

## Entwurfsverfahren für den ÖPNV im ländlichen Raum

### Autoren / Authors:

Markus Friedrich

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Universität Stuttgart

[markus.friedrich@isv.uni-stuttgart.de](mailto:markus.friedrich@isv.uni-stuttgart.de)

### Veröffentlicht in / Published in:

Friedrich, M. (1994): Rechnergestütztes Entwurfsverfahren für den ÖPNV im ländlichen Raum (Dissertation), Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrs- und Stadtplanung, Heft 5, Technische Universität München.



**Universität Stuttgart**

**Institut für Straßen- und Verkehrswesen**

**Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik**

[www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/](http://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/)

Lehrstuhl für Verkehrs- und Stadtplanung  
Technische Universität München

## **Rechnergestütztes Entwurfsverfahren für den ÖPNV im ländlichen Raum**

Markus Friedrich

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ. Prof. Dr.-Ing. H. Werner

Prüfer der Dissertation:

1. Univ. Prof. Dr.-Ing. P. Kirchhoff
2. Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. S. Rüger, TU Dresden (schriftliche Beurteilung),  
Univ. Prof. Dr.-Ing. U. Köhler, Univ. GH Kassel

Die Dissertation wurde am 29.6.1994 bei der Technischen Universität eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 13.7.1994 angenommen.

## Zusammenfassung

<b>1</b>	<b>Problem- und Aufgabenstellung</b>	<b>1</b>
1.1	Entwurfsprozeß	1
1.2	Entwurfsrelevante Merkmale der Verkehrssysteme	2
1.3	Vorhandene Entwurfsverfahren	3
1.3.1	Liniennetzplanung	3
1.3.2	Fahrplanbildung	5
1.3.3	Einsatzplanung	6
1.3.4	Beurteilung der Verfahren	7
1.4	Vorhandene Wirkungsmodelle	8
1.4.1	Kenngößen der Benutzer	8
1.4.2	Kenngößen der Betreiber	11
1.5	Zielsetzung und Vorgehensweise	12
<b>2</b>	<b>Die Entwurfsaufgabe</b>	<b>14</b>
2.1	Struktur der Entwurfsaufgabe	14
2.2	Elemente eines ÖPNV-Angebotes	15
2.2.1	Betriebsformen	15
2.2.2	Fahrzeuge	16
2.2.3	Betreiberstruktur	17
2.3	Systemkonzept	18
2.3.1	Funktionale Gliederung des Netzes	18
2.3.2	Systemtakt	19
2.3.3	Takt, Linienlänge und Umlaufzeit	21
2.3.4	Umlaufschema	22
2.4	Zielkonzept	23
2.4.1	Auswahl von Zielkriterien	24
2.4.2	Zugänglichkeit	27
2.4.3	Zeitaufwand	27
2.4.4	Direktheit	29
2.4.5	Zeitliche Verfügbarkeit	30

2.5	Ortsspezifische Randbedingungen	38
2.5.1	Siedlungsstruktur, Verkehrswegenetz und Bahnangebot	38
2.5.2	Verkehrsnachfrage	38
2.5.3	Kostendaten für Fahrer und Fahrzeuge	40
2.5.4	Rechtliche Vorgaben	42
<b>3</b>	<b>Ablauf des rechnergestützten Entwurfsprozesses</b>	<b>44</b>
3.1	Überblick	44
3.2	Entwicklung einer Lösung	46
3.2.1	Erstellung eines Netzmodells	46
3.2.2	Grobentwurf	48
3.2.3	Feinentwurf	52
3.3	Exkurs: Dimensionierung eines Richtungsbandes	54
3.3.1	Haltestellen eines Richtungsbandes	57
3.3.2	Form eines Richtungsbandes	59
3.3.3	Verfahren zur überschlägigen Bemessung	60
3.3.4	Genaue Berechnung der Kenngrößen	62
3.4	Ermittlung der Wirkungen	64
3.4.1	Kenngrößen der Benutzer	64
3.4.2	Kenngrößen der Betreiber	69
3.5	Bewertung und Mängelanalyse	71
3.5.1	Kenngrößen der Benutzer	72
3.5.2	Kenngrößen der Betreiber	76
<b>4</b>	<b>Rechenmodell</b>	<b>77</b>
4.1	Prinzip der objektorientierten Programmierung	77
4.2	Netzmodell	79
4.2.1	Netzeditor	79
4.2.1.1	Verkehrszelle	82
4.2.1.2	Haltestelle	82
4.2.1.3	Strecke	83
4.2.1.4	Linie	83
4.2.2	Fahrplaneditor	90
4.2.3	Beispiel	93

4.3	Wirkungsmodell Benutzer	96
4.3.1	Ziel und Ablauf	96
4.3.2	Datenstrukturen	99
4.3.2.1	Teilverbindung	99
4.3.2.2	Verbindung	100
4.3.2.3	Verbindungsbaum	100
4.3.3	Verbindungssuche	102
4.3.3.1	Abbruchkriterien	102
4.3.3.2	Aufbau des Verbindungsbaumes	103
4.3.4	Verbindungswahl	105
4.3.5	Verbindungssplit	108
4.3.6	Beurteilung des Modells	111
4.3.7	Beispiel	113
4.4	Wirkungsmodell Betreiber	119
4.4.1	Personalkosten	119
4.4.2	Fahrzeugkosten	120
4.5	Modell zur Fahrereinsatzplanung	124
4.5.1	Optimierungsproblem	124
4.5.2	Entscheidungsbaum	124
4.5.3	Nachfolgerliste	125
4.5.4	Optimierungsalgorithmus	127
<b>5</b>	<b>Anwendungsbeispiel</b>	<b>131</b>
5.1	Ausgangssituation	131
5.2	Entwurf eines verbesserten Angebotes	133
5.2.1	Linienetz und Bedienungshäufigkeit	134
5.2.2	Fahrplan	136
5.2.3	Angebotsqualität	137
5.2.4	Betrieblicher Aufwand, Kosten und Zuschußbedarf	140
<b>6</b>	<b>Literatur</b>	<b>142</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>151</b>

## Zusammenfassung

### Problemstellung und Zielsetzung

Das *Angebot im Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV)* besteht aus Fahrten zwischen den Haltestellen zu vorgegebenen Zeiten. Dem Nutzer des ÖPNV stellt es sich in Form von Beförderungsmöglichkeiten dar. Das Angebot ist in Netzplänen und Fahrplänen niedergelegt. Zur Realisierung des Angebotes sind Einsatzpläne für Fahrzeuge und Fahrer erforderlich, die im weiteren Sinne auch zum Angebot gehören.

Der *Entwurf des Verkehrsangebotes* ist Teil des Verkehrsplanungsprozesses. Er wird durch Ziele gesteuert, die innerhalb des Planungsprozesses festgelegt werden. Der Entwurf setzt sich aus den Schritten Entwicklung von Lösungen, Ermittlung der Wirkungen dieser Lösungen, Bewertung der Wirkungen im Hinblick auf die Entwurfsziele und Analyse etwaiger Mängel der Lösungen zusammen.

Leistungsfähige Entwurfsverfahren gibt es bisher nur für den ÖPNV in Städten. Sie leiten sich aus Entwurfsverfahren für den Motorisierten Individualverkehr (MIV) ab und berücksichtigen die zeitlichen Komponenten des Angebotes und den Einsatz der Fahrzeuge und Fahrer, die im MIV nicht Gegenstand der Planung sind, nur in pauschaler Form. Dies ist im städtischen ÖPNV angesichts der über den Tag konstanten Linienführung, der i.d.R. kurzen Fahrzeugfolgezeiten und des vorherrschenden Taktverkehrs vertretbar. Der ÖPNV im ländlichen Raum weist im Hinblick auf diese Merkmale jedoch andersartige Strukturen auf:

- Die Linienführung ist wegen der geringeren Konzentration der Verkehrsnachfrage über den Tag unterschiedlich.
- Die Fahrzeugfolgezeiten betragen i.d.R. eine Stunde und mehr. Die kurzen Fahrzeugfolgezeiten des städtischen ÖPNV lassen sich aus wirtschaftlichen Gründen nicht erreichen.
- Die Abfahrtszeiten an den Haltestellen sind nicht getaktet, sondern werden vom Fahrzeugumlauf bestimmt. Aufgrund der großen Fahrzeugfolgezeiten führt ein Taktbetrieb in vielen Fällen zu schlechten Fahrplanwirkungsgraden.
- Auch wenn mit einem verbesserten Angebot eine gleichbleibende Linienführung und ein Taktbetrieb angestrebt werden, erfordert der im ländlichen Raum dominierende Schülerverkehr den Einsatz unregelmäßiger Verstärkerfahrten.

Aus diesen Unterschieden ergibt sich, daß ein Fahrgast im ländlichen Raum den ÖPNV nicht ohne Kenntnis der Abfahrtszeiten und Umsteigemöglichkeiten benutzen kann. Für eine Fahrt muß der Fahrgast neben der Fahrtroute auch einen Abfahrtszeitpunkt aus dem Fahrplan auswählen, d.h. er sucht keine Route, sondern eine Verbindung. Für die Ermittlung der Wirkungen auf die Fahrgäste müssen daher anstelle der bekannten Routensuchverfahren Verfahren zur Verbindungssuche eingesetzt werden. Die betrieblichen und finanziellen Wirkungen lassen sich nicht wie beim Entwurf des städtischen ÖPNV mit Schätzverfahren berechnen. Statt dessen ist eine explizite Einsatzplanung erforderlich, die örtliche Besonderheiten berücksichtigt und die Wirkungen eines Taktbetriebs nachweist. Aus diesen Gründen sind die für den städtischen ÖPNV entwickelten Entwurfsverfahren nicht auf den ÖPNV im ländlich Raum übertragbar.

Der ÖPNV im ländlichen Raum gewinnt aus verkehrspolitischen Gründen und angesichts der gegenwärtig erfolgenden Regionalisierung der Zuständigkeiten zunehmend an Bedeutung. Er erfordert wegen der wirtschaftlichen Problematik die Anwendung wissenschaftlich abgesicherter Verfahren beim Angebotsentwurf. Die Entwicklung solcher Verfahren ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

### Struktur der Entwurfsaufgabe

Aufgabe des Entwurfs ist es, ein Systemkonzept unter Beachtung eines Zielkonzeptes und ortsspezifischer Randbedingungen in ein Angebot umzusetzen. Die Struktur dieser Entwurfsaufgabe ist in der **Abbildung 0.1** dargestellt.

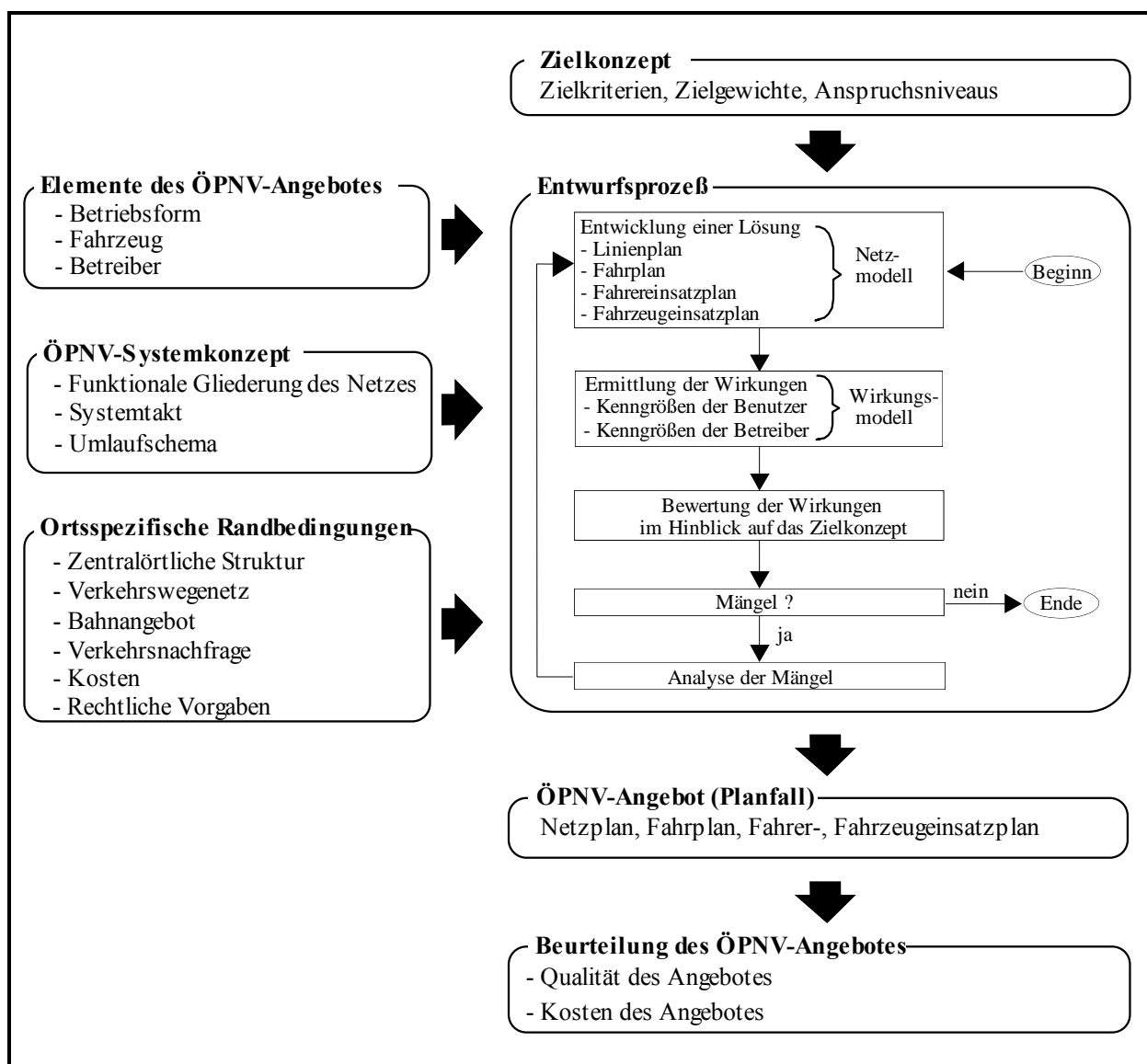


Abb. 0.1: Struktur der Entwurfsaufgabe

Wichtige Elemente des ÖPNV-Angebotes sind die Betriebsformen. Infolge der geringen und dispersen Verkehrsnachfrage ist neben dem herkömmlichen Linienbetrieb in vielen Teilräumen ein

bedarfsgesteuerter Betrieb erforderlich. Hierbei steht der Richtungsbandbetrieb im Vordergrund. Beim Richtungsbandbetrieb werden alle Haltestellen eines Korridors oder Sektors zu einer Bedienungseinheit zusammengefaßt. Ein Richtungsbandbetrieb ist in den in **Abbildung 0.2** dargestellten Ausprägungen möglich.

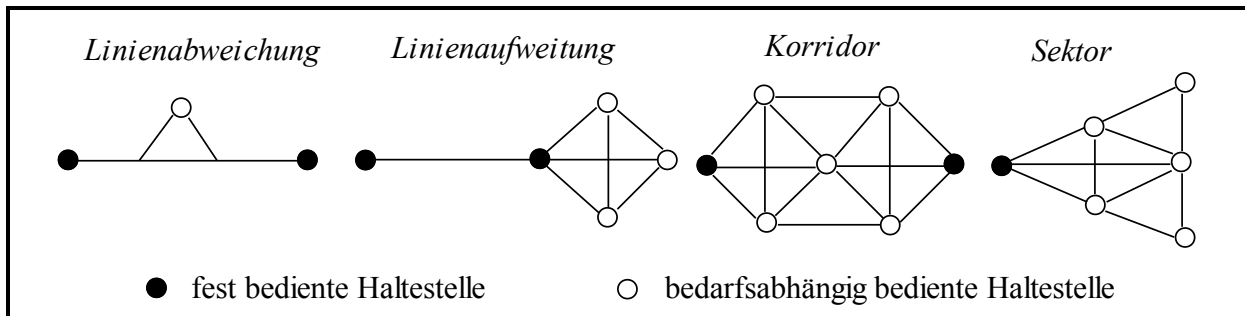


Abb. 0.2: Ausprägungen des Richtungsbandbetriebes

Der Richtungsbandbetrieb weist wie der Linienbetrieb einen Fahrplan auf und erfolgt zwischen festen Anfangs- und Endhaltestellen. Die dazwischen liegenden Haltestellen werden dagegen nur bedient, wenn Bedarf besteht. Dadurch verkürzt sich die Umlaufdauer, und die Kosten verringern sich. Die Fahrgäste müssen ihre Fahrtwünsche wie beim Taxibetrieb telefonisch anmelden. Der Fahrtablauf wird von einer Betriebsleitstelle gesteuert. Auch wenn es für den Richtungsbandbetrieb schon einige erfolgreiche Anwendungen gibt, befindet sich diese Betriebsform noch im Experimentierstadium.

