenkreuzung; Seminarbericht WS 1969/70
- Nr. 8: Untersuchung der Verkehrssicherheit einer Straßenkreuzung; Seminarbericht SS 1970
- Nr. 9: Möglichkeiten des Einsatzes eines Kabinen-Taxi-Systems (CAT) für den Bereich der Universität Karlsruhe; Seminarbericht SS 1971
- Nr. 10: Wirtschaftlichkeitsrechnung im Straßenbau - ein Optimierungsbeispiel; Seminarbericht WS 1971/72
- Nr. 11: Möglichkeiten der Steuerung von Lichtsignalanlagen in städtischen Netzen; Seminarbericht SS 1972
- Nr. 12: Exkursionsbericht SS 1973
- Nr. 13: Unfalluntersuchung und Stauberechnung auf einem Abschnitt der Bundesautobahn; Seminarbericht SS 1973
- Nr. 14: Wochenendverkehr im nördlichen Schwarzwald; Seminarbericht WS 1973/74
- Nr. 15: Geschwindigkeitsbeschränkungen, Seminarbericht SS 1974
- Nr. 16: Autohöfe - ihre Bedeutung für den Güterverkehr; Seminarbericht WS 74/75
- Nr. 17: Die Karlsruher Häfen; Seminarbericht SS 1975
- Nr. 18: Lärmschutz an Straßen; Seminarbericht WS 75/76
- Nr. 19: Einfluß des Fluglärms auf Planung und Betrieb von Flughäfen und Landeplätzen; Seminarbericht SS 1976