Um einen gleichermaßen attraktiven und wirtschaftlichen Betrieb zu erreichen, wird ein *Systemkonzept* entwickelt, das als wesentliche Merkmale eine funktionale Gliederung des Netzes, einen Systemtakt und die Anwendung eines Umlaufschemas beinhaltet.

Bei der Netzplanung werden drei Teilnetze unterschieden, die in Anpassung an die zentralörtliche Siedlungsstruktur des Verkehrsgebietes hierarchisch aufgebaut sind (**Abbildung 0.3**).

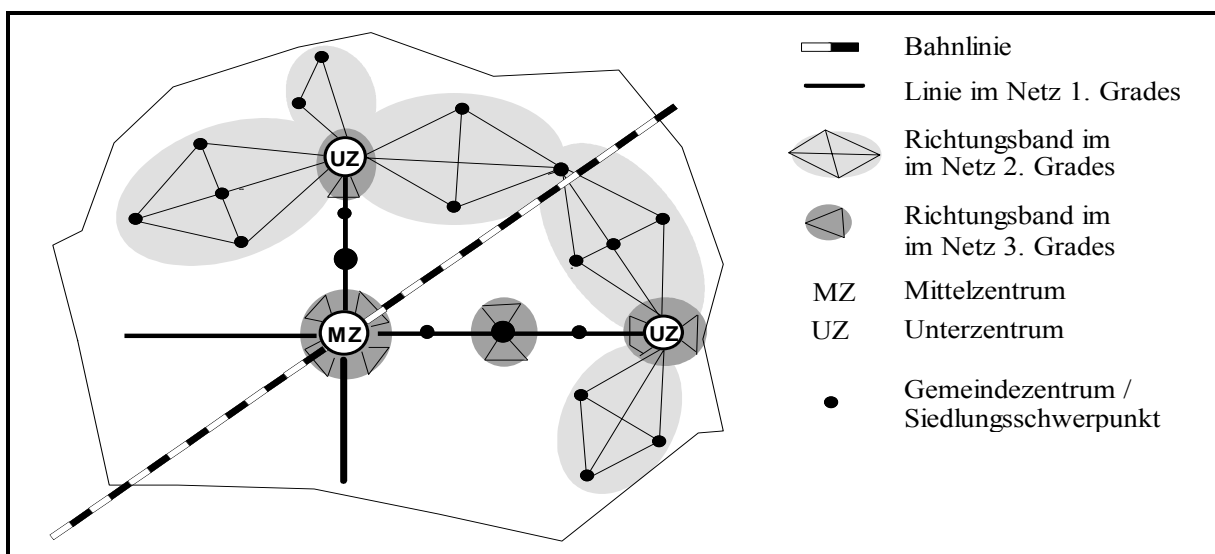


Abb. 0.3: Funktionale Gliederung des Netzes



Das Verkehrsnetz 1. Grades verbindet die Unter- und Kleinzentren mit dem Mittelzentrum (Kreisstadt). Vorherrschende Betriebsform ist hierbei der herkömmliche Linienbetrieb mit Standard-Linienbussen. Das Verkehrsnetz 2. Grades erschließt das Umland der Unter- und Kleinzentren. Gefahren wird im korridorförmigen Richtungsbandbetrieb. Das Verkehrsnetz 3. Grades dient der inneren Erschließung der Gemeinden. Im Mittelzentrum geschieht dies im Linienbetrieb und in kleineren Gemeinden mit Streusiedlungen im sektoralen, auf das Zentrum ausgerichteten Richtungsbandbetrieb. Die Teilnetze werden räumlich und zeitlich so miteinander verknüpft, daß beim Übergang zwischen den Netzen ein direkter Anschluß besteht. Wenn im Mittelzentrum eine Bahnlinie vorhanden ist, muß das Netz 1. Grades an die Bahnlinie angebunden werden.

Die Bedienung der Netze erfolgt im Takt. Unter Attraktivitäts- und Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten erscheint ein Grundtakt von 2 Stunden am zweckmäßigsten, der während der Hauptverkehrszeiten auf einen 1-Studentakt verdichtet wird. Bei diesem Taktmuster werden je Linie oder Richtungsband je zwei Busse und drei Fahrer benötigt. Mit diesem Fahrzeug- und Fahrereinsatz läßt sich ein Umlaufschema aufbauen, das dann im Entwurfsprozeß an die örtlichen Randbedingungen angepaßt und um notwendige Verstärkerfahrten ergänzt wird. Verlustzeiten im Hinblick auf den Fahrereinsatz werden minimal, wenn die Linienlänge an die Umlaufzeit angepaßt wird.

Das *Zielkonzept* geht von den Oberzielen

- Maximierung der Angebotsqualität und
- Minimierung des betrieblichen Aufwands

aus. Zielbezogene Kenngrößen der Angebotsqualität sind die Länge des Zugangswegs zur Haltestelle, die Beförderungszeit zwischen der Einstiegs- und der Ausstiegshaltestelle, die Direktheit der Beförderung, die Bedienungshäufigkeit und die Regelmäßigkeit des Angebotes. Zielbezogene Kenngrößen des betrieblichen Aufwands sind der Fahrzeugbedarf, die Fahrzeugkilometer und die Einsatzdauer der Fahrer. Die Kenngrößen der Angebotsqualität und die Kenngrößen des betrieblichen Aufwands müssen einander gegenübergestellt werden. Dabei gehen die Kenngrößen entsprechend ihrer relativen Bedeutung in die Gegenüberstellung ein. Um ein Maß für die Güte des Angebotes zu erhalten, müssen für die Kenngrößen des Angebotes Anspruchsniveaus festgelegt werden. Die Bewertung der Kenngrößen und die Festlegung der Anspruchsniveaus sind subjektive, von Werthaltung abhängige Vorgänge.

## Lösung der Entwurfsaufgabe

Aufgrund der Gegenläufigkeit der Oberziele beinhaltet die Entwurfsaufgabe ein *Optimierungsproblem*. Wegen der Komplexität der Zusammenhänge ist eine direkte mathematische Lösung sehr aufwendig und praktisch nicht möglich. Da jede Strecke des Wegenetzes Bestandteil einer Linie sein kann und jede Abfahrtszeit an einer Haltestelle frei wählbar ist, sind die Freiheitsgrade des Systems sehr groß. Um das System für eine direkte Lösung handhabbar zu machen, wären stark vereinfachende Annahmen notwendig, die die Lösungsvielfalt einschränken und damit die Lösungsqualität beeinträchtigen würden. Darüber hinaus ließen sich die vielfältigen ortsspezifischen Randbedingungen nur sehr aufwendig in ein Optimierungsmodell einfügen. Eine automatisierte Lösungsfindung blockiert außerdem zielgerichtete Eingriffe in den Entwurfsprozeß.

Aus diesen Gründen wird ein rechnergestütztes Lösungsverfahren erforderlich, das im Dialog zwischen Planer und Rechner abläuft.

Bei der *Entwicklung einer Lösung* erstellt der Planer die Pläne des ÖPNV-Angebotes bzw. verändert die Pläne der vorausgegangenen Lösung. Die Daten der Papierdokumente Linienplan, Fahrplan, Fahrzeug- und Fahrereinsatzplan werden in Rechnerdokumente transformiert und bilden ein sogenanntes Netzmodell. Der Planer bearbeitet in diesem Arbeitsschritt das Netzmodell und benutzt als Schnittstelle für den interaktiven Mensch-Maschine Dialog ein Dialogprogramm. Das Dialogprogramm unterstützt den Planer, indem es den Informationsgehalt der einzelnen Papierdokumente verknüpft und so die Zusammenhänge momentan wichtiger Daten dem Planer visualisiert. Das Netzmodell liefert dann die Eingangsgrößen für die *Wirkungsermittlung*. Das dabei verwendete Wirkungsmodell besteht aus einem Benutzermodell und einem Betreibermodell. Das Benutzermodell simuliert das Verkehrsverhalten der Benutzer und bestimmt so die Kenngrößen zur Beurteilung der Angebotsqualität. Das Betreibermodell ermittelt aus den Einsatzplänen den betrieblichen Aufwand und berechnet daraus den finanziellen Aufwand einer Lösung. Für jeden Angebotszustand werden die bei der Wirkungsermittlung berechneten Kennwerte des Angebotes bewertet, d.h. mit vorgegebenen Anspruchsniveaus verglichen oder den Kennwerten des vorhandenen Angebotes gegenübergestellt. Die Ursachen etwaiger Mängel, die in der *Bewertung* erkannt und in der *Mängelanalyse* lokalisiert werden können, bilden die Grundlage für eine zielgerichtete Veränderung des Angebotes, d.h. für eine Modifikation von Linienplan, Fahrplan und Einsatzplan im nächsten Iterationsschritt des Entwurfsprozesses.

Bei der Lösung der Entwurfsaufgabe werden die rückgekoppelten Stufen Grobentwurf und Feinentwurf unterschieden, die der Planer durchläuft, um ein Konzept in ein konkretes, umsetzbares Angebot zu überführen. Beim *Grobentwurf* wird ein Linienkonzept erstellt. Ausgehend vom Bahnangebot und der zentralörtlichen Struktur werden dabei an Bahnhöfen und in zentralen Orten sogenannte Zeitknoten festgelegt, an denen sich die Fahrzeuge mehrerer Linien zeitlich koordiniert treffen und so Umsteigebeziehungen zwischen allen Fahrzeugen ermöglichen. Die Linien, die die Zeitknoten verbinden und an den Zeitknoten miteinander verknüpft sind, bilden ein Grundnetz, das dann durch weitere Linien verdichtet wird. Der *Feinentwurf* baut auf dem Linienkonzept des Grobentwurfes auf und bestimmt für jede Linie

- den genauen Linienverlauf,
- den Fahrplan und
- den Fahrzeug- und Fahrereinsatzplan.

Für die Dimensionierung von Richtungsbändern muß zusätzlich die Fahrzeit berechnet werden, die von der Zahl der nachgefragten Bedarfshaltestellen abhängt und innerhalb bestimmter Bandbreiten schwankt. Aus der Häufigkeitsverteilung dieser Fahrzeiten und einer vorgegebenen Sicherheitswahrscheinlichkeit ergibt sich dann die Bemessungsfahrzeit für die anschließende Fahrplanbildung. Für die Berechnung der Kenngrößen eines Richtungsbandes wird ein überschlüssiges Verfahren entwickelt, da das exakte Verfahren rechenzeitintensiv und damit für den interaktiven Entwurfsprozeß nicht praktikabel ist.

## Rechenmodell

Das Rechenmodell setzt sich aus einem Netzmodell, einem Benutzermodell und einem Betreibermodell zusammen.

Das *Netzmodell* darf nicht nur aus den Knoten und Kanten des Verkehrswegenetzes bestehen, sondern muß zusätzlich zum räumlichen Linienverlauf alle Kurse der Linien mit ihren Abfahrts- und Ankunftszeiten abbilden. Die zusätzliche Angabe eines Fahrers und eines Fahrzeugs für jeden Kurs macht den Kurs außerdem zum Träger betrieblicher Informationen.

Das *Benutzermodell* wird eingesetzt, um die Wirkungen eines ÖPNV-Angebotes auf die Benutzer des ÖPNV zu ermitteln. Dazu wird das Verhalten der Verkehrsteilnehmer bei einem vorgegebenen ÖPNV-Angebot nachgebildet. Durch die Verfolgung aller Ortsveränderungen im Netz und durch das Mitrechnen der Kennwerte dieser Ortsveränderungen gewinnt man Informationen über die Qualität dieser Verbindungen. Während bei MIV-Netzen vor allem die Kenngrößen Reisezeit einer Fahrtroute und die Belastung eines Straßenabschnittes interessieren, werden für ein ÖPNV-Angebot Verbindungen beurteilt. Dazu werden für jede Verbindung die Kenngrößen

- Zugangsweg bzw. Zugangszeit,
- Beförderungszeit durch den Transportträger,
- Umsteigehäufigkeit,
- Umsteigewartezeit an einer Umsteigehaltestelle,
- Abgangsweg bzw. Abgangszeit

und für jede Beziehung die Kenngröße Bedienungshäufigkeit berechnet. Da der Fahrgast neben der Fahrtroute auch den Abfahrtszeitpunkt einer Fahrt wählen muß, wird zur Ermittlung dieser benutzerbezogenen Kenngrößen keine Routensuche, sondern eine Verbindungssuche durchgeführt, die das Gesamtfahrplanangebot und eventuelle Wahlmöglichkeiten berücksichtigt. Dafür wird ein dynamischer Mehrweg-Suchalgorithmus vorgestellt, der im Gegensatz zu Bestwegverfahren mehrere Verbindungen ermittelt, die sich in ihrer räumlichen und zeitlichen Ausprägung unterscheiden. Im Anschluß an die Verbindungssuche werden die Fahrten einer Beziehung auf die angebotenen Verbindungen verteilt. Dazu wird ein Entscheidungsmodell benutzt, das die Kenngrößen Gehzeit, Beförderungszeit, Umsteigewartezeit und Umsteigehäufigkeit einer Verbindung einbezieht und die Wunschabfahrtszeit bzw. die Wunschankunftszeit der Fahrgäste mit der angebotenen Abfahrts- bzw. Ankunftszeit vergleicht.

Das *Betreibermodell* dient der Ermittlung des betrieblichen und finanziellen Aufwandes. Die üblicherweise im Entwurfsprozeß verwendeten Schätzverfahren, die auf der Anwendung von Durchschnittswerten aufbauen oder den Fahrzeugbedarf mit der Formel  $\text{Zahl der Fahrzeuge} = \text{Umlaufzeit} / \text{Takt}$  ermitteln, eignen sich nur für größere, homogene Netze, d.h. städtische ÖPNV-Netze. Um örtliche Besonderheiten und die betrieblichen Wirkungen eines Taktbetriebs zu berücksichtigen, beinhaltet das Betreibermodell ein Verfahren zur Berechnung der Personal- und Fahrzeugkosten, das auf einer expliziten Fahrzeug- und Fahrereinsatzplanung beruht. Die Berechnung der Personalkosten einer Linie oder einer Liniengruppe erfolgt separat für jeden eingesetzten Fahrer. Dabei wird zuerst allen Minuten eines Tages eine Tätigkeit (Freizeit, Einsatzfahrt, Fahrgastbeförderung, Dienstunterbrechung, Pause usw.) zugewiesen. In einem zweiten

Schritt werden die Minuten zusammengezählt, die zur Arbeitszeit gerechnet und bezahlt werden müssen. Die Fahrzeugkosten setzen sich zusammen aus

- den fixen Kosten (abhängig von der Fahrzeuganzahl),
- den laufleistungsabhängigen Kosten (abhängig von den Fahrzeugkilometern) und
- den Kapitalkosten (abhängig von der Fahrzeuganzahl und den Fahrzeugkilometern).

Zur Verwaltung und zur Verarbeitung der Daten des Verkehrsangebotes im Netzmodell werden ein Netzeditor und ein Fahrplanneditor entwickelt. Diese beiden Dialogprogramme stellen die notwendigen Methoden bereit, mit denen die einzelnen Elemente des Angebotes erzeugt und verändert werden können. In die Dialogprogramme sind außerdem die Methoden zur Wirkungsermittlung integriert, die dem Benutzermodell und dem Betreibermodell entsprechen. Mit dem Netzeditor lassen sich die räumlichen Merkmale der Netzobjekte Verkehrszelle, Haltestelle, Strecke und Linie bearbeiten. Der Fahrplanneditor dient zur Bearbeitung einzelner Fahrten einer Linie. Die Fahrten erfassen über die Merkmale Abfahrtszeit, Fahrer und Fahrzeug sowohl die zeitliche als auch die betriebliche Komponente des ÖPNV-Angebotes im Hinblick auf den Fahrplan und den Einsatzplan. Zur Entwicklung der Dialogprogramme bietet sich die objektorientierte Programmierung an, da die Elemente eines ÖPNV-Angebotes sehr anschaulich als Objekte aufgefaßt werden können.

Die objektorientierte Programmierung bedeutet eine Abkehr von der sequentiellen Problemlösung, bei der Funktionen und Unterprogramme nacheinander in einer vorgegebenen Reihenfolge durchlaufen werden. Statt dessen werden Objekte erzeugt, die Eigenschaften (Merkmale) und Methoden zum Bearbeiten der Merkmale haben. Objekte reagieren auf bestimmte Nachrichten, führen spezifische Aktivitäten durch und senden ihrerseits Nachrichten. Die Reihenfolge, in der die Objekte aktiviert werden, liegt nicht von vornherein fest. Aus diesem Grund eignet sich die objektorientierte Programmierung besonders für die Gestaltung menügesteuerter, interaktiver Programme, die auf Nachrichten des Benutzers reagieren und diese Nachrichten an ein oder mehrere Objekte weiterleiten. Wesentlich für die Realisierung eines Rechenmodells mit Hilfe der objektorientierten Programmierung ist eine problemspezifische Definition von Klassen. Jede Klasse ist ein Prototyp für die Konstruktion von Objekten und legt die Merkmale und die Methoden für die Objekte dieser Klasse fest. In der Arbeit werden die entwurfsrelevanten Merkmale der Objekte Verkehrszelle, Haltestelle, Strecke, ÖPNV-Linie, Fahrt einer Linie, Fahrer und Fahrzeug festgelegt und objektspezifische Methoden zum Bearbeiten der Merkmale vorgestellt. Im Mittelpunkt steht dabei das Objekt ÖPNV-Linie, das sich aus den Objekten Haltestelle, Strecke und Linienfahrt zusammensetzt.

## SUMMARY

### 1 Introduction

Today's traffic master plans suggest that one should distinguish between different means of transport, according to their specific capabilities, in order to meet goals of urban and regional planning. Public transport is most suitable for meeting a highly concentrated travel demand which are prevalent in cities and along main transportation corridors. Transport by car is preferred, and therefore predominant, in the suburbs and rural areas, where even improved public transport is not competitive. Despite this, public transport in rural areas should provide a basic quality of service, in order to achieve the following objectives:

- To provide a basic social service for those people who depend upon public transport, given their age, health or preferences.
- To shift commuter car traffic originating in rural areas to public transport in order to reduce congestion in the cities.
- To eliminate the need for car transport to local park&ride-stations through the provision of a more comprehensive rural public transport system.

A new federal law, privatising German Railways and transferring the responsibility for the regional trains to the states, provides a new framework in which to achieve these goals. The envisioned restructuring facilitates improvements in rail service, for example through the introduction of a timed transfer system. Accordingly, it is necessary to redesign the bus network in order to offer a comprehensive public transport system, integrating train and regional bus services. This process is supported by state laws which oblige the regional authorities to take responsibility for the non-profitable regional buses.

This paper develops a method by which to design and analyse a public transport system for rural areas. The proposed method differs from methods used for designing public transport systems in cities because public transport in rural areas has a different structure.

- In cities short headways are most common. A passenger can approach any boarding stop without knowing the timetable and every stop served by more than one line can be used as a transfer stop. Similarly, it is easy for the operator to allocate the rolling stock. Unproductive layover times at the terminal are always short and never longer than the headway.
- In contrast, public transport service in rural areas is characterised by long and usually irregular headways. A passenger needs to know the departure time at the boarding stop and know of possible transfer stops, because transfers are not automatically guaranteed at the intersection of two lines. The introduction of a fixed rhythm headway results in lower productivity if there are long layover times at the terminal station. In addition, when planning a new public transport system, the effects of a dial-a-bus system should be examined. In areas with low and unstructured travel demand the introduction of a dial-a-bus system might provide a more cost-efficient service than conventional line operation.

These different characteristics influence the design process. In urban areas the network design and the allocation of labour and rolling stock occurs in separated phases of the design process. The network design is usually conducted within planning/engineering consultancies, which develop the network plan and determine service frequency. The allocation of labour and rolling stock is carried out by the operator who then constructs a precise timetable and develops driver and vehicle employment plans. The separation of these two phases prohibits a simultaneous consideration of the main planning objectives,




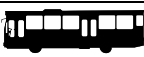




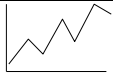


- the maximisation of service quality and
- the minimisation of operational costs.

The two separate phases should therefore be combined since the balance between these incompatible objectives is especially important in rural areas. A network design which places a premium on passenger interests and only estimates operational parameters, disregards the relatively greater burden of introducing an additional vehicle in a small network. In contrast, if the network design is influenced primarily by operational aspects, the round trip times and necessary driver rest stops will be the main factors determining the timetable. This results in the kind of irregular service which currently can be witnessed in most rural areas.

Therefore, if vehicles and drivers are to be employed efficiently and passenger interests are to be respected, the network, timetable and allocation plans must not be constructed separately, but within one comprehensive design process.

## 2 Impacts of a public transport system

To examine the quality of the proposed public transport system the impacts of the system need to be determined and evaluated. Essential criteria used by passengers and operators to judge a public transport system are shown in **Figure 1**. The criteria important to the passengers concern the quality of service, whereas the operational criteria relate to the supply of the service.

Passenger	Operator
	 <div> Regional authorities  ↓  Public transport companies  ↓  Operator </div>
<b>Spatial accessibility:</b> How far is the nearest stop? 	<b>Operator:</b> What resources are required?
<b>Temporal accessibility:</b> When and how often does the bus go? 	How many vehicles are required? 
<b>Time requirement:</b> How long do I need to get there? 	How many drivers are required? 
<b>Directness:</b> How often do I have to transfer? 	What is the schedule efficiency? 
<b>Cost:</b> How much does the journey cost? 	<b>Regional authorities:</b> How big is the deficit? 

**Figure 1:** Criteria used by passengers and operators in evaluating a public transport system

Impact models which take the specific characteristics of rural public transport systems into consideration, are necessary to determine the impact of an existing or proposed public transport system on passengers and operators:

- To describe the *impact on the passengers* the indicators of a journey – trip time, walking time, number of transfers and waiting time – and the indicator service frequency are calculated. Existing methods to calculate these indicators model a public transport journey by applying route choice algorithms developed specifically for car traffic. These methods only consider the spatial structure of a public transport line, thus assuming that passengers do not need to know the departure times and the transfer times. This assumption is only valid in urban areas where all lines have short headways. The long headways in rural areas, however, require that passengers know the departure and transfer times of a journey. Consequently, the passenger selects the best connection rather than the most direct route. The calculation of the journey indicators therefore can not be based on a route search but requires a connection search which regards the spatial and the temporal structure of the public transport system.
- To determine the *impacts on the operator*, indicators which describe the necessary resources and the operational costs are calculated. Driver and vehicle plans need to be devised in order to compute the exact number of required vehicles, drivers and labour hours. The result forms the basis for an estimation of operational costs. A cost estimation which relies on fixed costs per kilometre is suitable only for large, homogeneous urban networks. Fixed costs per kilometre are not appropriate for the evaluation of smaller networks or single transit lines, since local conditions affect costs. Moreover, where headways are long, the introduction of a fixed rhythm headway may result in long layover times at the terminal stop. Only explicit vehicle and driver allocation can reveal the additional costs of a fixed rhythm headway and can show whether long layover times may be used for driver rest breaks.

### 3 The design process

The aim of the design process is to apply a theoretical concept for public transport system to the characteristics of a specific county. This process is influenced by project objectives. **Figure 2** shows the phases of the design process:

- development of a solution,
- determination of impacts,
- evaluation of impacts and
- analysis of deficiencies.

These phases constitute a cyclic process which continues until a satisfactory solution, fulfilling the project objectives, is achieved.

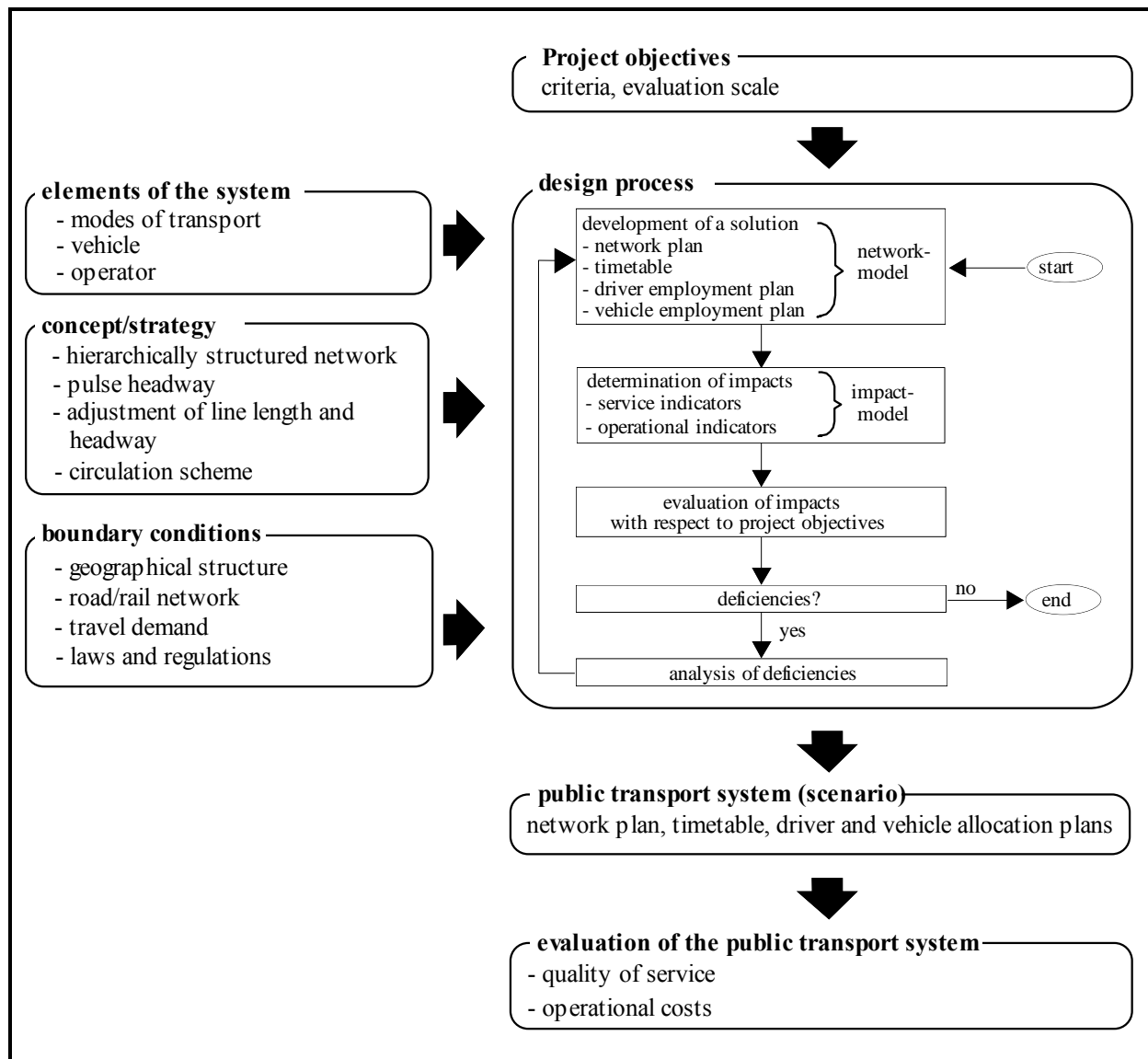


Figure 2: The design process

The design process shown above cannot be described by a comprehensive optimisation model which directly computes an optimal solution. Since each road section can be part of a transit line and every departure time of a line can be modified, the system has many parameters making the optimisation problem very complex. Simplifications which affect the solution space and solution quality are required in order to make optimisation feasible. Furthermore, it is difficult to include local boundary conditions, especially additional services for schools, in the optimisation model. A completely automatic decision-making process also blocks important insights and hinders useful interventions by the planner.

A computer-aided design process is proposed to overcome the limitations and disadvantages of a comprehensive optimisation model. This process incorporates the planners creativity and delegates the routine work to the computer. During the *development of a solution* the planner drafts and modifies network plan, timetable and resource allocation plans. These data are entered into the computer, where they are connected to form a network model. In this phase, the planner modifies the network model by using an interactive software program which serves as an



interface for the man-machine-dialogue. The interactive software aids the planner as it links the data and visualises currently important information in a clear way. The network model contains the input data necessary for *determining the impacts*. The impact model consists of a passenger model and an operator model. The passenger model simulates the passenger's route choice and thus calculates the service indicators of a public transport system. The operator model takes the operational indicators from the resource allocation plans and calculates the operational costs. The computed service and operational indicators are then *evaluated* for each solution according to a predetermined scale or compared with the indicators of today's public transport system. The *analysis of deficiencies* allows the cause of deficiencies, recognised during the evaluation, to be identified. This forms the foundation for the next round of the design process, where network plan, timetable and resource allocation plans are further refined.

The design process starts with a *sketch design phase* which is followed by a *detailed design phase*. Goal of the *sketch design phase* is to draw up the a network draft and a basic timetable. Based on the geographical structure, the existing train services and a selected pulse headway the planer determines network focal points which are primarily located at train stations or in central towns. At these points vehicles of several transit lines meet with every headway pulse and permit timely transfers for passengers. Transit lines connecting the network focal points form a basic network. The *detailed design phase* increases the density of the network through additional transit lines and request bus lines. In this step the planner determines for each transit line

- the exact line route,
- the precise timetable and
- the driver and vehicle allocation plan.

The design of a dial-a-bus line with request stops requires additional calculations to determine the running time which varies with the number of served stops. It is therefore essential to determine the expected frequency distribution of the running time for each dial-a-bus line. With this distribution and a reliability percentile it is possible to obtain a design running time which then can be used for the timetable design.

## 4 Network model

The spatial and temporal structure of the public transport system must be taken into account in order to determine the impacts of the system on passengers and operators. This requires a network model which consists not only of the network's nodes and edges but which also models the line route, the running time between stops and the departure time of each vehicle trip. The provision of additional driver and vehicle information connects operational data with the vehicle trip.

A network editor and a timetable editor are developed to manipulate the data of the public transport system which are stored in the network model. These editors provide the essential methods to create and modify the elements of a public transport system. The network editor (**Figure 3**) processes the spatial elements traffic cell, line stop, road or rail section and transit line. The timetable editor creates vehicle trips and helps to construct resource allocation plans.

The development of the network and timetable editor calls for object-oriented programming methods since a public transport system can easily be perceived as a set of objects.

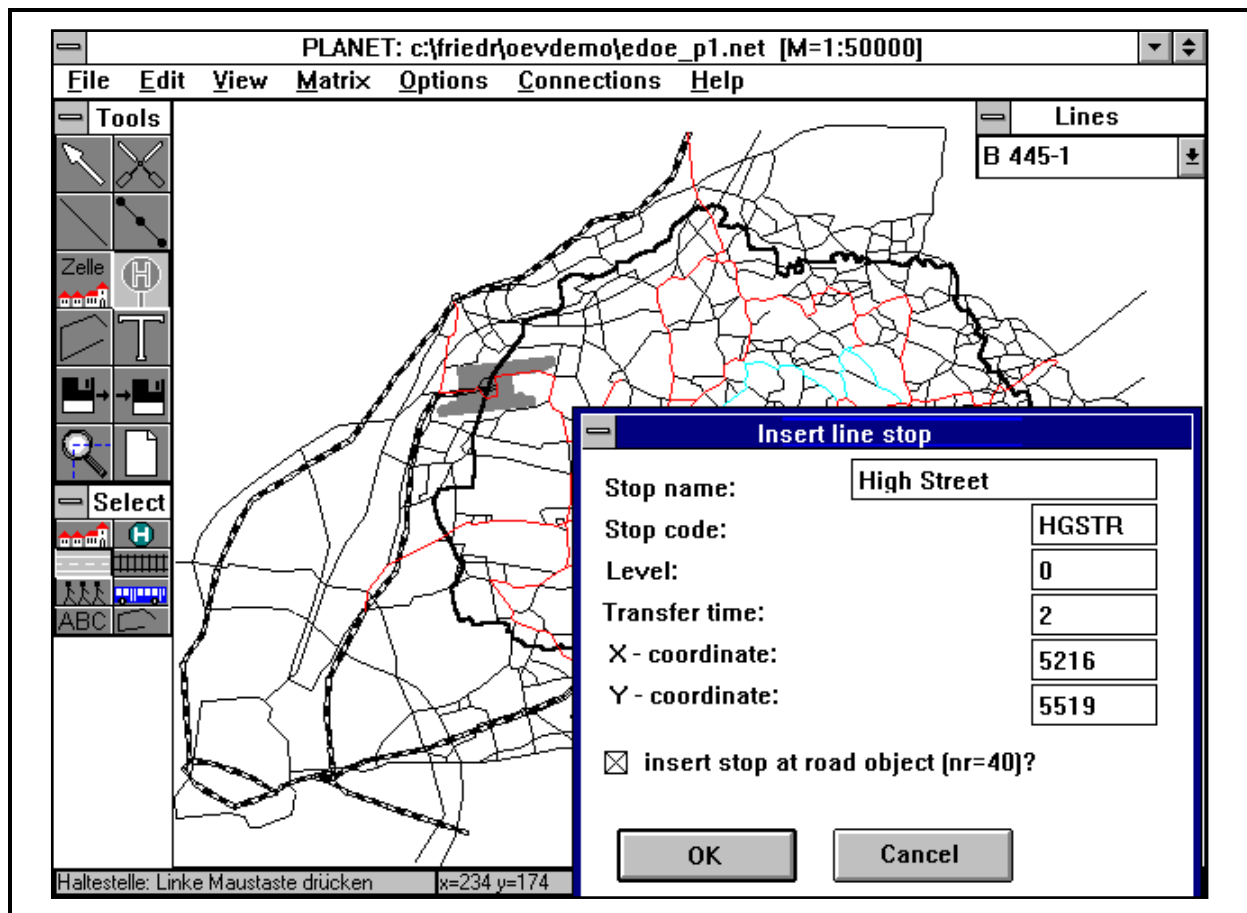


Figure 3: The network editor environment

Object-oriented programming differs from sequential programming, where functions and sub-routines are processed consecutively. It creates objects which consist of attributes (properties) and behaviour (methods). Objects react to certain messages, conduct object-specific operations and send messages themselves. Since the order in which the objects are activated is not predetermined, object-oriented programming is ideal for the development of complex, interactive software which reacts to user messages and processes these messages for one or more objects. The problem specific definition of classes is an essential part of object-oriented programming. Each class represents a prototype for the construction of objects and defines the properties and methods of the objects of this class. The questions and messages which the object must respond to, determine the classes' properties and methods. For example, an object derived from the class line stop has to answer the questions "What is your name?" and "Where are you located?" and must react to messages like "Display yourself" or "Draw your catchment area". To describe the spatial and temporal structure of a public transport system the paper defines the following objects:

- traffic cell (name, location),
- bus stop or train station (name, location, minimum transfer time),
- road or rail section (name, location, length, driving time, capacity),

- transit line (name, terminals, served stops, list of road/rail-sections, list of vehicle trips),
- vehicle trip (line name, departure time, driver number, vehicle number),
- driver (number, list of vehicle trips),
- vehicle (number, capacity, list of vehicle trips).

Each object bundles together properties which hold the object's data – as shown in brackets above – and specific methods to modify and monitor the object's data. The most complex component of the network model is the transit line object shown in **Figure 4**. Each line object consists of several other network objects which means it contains a list of road or rail sections to describe the line route and a list of vehicle trips to describe the line timetable.

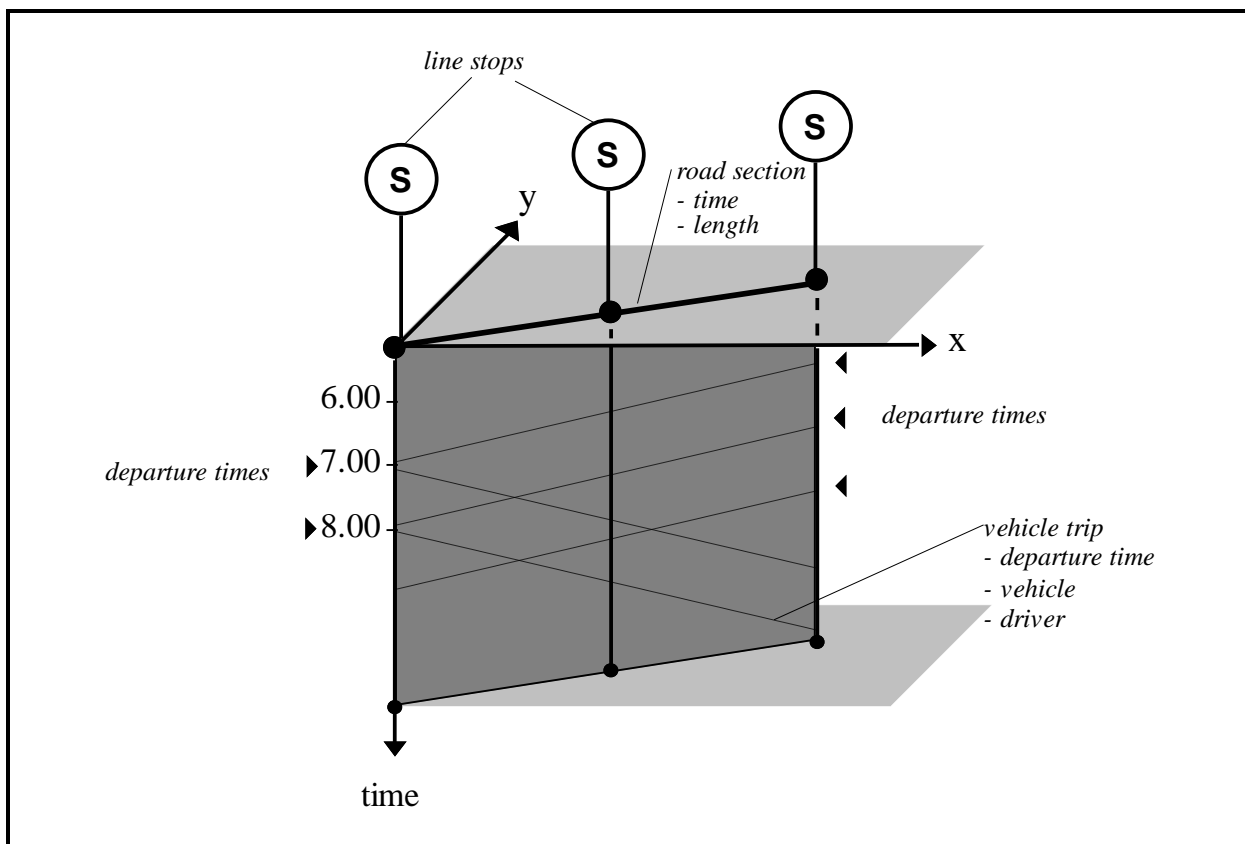
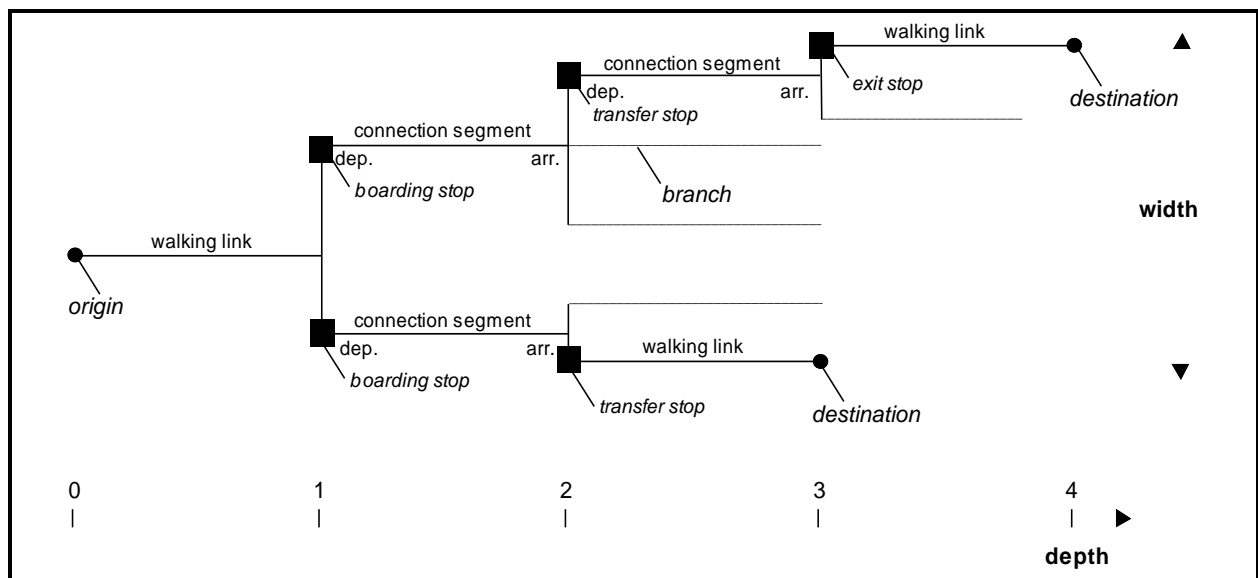


Figure 4: The transit line object

## 5 Passenger model

The *passenger model* contains a method to examine the service quality of a proposed public transport system. The model is especially designed to handle networks with long headways and varying service quality within the course of a day. Based on a simulation of passenger's routing behaviour it calculates service indicators for every origin-destination pair. Each passenger can choose from a set of connections on the basis of departure time, travel time, access time and number of transfers.

A dynamic multi-path algorithm is applied to determine all potential connections. This algorithm builds a connection tree (**Figure 5**) which contains several paths (connections) for each destination node. The resultant tree whose width depends on the service frequency is much wider than a normal shortest-path tree. The introduction of connection segments as edges, however, simplifies the tree's structure and limits its depth which then only depends on the maximum number of transfers. Each connection segment represents a part of a journey and characterises either a walk or a transferless ride on a transit line. The connection segments are implemented as objects with the attributes departure node, departure time, arrival node arrival time and vehicle trip number.



**Figure 5:** Connection tree to determine all connections from one origin

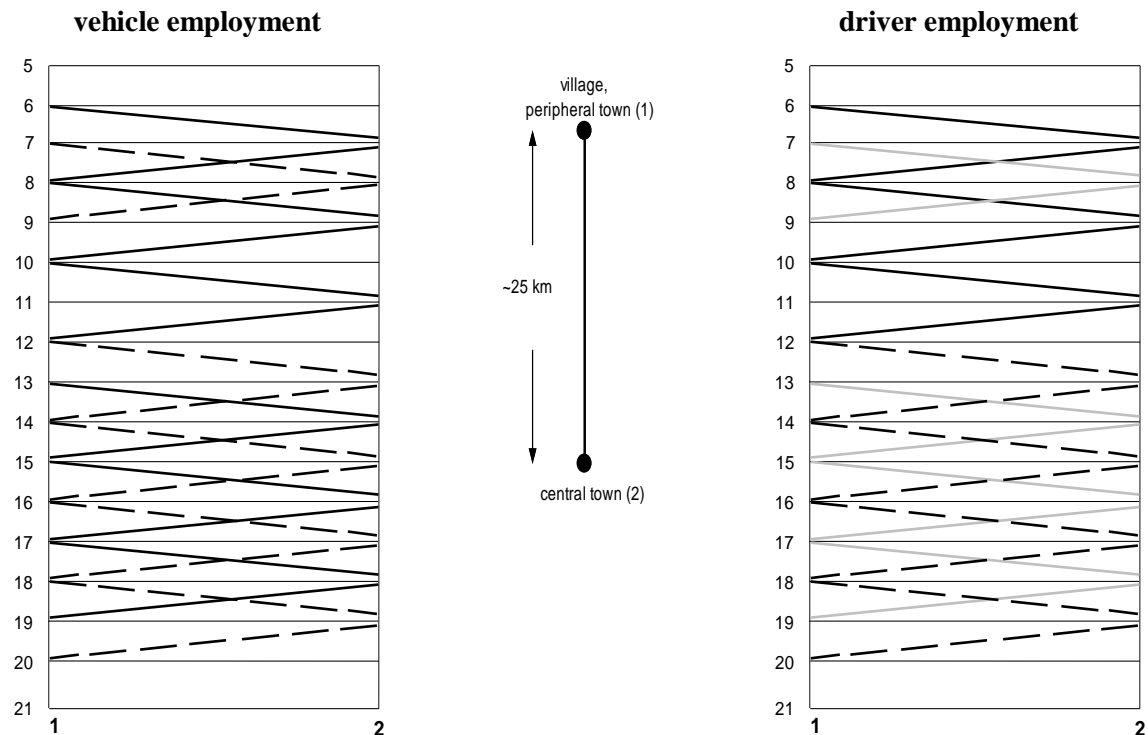
The set of connections stored in the connection tree needs to be evaluated in order to select and delete illogical connections (equal departure time with later arrival time and more transfers), which might result from the application of the multi-path algorithm.

The final assignment process simulates the passenger's behaviour who can choose from the remaining set of connections on the basis of travel time, access time, number of transfers and the differential between desired and actual departure or arrival time.




## 6 Operator model

The *operator model* checks the driver and vehicle allocation plans and calculates operational costs. This is achieved through specific methods implemented for the driver and vehicle objects. In this way the objects can answer questions like "how much do you cost?" or "do you meet the driving time regulations?" Labour costs of a line or a set of lines are calculated separately for each driver. In a first step each minute of the day is assigned to an activity (leisure time, pull out, pull in, service time, breaks etc.) The minutes which are part of the working time and need to be paid for are then summed up. Vehicle costs consist of fixed costs, mileage and capital costs.

**Figure 6** shows an example of how the operational indicators and operational costs are calculated.

**timetable:**

peripheral town (1)	6.00	7.00	8.00	10.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
central town (2)	6.50	7.50	8.50	10.50	12.50	13.50	14.50	15.50	16.50	17.50	18.50
central town (2)	7.05	8.05	9.05	11.05	13.05	14.05	15.05	16.05	17.05	18.05	19.05
peripheral town (1)	7.55	8.55	9.55	11.55	13.55	14.55	15.55	16.55	17.55	18.55	19.55

<b>driver 1</b> 	<b>driver 2</b> 	<b>driver 3</b> 
270 DM/day 15-minute breaks	340 DM/day 15-minute breaks	410 DM/day 15-minute breaks split turn
5.30 to 6.00: Pull out 6.00 to 11.55: Service 11.55 to 12.25: Pull in	11.30 to 12.00: Pull out 12.00 to 19.55: Service 19.55 to 20.25: Pull in	6.30 to 7.00: Pull out 7.00 to 8.55: Service 8.55 to 9.25: Pull in 12.30 to 13.00: Pull out 13.00 to 18.55: Service 18.55 to 19.25: Pull in

**Operational costs per year (Monday to Friday)**

<b>Total costs:</b>	<b>447.000 DM</b>
• labour costs (42 DM/hour):	255.000 DM
• capital cost for vehicles:	56.000 DM
(purchase price 430.000 DM, interest rate 8%)	
• other fixed costs:	43.000 DM
• fuel (30 DM/100 km):	45.000 DM
• maintenance (25 DM/100 km):	38.000 DM
• stand-by vehicles (10 %):	10.000 DM
• <b>cost per kilometre:</b>	<b>3.25 DM/km</b>

**Operational indicators**

• drivers/ vehicles:	3/2
• vehicle kilometre:	152.000 km/year
• service kilometre:	138.000 km/year
• pull out, pull in:	14.000 km/year
• working time:	1450 min/day
• driving time:	1340 min/day
• service time:	1100 min/day
• time for pull out, pull in:	240 min/day
• paid driver breaks:	110 min/day
• unpaid driver breaks:	90 min/day

Figure 6: Driver and vehicle allocation for a transit line (length 25 km, running time 50 min)

## 7 Application of the design method

The presented design method was applied in public transport studies for two Bavarian counties. A hierarchically structured network with a fixed rhythm headway was designed for both counties. It consists of a first level network which offers direct connections between the larger villages and the regional centres and a second level network which serves dispersed areas and functions as a feeder system. The first and second level networks are connected at network focal points where timely transfer is guaranteed. During off-peak hours service is offered every two hours. Additional services are operated during peak hours to meet travel demand.

The county of Erding has decided to introduce this public transport system. Simultaneously, a pilot study will be conducted to test dial-a-bus systems. This should clarify how passengers react to the request bus service and reveal possible problems for the operators.

The improved quality of service creates additional costs which have to be covered by the county. The application of the design method made it possible to improve the quality of service using only the additional subsidies granted by the state of Bavaria.



# 1 Problem- und Aufgabenstellung

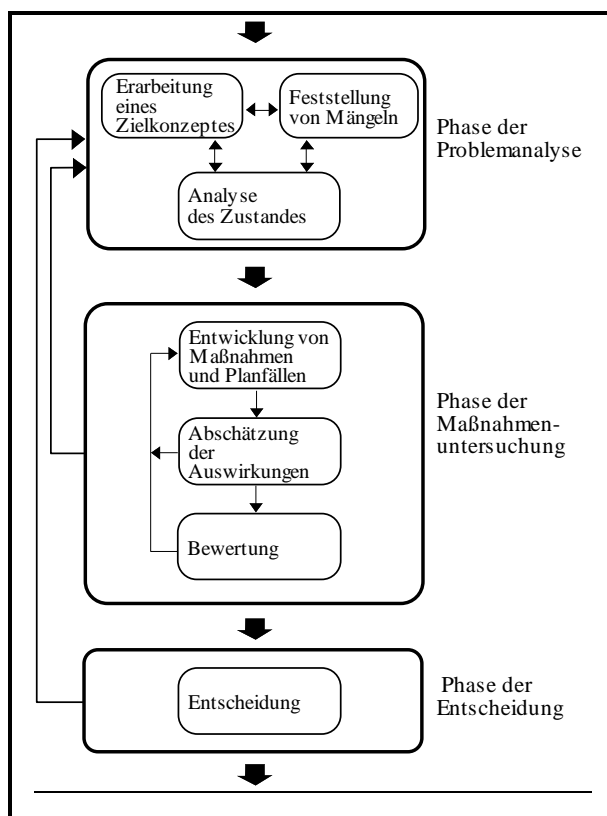
## 1.1 Entwurfsprozeß

Der Entwurf eines Verkehrsangebotes ist Teil des Verkehrsplanungsprozesses. Nach dem "Leitfaden für Verkehrsplanung" der FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN E.V. (FGSV, 1985) gliedert sich der Verkehrsplanungsprozeß in die Phasen Problemanalyse, Maßnahmenuntersuchung und Entscheidung (**Abbildung 1.1**). Der Entwurf eines Verkehrsangebotes erfolgt in der Phase der Maßnahmenuntersuchung. Er besteht aus den drei rückgekoppelten Arbeitsschritten

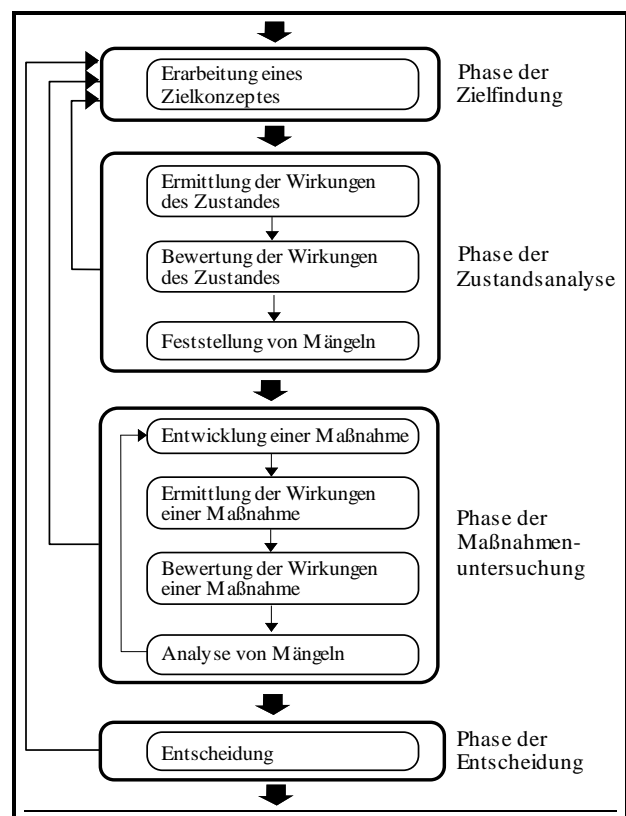
- Entwicklung von Maßnahmen und Planfällen,
- Abschätzung der Auswirkungen und
- Bewertung der Auswirkungen.

Im ersten Arbeitsschritt wird nach bestimmten Regeln eine mögliche Lösung erzeugt. Die Wirkungen der Lösung werden im zweiten Arbeitsschritt ermittelt und im dritten Arbeitsschritt bewertet. Die Bewertung orientiert sich an Zielen, deren Festlegung Gegenstand der Phase der Problemanalyse ist. Der zweite und der dritte Arbeitsschritt der Maßnahmenuntersuchung sind für den heutigen Zustand in gleicher Weise in der Phase der Problemanalyse durchzuführen.

Um die Bedeutung der Ziele für den Entwurfsprozeß herauszustellen und die methodische Übereinstimmung des Arbeitsablaufes in den ersten beiden Phasen deutlich zu machen, wird der Verkehrsplanungsprozeß in **Abbildung 1.2** in modifizierter Form dargestellt. Diese Form ist Grundlage der vorliegenden Arbeit.



**Abb. 1.1:** Verkehrsplanungsprozeß (FGSV, 1985)



**Abb. 1.2:** Verkehrsplanungsprozeß (modifiziert)



Die Arbeit befaßt sich mit dem Entwurfsprozeß, d.h. mit der Phase der Maßnahmenuntersuchung, für den straßengebundenen öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) im ländlichen Raum.

## 1.2 Entwurfsrelevante Merkmale der Verkehrssysteme

Der Entwurf eines ÖPNV-Angebotes unterscheidet sich vom Entwurf eines Angebotes für den Individualverkehr (IV) dadurch, daß Anbieter und Nutzer der beiden Verkehrssysteme unterschiedliche Aufgaben zu erfüllen haben. Im IV stellt der Anbieter lediglich das Straßennetz zur Verfügung, während der zeitliche Ablauf einer Ortsveränderung durch den Nutzer des Straßennetzes selbst geplant werden muß. Im ÖPNV erstellt der Anbieter neben dem Linienplan auch den Fahrplan, und der Nutzer wählt Fahrmöglichkeiten aus diesen Plänen aus. Um den Linienplan und den Fahrplan zu realisieren, muß der Anbieter außerdem einen Plan für den Einsatz von Fahrzeugen und Fahrern erstellen. Mit Hilfe dieser Pläne lassen sich Fahrer und Fahrzeuge räumlich und zeitlich lokalisieren.

Auch innerhalb des ÖPNV unterscheidet sich die Angebotsstruktur. Der ÖPNV im ländlichen Raum besitzt im Vergleich zum städtischen ÖPNV folgende abweichende Eigenschaften, die sich auf die Entwurfsaufgabe auswirken:

- Das Angebot weist große Fahrzeugfolgezeiten auf.
- Die Abfahrtszeiten des Angebotes sind nicht getaktet. Linienführung und Fahrzeiten verändern sich während des Tages.
- Auch nach Einführung eines Taktbetriebes können unregelmäßige Verstärkerbusse, Expresbusse und ein u.U. nicht getaktetes Bahnangebot Bestandteil des ÖPNV-Angebotes sein.

Aus diesen Unterschieden ergibt sich, daß ein Fahrgast im ländlichen Raum den ÖPNV nicht ohne Kenntnis der Abfahrtszeiten und Umsteigemöglichkeiten benutzen kann, während er bei den kurzen Fahrzeugfolgezeiten im städtischen ÖPNV jederzeit zur Haltestelle gehen und an jeder Linienkreuzung umsteigen kann. Außerdem erschweren die großen Fahrzeugfolgezeiten die Erstellung von Einsatzplänen für Fahrzeuge und Fahrer. Bei einem getakteten Angebot mit Fahrzeugfolgezeiten von 60 oder 120 Minuten können in Abhängigkeit von der Linienlänge am Linienende unproduktive Standzeiten entstehen, die sich nur vermeiden lassen, wenn Linienplan, Fahrplan und Einsatzplan rückgekoppelt erstellt werden. In städtischen Bereichen sind Linienplan, Fahrplan und Einsatzplan dagegen weitgehend unabhängig voneinander.

Der traditionelle, an feste Abfahrtszeiten, Strecken und Haltestellen gebundene ÖPNV-Linienverkehr setzt eine ausreichend hohe Verkehrsnachfrage voraus, um wirtschaftlich betrieben werden zu können. Dies ist nur in Ballungsgebieten und entlang von Verkehrsachsen der Fall. In Räumen und Zeiten geringer und disperser Verkehrsnachfrage, wie sie im ländlichen Raum überwiegt, ist der Linienbetrieb häufig unwirtschaftlich. Hier kann der Einsatz bedarfsgesteuerter Betriebsweisen die Wirtschaftlichkeit verbessern. Um bedarfsgesteuerte Buslinien in ein ÖPNV-Angebot integrieren zu können, müssen ihre speziellen Merkmale, das sind vor allem nachfragebedingt schwankende Fahrzeiten, im Entwurfsprozeß berücksichtigt werden.

Diese besonderen Eigenschaften des ÖPNV-Angebotes im ländlichen Raum erfordern eine Erweiterung der in der Angebotsplanung für den städtischen ÖPNV üblichen Entwurfsverfahren.

### 1.3 Vorhandene Entwurfsverfahren

Die bisherigen Entwurfsverfahren wurden für die Angebotsplanung in städtischen Bereichen entwickelt. Wegen der weitgehenden Unabhängigkeit von Linienplan, Fahrplan und Einsatzplan wird die Planungsaufgabe in die Sektoren Verkehrsplanung und Betriebsplanung getrennt (LEUTZBACH et al., 1987). Die Verkehrsplanung umfaßt die Liniennetzplanung, die Kapazitätsplanung und die Fahrplanbildung (Fahrzeitplanung). Die Betriebsplanung besteht aus der Fahrereinsatzplanung und der Fahrzeugeinsatzplanung. Die Fahrplanbildung stellt das Bindeglied zwischen Verkehrs- und Betriebsplanung dar. Sie erfolgt im einfachsten Fall im Zusammenhang mit der Liniennetz- und Kapazitätsplanung durch die Angabe der Fahrzeiten zwischen den Haltestellen und der Fahrzeugfolgezeiten. Dieser Grundfahrplan wird dann beim Entwurf von Einsatzplänen an betriebliche Randbedingungen angepaßt. Eine genauere Fahrplanbildung umfaßt die Optimierung der Fahrzeitvorgaben und der Anschlüsse. Methoden zur Erstellung von Tarifplänen, die ebenfalls Bestandteil eines ÖPNV-Angebotes sind, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt.

#### 1.3.1 Liniennetzplanung

Die Verfahren für den Entwurf von Liniennetzen wurden bereits mehrfach klassifiziert (AHRENS, 1984, KRUG 1987, LEUTZBACH et al. 1987, SONNTAG 1977) und im Hinblick auf ihre Eignung bewertet. Grundsätzlich lassen sich Intuitivverfahren und Optimierungsverfahren unterscheiden.

Bei den *Intuitivverfahren* entwirft der Planer nach bestimmten Entwurfsregeln eine begrenzte Anzahl von Lösungen und berechnet und bewertet ihre Wirkungen mit einem Wirkungsmodell. Typische rechnergestützte Intuitivverfahren für die Liniennetzplanung werden von KRUG (1987) und von RAPP et al. (1976) beschrieben. Dabei kommt es zu einer Aufgabenteilung zwischen Planer und Rechner. Ausgehend von einer Anfangslösung wird das Liniennetz vom Planer manuell sukzessiv verbessert, während der Rechner die Wirkungen bzw. die Wirkungsänderungen berechnet. Regeln zur Lösungsfindung sind nicht wie bei den Optimierungsverfahren explizit in Algorithmen formuliert, sondern beruhen auf der Erfahrung des Planers. Der Vorteil dieser rechnergestützten Intuitivverfahren liegt darin, daß aufgrund der menschlichen Kreativität sinnvolle, zulässige Lösungen unmittelbar und zielgerichtet gefunden und durch den Rechnereinsatz schnell beurteilt werden können. Als Nachteil muß angesehen werden, daß trotz Rechnereinsatz nur ein sehr kleiner Teil des Lösungsraumes abgesucht werden kann und daß nicht alle Entwurfsregeln des Planers expressis verbis bekannt sind, sondern von Erfahrungen und verborgenen, subjektiven Werthaltungen abhängen.

*Optimierungsverfahren* erfordern, daß das zu lösende Problem in eine mathematische Form übertragen werden kann. Dazu muß die Realität in einem mathematischen Modell (Wirkungsmodell) nachgebildet werden. Verknüpft man das mathematische Modell mit einer Fragestellung, z.B. "welche Lösung verursacht minimale Kosten?", dann wird aus dem Realproblem ein Formalproblem (MÜLLER-MERBACH, 1971). Zur Lösung des Formalproblems suchen Optimierungsverfahren nach den Variablenwerten (Eingangsdaten in das Wirkungsmodell), mit denen eine Optimallösung oder zumindest eine zulässige, suboptimale Lösung erreicht wird. Optimierungsverfahren laufen i.d.R. in geschlossener Form ab, d.h. ein Eingriff des Planers ist nicht vorgesehen. Die Anwendung eines Optimierungsverfahrens, das unmittelbar

zu einer optimalen oder suboptimalen Lösung führt, erfordert die Formulierung einer Zielfunktion, die ein Zielkriterium optimiert. Um bei der Liniennetzplanung mehrere Zielkriterien berücksichtigen zu können, müssen Einzelkriterien z.B. durch eine monetäre Bewertung zusammengefaßt (vgl. HÜTTMANN, 1979) werden. Mehrere Zielkriterien können bei der Liniennetzplanung auch dadurch berücksichtigt werden, daß die Optimierungsaufgabe in Teilprobleme, wie z.B. die

- Bestimmung des Wegenetzes,
- Bestimmung der Haltestellenlage,
- Bestimmung der Linienführung,

aufgeteilt wird (vgl. SONNTAG, 1977). Alle für die Liniennetzplanung entwickelten Optimierungsverfahren minimieren den Zeitaufwand der Fahrgäste und maximieren den Anteil der Direktfahrer. Die Verfahren unterscheiden sich in ihrer Methodik und werden von LEUTZBACH et al. (1987) in vier Gruppen eingeteilt:

- Reduktionsverfahren (HÜTTMANN, 1979) gehen von einem Maximalnetz aus und verringern die Zahl der befahrbaren Strecken durch die schrittweise Herausnahme von Strecken. Aus dem reduzierten Streckennetz wird dann mit einem Entscheidungsbaumverfahren ein Liniennetz entwickelt.
- Progressivverfahren (SIMONIS, 1981) beginnen mit der Strecke eines Netzes, die am stärksten belastet ist. An diese Strecke werden fortschreitend die Strecken mit der jeweils stärksten Belastung angefügt und als Linien definiert.
- Verkehrsstromverfahren (SONNTAG, 1977) bilden das Liniennetz durch Aneinanderreihen der Streckenabschnitte mit den jeweils höchsten Belastungen.
- Fahrtensummenverfahren (INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN KARLSRUHE, 1981; MOTT/SPARMANN, 1983) suchen in einem Maximalnetz zwischen allen potentiellen Endhaltestellen die Streckenkombination, die die höchste Fahrtensumme bedienen kann. Diese Kombination wird als Nachfragelinie bezeichnet.

Die genannten Entwurfsverfahren zur Liniennetzplanung optimieren lediglich die räumliche Ausprägung eines Netzes. Die zeitliche Dimension des Angebotes bleibt unberücksichtigt oder reduziert sich auf die Angabe eines Taktes. Damit werden für jede Umsteigehaltestelle kurze Umsteigewartezeiten unterstellt. Jeder Schnittpunkt zweier Linien wird, unabhängig von den Abfahrtszeiten, ohne Einschränkungen als Umsteigehaltestelle interpretiert. Diese vereinfachte Modellvorstellung ist nur bei niedrigen Fahrzeugfolgezeiten, d.h. im städtischen ÖPNV gewährleistet. Betriebliche Wirkungen eines Angebotes werden beim Entwurf mit einfachen Schätzverfahren ermittelt, die i.d.R. nur die Linienlänge, den Takt und die Geschwindigkeit einbeziehen.

Verfahren, die sich mit der ÖPNV-Angebotsplanung für den ländlichen Raum auseinandersetzen, haben bisher nicht den Formalisierungsgrad der Verfahren für die städtische Angebotsplanung erreicht. SCHUSTER (1992) stellt Bausteine für die Grobplanung eines Betriebskonzeptes im ländlichen Raum zusammen, das u.a. die Verkehrsnachfrage, die Fahrzeuggröße, bedarfsgesteuerte Betriebsformen und die Betriebskosten berücksichtigt. VUCHIC et al. (1981) beschreibt den Ablauf einer ÖPNV-Angebotsplanung für flächig besiedelte Bereiche (Suburbs) mit großen Fahrzeugfolgezeiten. Das Verfahren verfolgt das Ziel, ein Liniennetz zu entwerfen, bei dem sich die Fahrzeuge der einzelnen Linien an ausgewählten

Umsteigehaltestellen treffen und so regelmäßige Umsteigeanschlüsse ermöglichen. Der Entwurfsprozeß erfordert die Arbeitsschritte

- Wahl eines Systemtaktes (Pulse Headway),
- Festlegung von Umsteigehaltestellen (Network Focal Points),
- Linienplanung und Analyse der linienbezogenen Kenngrößen,
- endgültige Fahrplanerstellung.

Beide Verfahren erstellen zwar ein Konzept für den ÖPNV im ländlichen Raum. Eine Methode, mit der das Konzept an die spezifischen Randbedingungen eines Untersuchungsgebietes angepaßt werden kann, ist jedoch nicht enthalten. Ebenso fehlen genaue Wirkungsmodelle zur Überprüfung eines geplanten ÖPNV-Angebotes.

### 1.3.2 Fahrplanbildung

Der Fahrplan enthält die zeitliche Komponente des Fahrtablaufes. Sie besteht aus *relativen* Zeiten (Fahrtdauer) und *absoluten* Zeiten (Zeitpunkten). Die relativen Zeiten geben die Fahrzeiten zwischen den Haltestellen einer Linie an. Aus diesen Zeiten und dem Abfahrtszeitpunkt an der Anfangshaltestelle leiten sich absolute Abfahrts- bzw. Ankunftszeiten an den einzelnen Haltestellen ab.

Die *relative Fahrzeit* eines ÖPNV-Fahrzeuges zwischen zwei Haltestellen unterliegt Schwankungen, die durch Störungen im Fahrtablauf und unterschiedliche Haltestellenaufenthaltszeiten verursacht werden. Sie können zufälliger Art oder periodischer Art sein. Periodische Schwankungen treten insbesondere im straßengebundenen ÖPNV auf, wenn sich die Dichte des allgemeinen Straßenverkehrs mit der Tageszeit ändert. Sie resultieren aber auch aus einem unterschiedlichen Fahrgastandrang. Die im Fahrplan enthaltenen Vorgaben für die relativen Fahrzeiten müssen an die realisierbaren Fahrzeiten angepaßt werden. Ein entsprechendes Verfahren, haben KIRCHHOFF/HOLZ (1987) angegeben. Ausgangspunkt sind gemessene Fahrzeiten, aus deren periodischen Schwankungen Zeiträume gleicher Fahrzeitvorgaben abgegrenzt werden und aus deren Häufigkeitsverteilung unter Angabe einer Sicherheitswahrscheinlichkeit die Sollfahrzeit abgeleitet wird.

Die Überführung der relativen Fahrzeiten zwischen den Haltestellen in *absolute Abfahrtszeiten* an den Haltestellen legt die zeitliche Verknüpfung der Linien untereinander fest (Anschlüsse) und beeinflusst den Fahrer- und Fahrzeugeinsatz. Besondere Aufmerksamkeit erfordert die Herstellung von Anschlüssen immer dann, wenn große Fahrzeugfolgezeiten vorhanden sind. Um die Anschlüsse eines getakteten ÖPNV-Angebotes zu optimieren, hat GÜNTHER (1985) ein heuristisches Verfahren entwickelt. Als Eingangsdaten müssen die Zahl der Umsteiger für jede Umsteigebeziehung und die Wege, Fahrzeiten und Fahrzeugfolgezeiten für jede Linie bekannt sein. Da es sich um ein getaktetes Angebot handelt, genügt für jede Linie neben der Angabe des Taktes die Angabe der ersten Abfahrtszeit an der Anfangshaltestelle, um den Fahrplan der Linie genau zu beschreiben. Ziel des Verfahrens ist es, die Gesamtwarezeit der Umsteiger im Netz zu minimieren. Dazu werden für alle Linien und beide Linienrichtungen nacheinander die ersten Abfahrtszeiten solange verschoben, bis sich minimale Wartezeiten ergeben. Nachdem die optimale Lösung für die vorhergehenden Linien durch die Optimierung der nachfolgenden

Linien wieder verloren gehen, muß jede Linie mehrfach bearbeitet werden, bis das Gesamtminimum erreicht ist.

Eine derartige, isolierte Optimierung der Anschlußzeiten eines vorgegebenen Fahrplans stößt an Grenzen, wenn für eine Linie große Fahrzeugfolgezeiten geplant sind und folglich nur sehr wenige, d.h. ein oder zwei Fahrzeuge, eingesetzt werden müssen. Das Ziel, unproduktive Standzeiten am Linienende gering zu halten, engt den Spielraum für das Verschieben der ersten Abfahrtszeit stark ein. Die Abfahrtszeiten in Richtung und Gegenrichtung sind weitgehend voneinander abhängig und lassen sich nicht mehr getrennt verschieben. Der Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge kann nur vermieden werden, wenn die Umsteigehaltstellen bereits bei der Liniennetzplanung in Abhängigkeit von der räumlichen Geometrie des Netzes festgelegt werden.

### 1.3.3 Einsatzplanung

Bei der Fahrer- und Fahrzeugeinsatzplanung wird jeder Fahrt des Fahrplans ein Fahrer und ein Fahrzeug zugeordnet. Ziel der Einsatzplanung ist es, einen vorgegebenen Fahrplan mit möglichst geringem Aufwand an Fahrzeugen und Personalstunden abzuwickeln. Die Einsatzplanung stellt eine ständig wiederkehrende Aufgabe dar, die ohne eine Neuplanung des ÖPNV-Angebotes auch bei kleinen Änderungen durchgeführt werden muß.

Zur Bildung von Fahrzeugumläufen, Fahrerdiensten und Dienstreihenfolgen wurden eine Reihe von Verfahren entwickelt und in kommerziellen Programmen implementiert. **Tabelle 1.1** zeigt eine Zusammenstellung deutscher Programmsysteme.

Programmsystem	Quelle
HOT	Daduna et al., 1985; Gezgin/Tolle, 1986
PRO	IVV, Braunschweig
EPON	Transtec, Hannover
INTERPLAN	Fritsche/Mott, 1986
MICROBUS	Hoffmann/Langenhahn, 1993

Tab. 1.1: Ausgewählte Programmsysteme zur Fahrer- und Fahrzeugeinsatzplanung

In den Verfahren werden die Schritte Fahrzeugumlaufbildung, Bildung von Diensten und Dienstreihenfolgen nacheinander abgearbeitet. Ausgangspunkt ist der Fahrplan. Die Verfahren unterscheiden sich durch den Automatisierungsgrad. Die ersten Programmversionen unterstützten die herkömmliche manuelle Vorgehensweise durch die Verwaltung der Daten und die Übernahme der Zeichentätigkeit (PRO). Verfahren, die eine möglichst vollständige Optimierung anstrebten (HOT), waren der damaligen Rechnertechnologie entsprechend Black-Box-Verfahren mit Stapelverarbeitung ohne direkte Eingriffsmöglichkeiten durch den Planer. Neuere Versionen versuchen Optimierungsverfahren und rechnergestützte Dialogverfahren zu verknüpfen (vgl. LEUTZBACH et al., 1987). Eine Einsparung wird vor allem durch Umsetzen der Fahrzeuge zwischen den einzelnen Linien erreicht.

Bei der Einsatzplanung für den ÖPNV im ländlichen Raum müssen folgende Besonderheiten innerhalb des Entwurfsprozesses berücksichtigt werden:

- Wegen der großen Fahrzeugfolgezeiten wird der Fahrzeug- und Fahrereinsatz sehr stark von der Linienlänge und von zeitlichen Verknüpfungen zwischen den Linien beeinflusst. Im Interesse der Kostenminimierung kommt deshalb der Rückkopplung beim Entwurf von Linienplan, Fahrplan und Einsatzplan erhebliche Bedeutung zu.
- Bei der Einsatzplanung kann vereinfachend angenommen werden, daß die Fahrer und Fahrzeuge nur auf einer Linie bzw. einer eng begrenzten Gruppe von Linien eingesetzt werden. Das Umsetzen der Fahrzeuge bringt bei einem getakteten und zeitlich verknüpften Angebot mit großen Fahrzeugfolgezeiten kaum Vorteile. Es ist bei unterschiedlichen Betreibern auch aufgrund von Linienkonzessionen nicht durchführbar.
- Im Entwurfsprozeß dient die Einsatzplanung vor allem zur Abschätzung der Kosten eines ÖPNV-Angebotes. Ziel der Einsatzplanung innerhalb des Entwurfsprozesses ist es daher, die Eingangsgrößen für eine Kostenberechnung zu ermitteln. Dazu werden der Fahrzeugbedarf, die Fahrzeugkilometer und die Personalstunden (Einsetzzeiten, Lenkzeiten, bezahlte und unbezahlte Pausenzeiten) der erforderlichen Fahrer bestimmt und nicht tatsächlich vorhandene Fahrzeuge und Fahrer disponiert. Aus diesem Grunde genügt es für eine Kostenabschätzung nur einen Tag zu betrachten, d.h. es müssen keine Dienstreihenfolgen gebildet werden.

### 1.3.4 Beurteilung der Verfahren

Bei den oben genannten Verfahren zur Liniennetzplanung, zur Fahrplanbildung und zur Einsatzplanung wird davon ausgegangen, daß Linienplan, Fahrplan und Einsatzplan unabhängig voneinander entwickelt werden können. Die Einbindung in einen rückgekoppelten Entwurfsprozeß (**Abbildung 1.3**) ist nicht möglich bzw. mit großem Aufwand verbunden. Rückkopplungen sind immer nur innerhalb der jeweiligen Aufgabe möglich. Zwischen der Liniennetz- und Fahrplanbildung einerseits und der Einsatzplanung andererseits klafft eine Lücke, die oft schon dadurch deutlich wird, daß die Pläne von unterschiedlichen Instanzen erarbeitet werden.

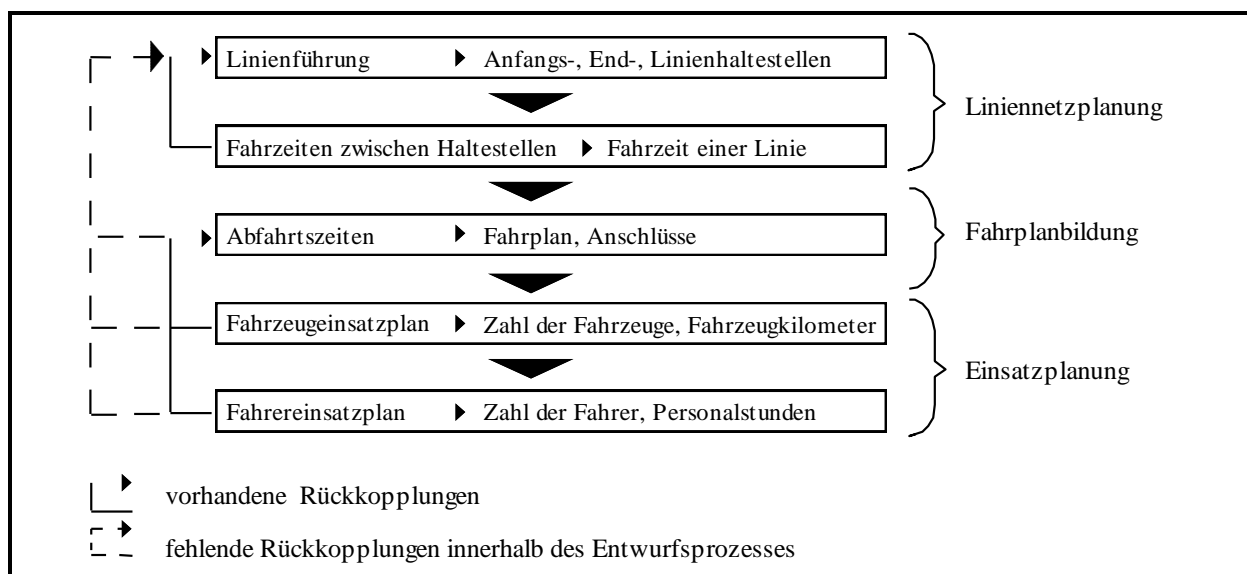


Abb. 1.3: Arbeitsschritte zur Entwicklung eines ÖPNV-Angebotes

Die Trennung des Entwurfs in die Sektoren Verkehrsplanung und Betriebsplanung führt bei den vorhandenen Entwurfsverfahren dazu, daß die allgemeinen Ziele einer ÖPNV-Angebotsplanung,

- die Maximierung der Angebotsqualität und
- die Minimierung des betrieblichen Aufwandes,

nicht zugleich berücksichtigt werden können. Dem Ausgleich zwischen diesen konkurrierenden Zielen kommt jedoch besonders beim Angebotsentwurf für den ländlichen Raum große Bedeutung zu. Eine Liniennetzplanung, die vorrangig die Interessen der Benutzer optimiert und betriebliche Kenngrößen nur abschätzt, läßt außer acht, daß bereits der Einsatz eines zusätzlichen Fahrzeuges in kleinen Netzen signifikante Kostenänderungen bewirken kann. Werden beim Netzentwurf und beim Fahrplanentwurf dagegen nur betriebliche Aspekte berücksichtigt, bestimmen Umlaufzeit und notwendige Fahrerpausen die Fahrplangestaltung. Es ergibt sich ein nicht getaktetes, unübersichtliches Angebot, wie es heute im ländlichen Raum die Regel ist. Ziel einer Angebotsplanung im ländlichen Raum muß es daher sein, die Betriebsmittel Fahrzeug und Fahrer sparsam einzusetzen und den Benutzern dennoch ein getaktetes ÖPNV-Angebot bereitzustellen. Das bedeutet, daß Linienplan, Fahrplan und Einsatzplan gemeinsam und in enger gegenseitiger Abstimmung entwickelt werden müssen.

## 1.4 Vorhandene Wirkungsmodelle

Um die Wirkungen eines vorhandenen oder eines geplanten ÖPNV-Angebotes zu ermitteln und einer Bewertung zugänglich zu machen, werden i.d.R. die Wirkungsbereiche Benutzer, Betreiber und Allgemeinheit unterschieden (vgl. STUDIENGESELLSCHAFT NAHVERKEHR, 1974). Der Wirkungsbereich *Benutzer* umfaßt die Kriterien, die den unmittelbar betroffenen Personenkreis der Fahrgäste berühren. Der Wirkungsbereich *Betreiber* enthält den betrieblichen Aufwand, der von den betroffenen Verkehrsbetrieben erbracht werden muß und der von der zuständigen politischen Instanz in Form des Kostendeckungsfehlbetrages verantwortet werden muß. Der Wirkungsbereich *Allgemeinheit* beinhaltet alle übrigen Wirkungen auf andere Systeme. Sie werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

### 1.4.1 Kenngrößen der Benutzer

Wichtige Kenngrößen einer Ortsveränderung in einem Verkehrsnetz sind die Kenngrößen Reisezeit und Weglänge. Bei Ortsveränderungen mit dem ÖPNV kommen weitere Kenngrößen wie z.B. Fußweglänge, Umsteigehäufigkeit und Umsteigewartezeit hinzu. Um die Kenngrößen zu ermitteln, muß der Verlauf der Ortsveränderung nachgebildet werden. Ein ÖPNV-Benutzer wählt für eine Ortsveränderung neben der Route auch einen Abfahrtszeitpunkt aus dem Fahrplan aus, d.h. er sucht eine Verbindung. Während eine Route nur den Weg innerhalb eines Netzes beschreibt, umfaßt eine Verbindung zusätzliche Informationen über den zeitlichen Verlauf einer Ortsveränderung, d.h. über die Abfahrts- bzw. Ankunftszeiten an der Einstiegshaltestelle, an den Umsteigehaltestellen und an der Ausstiegshaltestelle.

Kern vorhandener Verfahren zur Nachbildung von Ortsveränderungen ist ein Routensuchverfahren, an das sich ein Routenwahl- bzw. Routensplitverfahren (Umlegung) anschließt, um die Personenfahrten einer Quelle-Ziel-Beziehung auf eine oder mehrere gefundene Routen zu

verteilen. Bisherige Routensuchverfahren für den ÖPNV stützen sich auf Algorithmen, die für den IV entwickelt und die an die besonderen Eigenschaften des ÖPNV angepaßt wurden. Aus der oben erläuterten Unterscheidung von Routen und Verbindungen ergibt sich allerdings, daß der Begriff der *Routensuche* für den ÖPNV nicht genügt. Daher wird für diese Arbeit der Begriff *Routensuche*, der aus der Straßenplanung stammt, durch den Begriff *Verbindungssuche* ersetzt. Das gleiche gilt analog für die Begriffe Routenwahl/Verbindungswahl bzw. Routensplit/Verbindungssplit. Von den in **Tabelle 1.2** zusammengestellten Routensuchverfahren für den ÖPNV werden hier die Ansätze von DIAL (1967), SONNTAG (1977, 1981) und SPIESS/FLORIAN (1989) besprochen und auf ihre Anwendbarkeit für den ländlichen Raum beurteilt.

	Verfahren	Einsatzbereich	Umsteigewartezeit
Dial (1967)	Mehrwegverfahren	getaktete städtische Netze	½ Takt
Rapp et al. (1976)	Mehrwegverfahren	getaktete städtische Netze	Kante im Netzmodell, Widerstand abhängig von Fahrzeugfolgezeit
Hüttmann (1979)	Capacity Restraint	Nahverkehrsnetze	-
Sonntag (1977, 1981)	Alternativroutenverfahren	Netze mit gleichem Takt für alle Linien	½ Takt oder Kante im Netzmodell
Krug (1987)	Bestwegverfahren	getaktete städtische Netze	½ Takt
Spiess, Florian (1989)	lineare Programmierung	städtische Netze	½ mittlere Fahrzeugfolgezeit aller Linien

Tab. 1.2: Routensuchverfahren für den ÖPNV

Aufbauend auf dem Bestwegalgorithmus von MOORE (1959) hat DIAL (1967) einen Mehrwegalgorithmus für ÖPNV-Netze entwickelt, bei dem unterstellt wird, daß die Umsteigewartezeit der halben Fahrzeugfolgezeit der anschließenden Linie entspricht. Durch diese Einschränkung eignet sich der Algorithmus nur für städtische Netze, bei denen die Fahrplankoordinierung aufgrund der dichten Fahrzeugfolgezeiten nicht berücksichtigt werden muß.

SONNTAG (1977, 1981) weist darauf hin, daß sich die Umlegungsmodelle überwiegend am Individualverkehr orientieren und sich nicht ohne weiteres auf die Bedingungen des ÖPNV übertragen lassen. So können in ÖPNV-Netzen Kanten mehrfach bedient werden, und es müssen bei der Wegewahl alle Umsteigemöglichkeiten beachtet werden. Er erkennt, daß Bestwegverfahren und Sukzessivansätze (Capacity restraint, Schätzfehlermethode) für ÖPNV-Netze ungeeignet sind. SONNTAG schlägt statt dessen ein Alternativroutenverfahren vor, das für die Belange des ÖPNV erweitert wird. Die Erweiterungen umfassen die Probleme des Umsteigependelns zwischen parallelen Linien, die Schleifenfreiheit des Weges und der Auswahl relevanter Alternativrouten. Grundgedanke des Verfahrens ist es, allein diejenigen Routen als Alternativen zum kürzesten Weg zuzulassen, die sich ständig von der Quelle entfernen (vgl. Dial). Die eigentliche Umlegung der Fahrten einer Quelle-Ziel-Beziehung auf die alternativen Routen erfolgt in Analogie zum Kirchhoff'schen Gesetz. Das Routensuchverfahren berücksichtigt Umsteigevorgänge durch die Einführung zusätzlicher Knoten (Bahnsteig) und Kanten (Umsteigewartezeit). Das Routensuchverfahren eignet sich somit für Netze, bei denen alle Linien



im gleichen Takt verkehren, da hier der zeitliche Versatz zweier Linien stets gleich bleibt. Die Koordinierung des Fahrplanes kann berücksichtigt werden, allerdings muß die Umsteigewartezeit für jede Linienkombination manuell als zusätzliche Kante in das Netzmodell eingefügt werden. Für die Modellierung einer Umsteigehaltestelle müssen dabei bereits bei zwei Linien acht Umsteigebeziehungen in das Netzmodell eingebaut werden. Deshalb wird der Planer, von wichtigen Haltestellen abgesehen, aus Gründen der Handhabbarkeit für die mittlere Umsteigewartezeit die halbe Fahrzeugfolgezeit annehmen.

SPIESS/FLORIAN (1989) haben ein Umlegungsverfahren entwickelt, das auf der Annahme basiert, daß die Fahrgäste nicht nur eine Route, sondern einer Menge von Routen kennen. Die Fahrgäste gehen ohne Fahrplankenntnis zu einer Haltestelle und lassen das nächste ankommende Fahrzeug über die Wahl der Route entscheiden. Kriterium für die Aufteilung der Fahrgäste auf die einzelnen Linien an einer Einstiegshaltestelle oder einer Umsteigehaltestelle ist das Verhältnis der mittleren Bedienungshäufigkeit einer Linie zur mittleren Bedienungshäufigkeit aller Linien. Die mittlere Wartezeit ergibt sich aus der halben Fahrzeugfolgezeit. Diese Annahme gilt nur im städtischen ÖPNV mit kurzen Fahrzeugfolgezeiten. Im ländlichen Raum muß ein Fahrgast neben der Route, d.h. einer Folge von Linien, die ihn zu seinem Ziel bringt, die Abfahrtszeiten an der Einstiegshaltestelle und an allen Umsteigehaltestellen kennen.

Die innerhalb einer ÖPNV-Angebotsplanung verwendeten Routensuchverfahren, Bestwegverfahren und Mehrwegverfahren, modellieren eine ÖPNV-Linie nur in ihrem räumlichen Verlauf. Die zeitlichen Komponenten einer Linie reduzieren sich auf die Fahrzeiten zwischen den Haltestellen und auf die Angabe eines Taktes. Unregelmäßige Abfahrtszeiten können nicht berücksichtigt werden. Die Verfahren ermitteln daher nur Routen und keine Verbindungen. Die Kenngröße Umsteigewartezeit kann nicht berechnet werden, sondern beeinflußt den Routensuchprozeß als eine fixe Eingangsgröße. Gleiches gilt für die Kenngröße Bedienungshäufigkeit, die ebenfalls durch die Taktvorgabe von vornherein feststeht. Für die Bedienungshäufigkeit einer Verbindung zwischen zwei Haltestellen, die einen Umsteigevorgang erfordern, wird unterstellt, daß an der Umsteigehaltestelle stets Anschlüsse bestehen. Diese Annahme ist nur gewährleistet, wenn alle Linien des Netzes mit gleicher und kurzer Fahrzeugfolgezeit verkehren. Ein ÖPNV-Angebot, das diese Eigenschaften hat, ist nur in städtischen Bereichen vorhanden. Im ländlichen Raum weist das heutige ÖPNV-Angebot dagegen nicht getaktete, unregelmäßige Abfahrtszeiten auf. Auch nach Einführung eines Taktes im Rahmen einer Angebotsverbesserung können unregelmäßige Verstärkerfahrten (Schülerverkehr, Expresbusse) oder ein nicht getaktetes Bahnangebot vorhanden sein. Außerdem werden die Fahrzeugfolgezeiten stets so groß sein, daß eine Koordinierung der Anschlüsse bei der Verbindungssuche berücksichtigt werden muß. Die Umsteigewartezeit mit der halben Fahrzeugfolgezeit gleichzusetzen, stellt daher eine unzulässige Vereinfachung dar.

Verfahren zur Verbindungssuche, die den genauen Fahrplan berücksichtigen, kommen derzeit nur bei Fahrplaninformationssystemen zum Einsatz. Die für Fahrplaninformationssystem verwendeten Suchalgorithmen werden in der Literatur allerdings nicht oder nur oberflächlich (FAUST, 1993) beschrieben, da sie von den Herstellern der Systeme als betrieblich wichtiges, firmeninternes Know-how eingestuft werden.

### 1.4.2 Kenngrößen der Betreiber

Betriebliche Kenngrößen beschreiben den betrieblichen und finanziellen Aufwand zur Realisierung eines ÖPNV-Angebotes. Für die Ermittlung der Fahrzeugkilometer genügt die Kenntnis von Linienplan und Fahrplan. Um die genaue Zahl der erforderlichen Fahrzeuge, Fahrer und Personalstunden zu bestimmen, müssen in den Arbeitsschritten

- Fahrzeugeinsatzplanung und
- Fahrereinsatzplanung

zusätzlich Fahrzeugumlaufpläne bzw. Dienstpläne erstellt werden. Die Ergebnisse der Einsatzplanung bilden dann die Grundlage für die Kostenermittlung.

Bei den bekannten Verfahren der Angebotsplanung wird auf eine explizite Einsatzplanung verzichtet und die betrieblichen Wirkungen mit Hilfe von Schätzverfahren bestimmt:

- SONNTAG (1977) reduziert die betrieblichen Wirkungen auf die Ermittlung der Gesamtlänge der Linien unter der Annahme einer durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit und eines Fahrplantaktes. Standzeiten am Linienende bis zur nächsten getakteten Planabfahrt werden vernachlässigt.
- KRUG (1987) ermittelt u.a. den Fahrzeugbedarf, die Investitionskosten und die Betriebskosten. Bei der Ermittlung des Fahrzeugbedarfs ist allerdings nicht erkennbar, ob für eine Linie mit ganzzahligen Fahrzeugwerten (= ohne Umsetzen auf andere Linien) oder mit reellen Zahlen (= mit Umsetzen) gerechnet wird. Die Betriebskosten umfassen u.a. Wartungs-, Kraftstoff- und Personalkosten. Die Fahrzeugbeschaffungskosten werden als Investitionskosten aufgefaßt, wobei die maximale Laufleistung bzw. das Lebensalter der Fahrzeuge nicht berücksichtigt wird. Das vorgeschlagene Schätzverfahren vereinfacht die Wirkungsberechnung durch den Verzicht auf die explizite Einsatzplanung. Dabei geht allerdings durch die Einführung zahlreicher Umrechnungs- und Kostenfaktoren, für die keine Kennwerte angegeben werden, die Übersichtlichkeit und die Nachvollziehbarkeit verloren.
- Nach MOTT und SPARMANN (1983) verwendet das Programmsystem "Internetz" für die betreiberbezogenen Kriterien ein von THEIS (1981) vorgeschlagenes Berechnungsverfahren. Dabei werden die Kenngrößen Fahrzeugbedarf, Fahrzeugkilometer und Personalbedarf aus der Verkehrsleistung (Personenkilometer), der Platzausnutzung und der Laufleistung je Bus abgeleitet. Die Verkehrsleistung ist das Ergebnis einer Umlegung. Für die Platzausnutzung und die Laufleistung wird auf Durchschnittswerte von Betrieben des Verbandes öffentlicher Verkehrsunternehmen (VÖV) verwiesen.

Alle vorgestellten Schätzverfahren beruhen entweder auf der Anwendung von Durchschnittswerten oder ermitteln den Fahrzeugbedarf mit der Formel  $\text{Zahl der Fahrzeuge} = \text{Umlaufzeit/Takt}$ . Diese Verfahren eignen sich, wie THEIS (1981) anmerkt, nur für die Anwendung in größeren, homogenen Netzen, d.h. für städtische ÖPNV-Netze. Für die Bewertung kleiner Netze oder einzelner Linien sind sie ungeeignet, da dort örtliche Besonderheiten ins Gewicht fallen. Die Anwendung von Schätzverfahren ist im ländlichen Raum aus folgenden Gründen nicht ausreichend:

- Bei den relativ kleinen Fahrzeugflotten, die für den ÖPNV-Betrieb eines Landkreises ausreichen, verursacht bereits ein zusätzliches Fahrzeug signifikante Kostenerhöhungen.

- Die Annahme, daß ein Fahrer bzw. ein Fahrzeug auf allen geplanten Linien eingesetzt werden darf, kann für ländliche Räume nicht als selbstverständlich unterstellt werden. Die Linien werden u.U. von verschiedenen Verkehrsunternehmen betrieben, und die Zahl der Haltestellen, an denen sinnvoll umgesetzt werden kann, ist begrenzt. So kann bei einem radial auf die Kreisstadt ausgerichteten Liniennetz nur in der Kreisstadt umgesetzt werden, da die Entfernungen zwischen den außen liegenden Endhaltestellen ein wirtschaftliches Umsetzen nicht zulassen. Umsetzungsvorgänge und ihre betrieblichen Wirkungen müssen daher im Rahmen der Einsatzplanung explizit berücksichtigt werden und können nicht mit Hilfe von Korrekturfaktoren abgeschätzt werden.
- Die Einführung eines Taktbetriebes kann bei großen Fahrzeugfolgezeiten zu langen taktbedingten Verlustzeiten an der Wendehaltestelle führen. Nur mit einer differenzierten Einsatzplanung läßt sich nachweisen, welche zusätzlichen Kosten ein Taktbetrieb verursacht und inwieweit die Verlustzeiten, z.B. für Fahrerpausen, genutzt werden können.
- Die ausgeprägten Verkehrsspitzen im Schüler- und Berufsverkehr erfordern u.U. zusätzlich zu einer Taktverdichtung in der Hauptverkehrszeit den Einsatz spezieller Verstärkerfahrten. Diese Verstärkerfahrten sind notwendig, um ausreichende Platzkapazitäten bereitzustellen und müssen oft besonderen zeitlichen Randbedingungen, wie Schulzeiten, angepaßt werden. Verstärkerfahrten, die sich nicht in ein getaktetes Umlaufschema einfügen lassen, verursachen bei einem insgesamt relativ geringen täglichen Fahrtenangebot erhebliche zusätzliche Kosten, die nur durch eine Einsatzplanung nachgewiesen werden können.

Für eine genaue Untersuchung und immer dann, wenn ein Taktverkehr oder der Einsatz kleiner Fahrzeuge geplant ist, muß eine explizite Fahrer- und Fahrzeugeinsatzplanung durchgeführt werden. Dabei müssen arbeitsrechtliche und tarifliche Regelungen (Aufrüstzeiten, bezahlte und unbezahlte Pausen) ebenso berücksichtigt werden wie Standzeiten und Ein-, Aus- bzw. Umsetzfahrten.

## **1.5 Zielsetzung und Vorgehensweise**

Aus der Kritik der vorhandenen Verfahren ergibt sich die Aufgabenstellung für diese Arbeit. Ziel ist die Entwicklung eines Entwurfsverfahrens, das die besonderen Eigenschaften des ÖPNV-Angebotes im ländlichen Raum berücksichtigt. Dies sind hauptsächlich

- große Fahrzeugfolgezeiten,
- nicht getaktete, unregelmäßige Abfahrtszeiten und
- der Einsatz bedarfsgesteuerter Betriebsweisen.

Dafür ist ein Entwurfsverfahren notwendig, das

- bei der Ermittlung benutzerbezogener Kenngrößen nicht nur Routen, sondern Verbindungen analysiert,
- den exakten Fahrplan der Linien einschließlich der eingesetzten Fahrzeuge und Fahrer berücksichtigt,
- bei der Ermittlung betrieblicher Kenngrößen keine Schätzverfahren verwendet, sondern auf Fahrzeug- und Fahrereinsatzplänen aufbaut,

- die Liniennetzplanung, die Fahrplanbildung und die Einsatzplanung miteinander rückkoppelt.

Um dieses Ziel zu erreichen, muß ein *Netzmodell* erstellt werden, das die gesamte räumliche, zeitliche und betriebliche Struktur des ÖPNV-Verkehrsangebotes umfaßt. Das erfordert, daß neben den Knoten und Kanten des Verkehrswegenetzes zusätzlich alle Fahrten der Linien mit ihren Abfahrts- und Ankunftszeiten abgebildet werden. Die Angabe eines Fahrers und eines Fahrzeugs für jede Fahrt einer Linie macht die Fahrt außerdem zum Träger betrieblicher Informationen. Um bedarfsgesteuerte Buslinien in das Netzmodell integrieren zu können, wird ein Bemessungsverfahren formuliert, das von den Häufigkeitsverteilungen der stochastischen Kenngrößen bedarfsgesteuerter Buslinien ausgeht.

Dieses detaillierte Netzmodell bildet die Grundlage für die Ermittlung der Wirkungen eines ÖPNV-Angebotes. Zur Ermittlung der benutzerbezogenen Wirkungen wird ein *Benutzermodell* entwickelt, das das Verbindungswahlverhalten der Fahrgäste nachbildet. Der betriebliche und der finanzielle Aufwand eines ÖPNV-Angebotes wird mit einem *Betreibermodell* ermittelt.

Kapitel 2 definiert die *Entwurfsaufgabe* als eine Optimierungsaufgabe, bei der die verschiedenen Elemente des Angebotes – Betriebsformen, Fahrzeugtypen und Betreiberstrukturen – so miteinander verknüpft werden müssen, daß eine politisch vorgegebene Angebotsqualität mit möglichst geringen Kosten realisiert wird. Dazu werden wichtige Zielkriterien der Angebotsplanung diskutiert, ortsspezifische Randbedingungen (Siedlungsstruktur, Verkehrsnachfrage, Kostendaten) einbezogen und ein Systemkonzept für den ÖPNV im ländlichen Raum entwickelt, das die komplexen Zusammenhänge zwischen Angebotsqualität und Kosten berücksichtigt.

Kapitel 3 beschreibt den *Ablauf des Entwurfsprozesses*, der sich am "Leitfaden für Verkehrsplanungen" der FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN E.V. (FGSV, 1985) orientiert.

In Kapitel 4 werden die *Bestandteile eines Rechenmodells* vorgestellt. Das Modell besteht aus den einzelnen Objekten eines ÖPNV-Angebotes (Fahrgäste, Verkehrszellen, Haltestellen, Linien, Fahrten der Linien, Fahrer, Fahrzeuge usw.) und beschreibt die Beziehungen und Wirkungen, die zwischen diesen Objekten bestehen. Das Modell gliedert sich in die Teilmodelle Netzmodell, Benutzermodell, Betreibermodell und Modell zur Fahrereinsatzplanung.

Das abschließende Kapitel 5 stellt ein *Anwendungsbeispiel* vor. Dabei wird gezeigt, wie ein Systemkonzept mit Hilfe des Entwurfsverfahrens in ein konkretes ÖPNV-Angebot für einen Landkreis umgesetzt werden kann.

Um in dieser Arbeit bei dem Begriff *Fahrt* eindeutig zwischen der Fahrt eines Fahrgastes und der Fahrt eines Fahrzeuges unterscheiden zu können, wird die Fahrt eines Fahrgastes Ortsveränderung bzw. Personenfahrt genannt. Die im Fahrplan aufgeführte Fahrt eines Fahrzeuges von der Anfangshaltestelle zur Endhaltestelle einer Linie wird als Linienfahrt bzw. Fahrt einer Linie bezeichnet.

## 2 Die Entwurfsaufgabe

### 2.1 Struktur der Entwurfsaufgabe

Beim Entwurf eines ÖPNV-Angebotes werden die Elemente des ÖPNV-Angebotes unter Anwendung eines Systemkonzeptes und unter Beachtung ortsspezifischer Randbedingungen so zu einem ÖPNV-Angebot verknüpft, daß sich im Hinblick auf das Zielkonzept eine möglichst optimale Lösung ergibt (**Abbildung 2.1**).

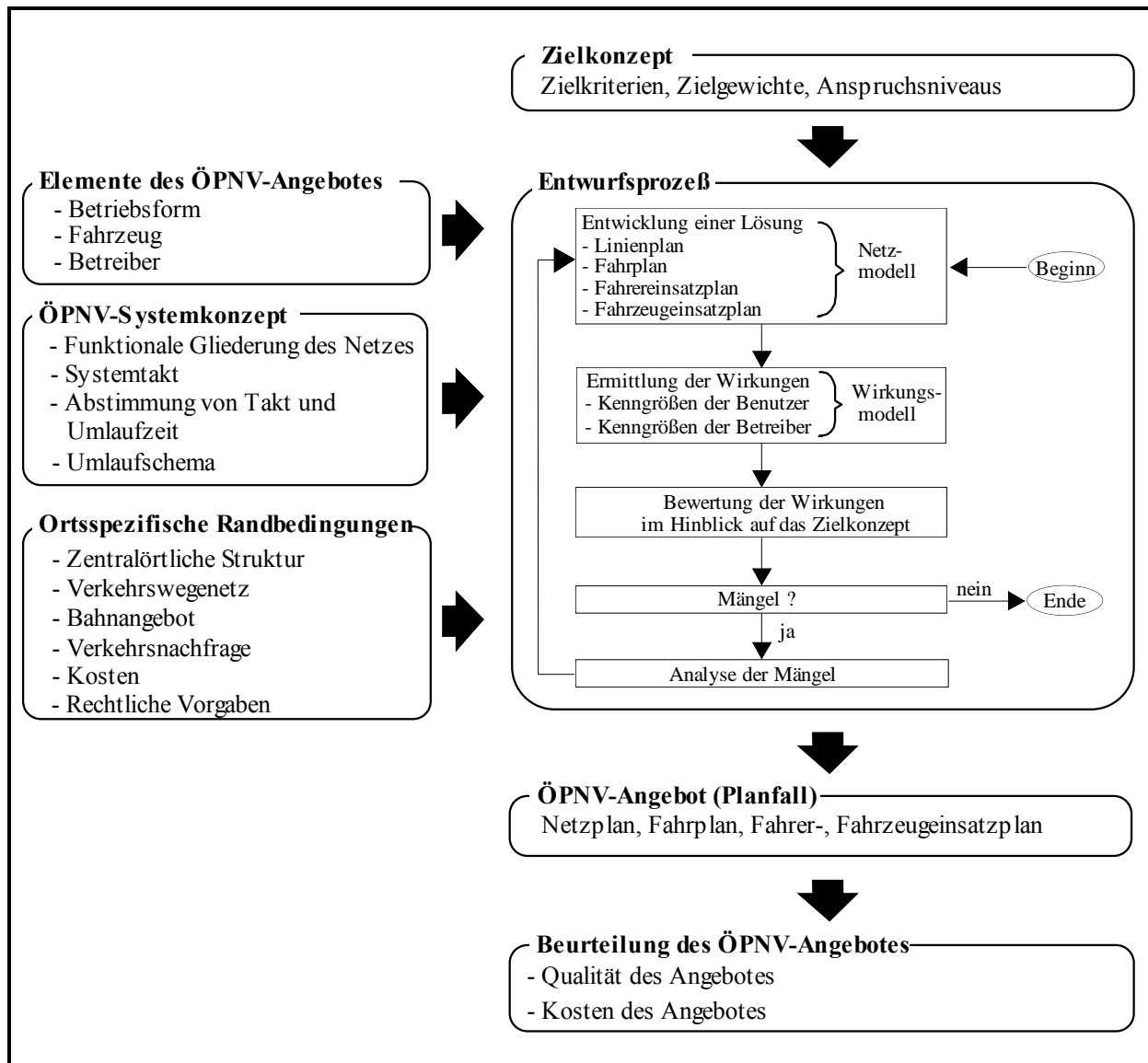


Abb. 2.1: Verknüpfung der Elemente des ÖPNV-Angebotes zu einem ÖPNV-Angebot

In diesem Kapitel werden die Elemente eines ÖPNV-Angebotes, die Bestandteile eines Systemkonzeptes, die wesentlichen Zielkriterien und wichtige ortsspezifische Randbedingungen erläutert.

## 2.2 Elemente eines ÖPNV-Angebotes

### 2.2.1 Betriebsformen

In Erweiterung des Linienbetriebs existieren im ÖPNV nach KIRCHHOFF (1987) die vier in **Abbildung 2.2** dargestellten Betriebsformen

- Linienbetrieb,
- Richtungsbandbetrieb,
- Flächenbetrieb und
- Tourenbetrieb.

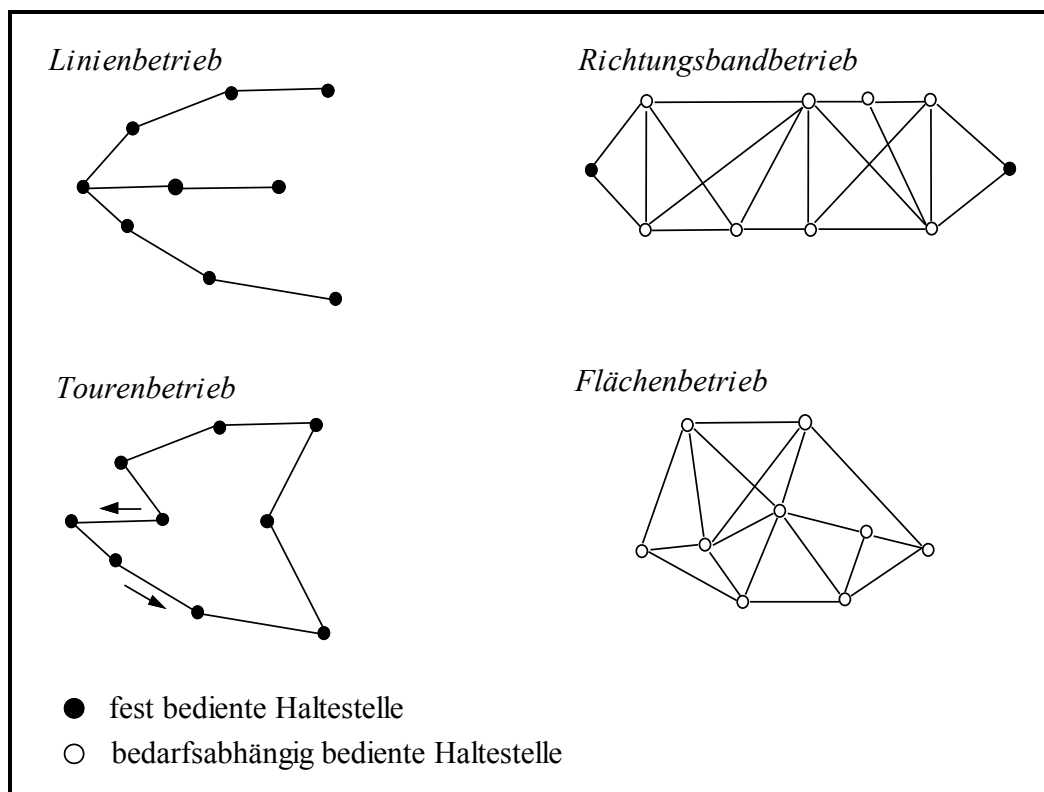
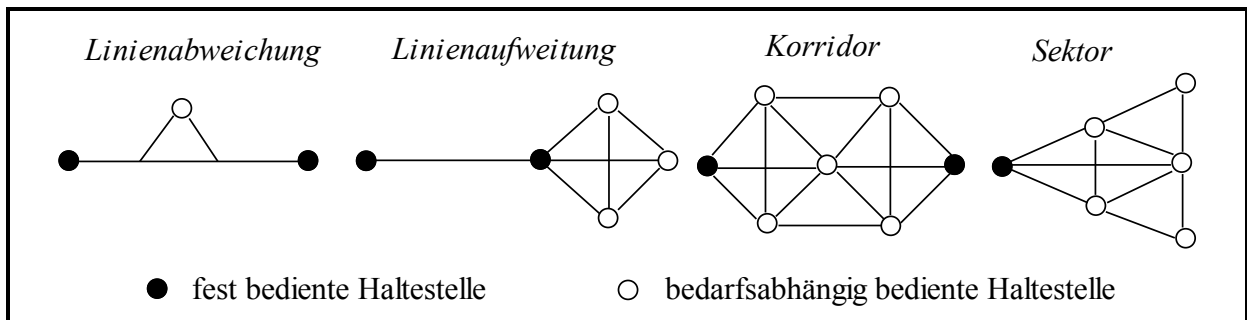


Abb. 2.2: Betriebsformen nach KIRCHHOFF (1987)

Für eine gebündelte Verkehrsnachfrage, wie sie entlang von Verkehrsachsen zwischen zentralen Orten auftritt, eignet sich der herkömmliche *Linienbetrieb*. Die Bedienung der Haltestellen erfolgt zu festen, im Fahrplan dokumentierten Abfahrtszeiten. Durch eine möglichst gestreckte Linienführung kann eine Minimierung der Fahrzeit erreicht werden.

In Räumen und Zeiten geringer Verkehrsnachfrage können die Haltestellen eines Korridors bzw. Sektors zu einer Bedienungseinheit zusammengefaßt und im *Richtungsbandbetrieb* bedient werden. Das Richtungsband besteht aus fest bedienten Haltestellen in größeren Orten und aus Bedarfshaltestellen in kleineren Ortschaften, die nur bei entsprechender Nachfrage angefahren werden. Fahrgäste, die an einer Bedarfshaltestelle zusteigen wollen, müssen den Fahrtwunsch anmelden. Die Fahrzeuge des Richtungsbandes verkehren wie beim Linienbetrieb nach einem vorgegeben Fahrplan, d.h. für jede Haltestelle sind die Abfahrtszeiten in einen Fahrplan festgelegt. Infolge des nachfrageabhängigen Routenverlaufs schwanken die Abfahrtszeiten

allerdings innerhalb bestimmter Bandbreiten. Für den Richtungsbandbetrieb gibt es die in der **Abbildung 2.3** dargestellten unterschiedlichen Ausprägungen.



**Abb. 2.3:** Ausprägungen des Richtungsbandbetriebes

Wenn die Verkehrsnachfrage gering ist und keine oder nur eine schwach ausgeprägte räumliche Struktur aufweist, kann die Bedienung im *Flächenbetrieb* erfolgen. Dabei bilden flächig über das Einsatzgebiet verteilte Haltestellen eine Bedienungseinheit. Eine feste Bedienungsreihenfolge wie beim Richtungsbandbetrieb gibt es nicht. Die Reihenfolge ist zufällig und richtet sich nach der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Fahrtwünsche. Da die Verkehrsnachfrage fast immer auf einen zentralen Ort, einen Schulstandort oder einen Bahnhof gerichtet ist, kommt der Einsatz eines Flächenbetriebs nur in Ausnahmefällen in Frage.

Eine Sonderform stellt der *Tourenbetrieb* dar, der sich aus dem Güterverkehr ableitet und für den Schülerverkehr eingesetzt werden kann. Die flächig verteilten Haltestellen werden wie beim Linienbetrieb in einer festliegenden Reihenfolge bedient. Die Reihenfolge der fest bedienten Haltestelle wird so gewählt, daß sich eine minimale Routenlänge ergibt. Die für den Tourenbetrieb charakteristischen Umwegfahrten werden Schülern im nicht integrierten Schülerverkehr zugemutet, um den gesetzlichen Beförderungsanspruch mit minimalen Kosten zu realisieren. Für ein öffentliches Verkehrsangebot eignet sich der Tourenbetrieb dagegen nicht.

### 2.2.2 Fahrzeuge

Bei der Entscheidung für einen Fahrzeugtyp kann aus einem breiten Spektrum von Fahrzeugen ausgewählt werden. Um einen wirtschaftlichen Fahrzeugeinsatz zu gewährleisten, müssen bei der Auswahl eines Fahrzeugtyps die erwartete Verkehrsnachfrage und die geplante Laufleistung einer Linie berücksichtigt werden. Daneben bestimmen die Zuverlässigkeit des Fahrzeuges und die Eignung des Fahrzeugs für das vorhandene Straßennetz im Einsatzgebiet die Entscheidung.

Die *Verkehrsnachfrage* im Linienverkehr zwischen den zentralen Orten erfordert zumindest im Berufs- und Schülerverkehr den Einsatz von Überland-Linienbussen mit einer hohen Platzkapazität. Hier stehen im allgemeinen leistungsfähige Straßen zur Verfügung, so daß große Fahrzeuge ohne Schwierigkeiten fahren können. Wegen der gebündelten Verkehrsnachfrage werden befriedigende Auslastungsgrade der Fahrzeuge erreicht. Kleinere Fahrzeuge mit einer reduzierten Platzkapazität können in Gebieten mit geringer Verkehrsnachfrage ohne ausgeprägten Stoßverkehr und in den Abendstunden bzw. am Wochenende sinnvoll eingesetzt werden. Im Gegensatz zu den großen Linienbussen eignen sie sich besser für enge und

kurvenreiche Straßen. Für die innergemeindliche Erschließung kommen vor allem Großraum-Pkw in Frage.

Bei der *Laufleistung* bzw. bei der Lebensdauer unterscheiden sich die Überland-Linienbusse und Midibusse deutlich von den Klein- und Minibussen. Während Klein- und Minibusse auf Transporter- oder LKW-Fahrgestellen aufgebaut werden, sind die robusteren Fahrgestelle der Standardlinienbusse für die Anforderungen des ÖPNV-Betriebes konzipiert. Dieser Unterschied macht sich bei den Anschaffungskosten und bei der Laufleistung bemerkbar. Die Standardlinienbusse kosten zwischen 350.000 DM und 450.000 DM, während Klein- und Minibusse bereits für 100.000 DM bis 200.000 DM erhältlich sind (NUTZFAHRZEUG-KATALOG 1993/94). Dafür erreichen die Standardlinienbusse in etwa die doppelte Laufleistung. Für den Betrieb bedeutet das, daß die billigeren Klein- und Minibusse bei gleicher jährlicher Laufleistung über einen kürzeren Zeitraum abgeschrieben werden müssen.

Bei den *laufleistungsabhängigen Ausgaben* sind durch den Einsatz kleinerer Fahrzeuge Einsparungen durch den günstigeren Kraftstoffverbrauch zu erzielen (BURMEISTER, 1993). Inwieweit Einsparungen bei den Wartungs- und Reparaturkosten möglich sind, ist nicht genau bekannt. NICKEL (1993) weist z.B. darauf hin, daß u.a. die Instandhaltungskosten die Achillesferse der kleinen Fahrzeuge sind.

Die Wahl des Fahrzeugtyps beeinflußt die Betriebskosten einer Linie. Verglichen mit den Personalkosten, auf die etwa 60 bis 70 % der Betriebskosten entfallen, stehen die Fahrzeugkosten in ihrer Bedeutung allerdings an zweiter Stelle. Trotzdem sollte beim Fahrzeugeinsatz sichergestellt sein, daß die Fahrzeuge optimal genutzt werden und während des Abschreibungszeitraumes ihre maximale Laufleistung erreichen.

### 2.2.3 Betreiberstruktur

Die Verkehrsunternehmen als Anbieter von ÖPNV-Leistungen werden innerhalb des Planungsprozesses als Betroffene einer ÖPNV-Angebotsplanung sowohl in der Phase der Problemanalyse als auch bei der Beurteilung einer möglichen Lösung einbezogen. Neben den Zielvorstellungen der Unternehmen sind bei der Angebotsplanung vor allem

- die Betriebserfahrungen mit dem heutigen Angebot,
- Konzessionen für einzelne Linien,
- betriebliche Vorgaben, wie z.B. die Lage von Betriebshöfen, und
- die Bereitschaft, einen Bedarfsbetrieb durchzuführen,

zu beachten. Diese Randbedingungen müssen im Entwurfsprozeß berücksichtigt werden.

Nach dem ab 1996 gültigen Personenbeförderungsgesetz (PBefG, §2, 1994) bleiben die Busunternehmer weiterhin Inhaber von Konzessionen. Allerdings sollen sie zukünftig im Auftrag der Landkreise fahren, die als Aufgabenträger des ÖPNV die finanzielle Verantwortung übernehmen (Bayerisches ÖPNV Gesetz, Artikel 8, 1993). Bei der Vergabe bzw. bei Verlängerungen von Konzessionen müssen die Vorgaben des Landkreises, die in einem sogenannten Nahverkehrsplan niedergelegt sind, beachtet werden (PBefG, §8, 1994). Für die Angebotsplanung bedeutet die Beibehaltung des Konzessionsrechts, daß die Linien einzeln oder



als Liniengruppen betreibbar sein müssen. Auf diese Weise können Linien jederzeit an verschiedene Unternehmer vergeben werden, ohne daß andere Linien von dieser Maßnahme betroffen sind.

Für Gebiete, in denen ein herkömmlicher Linienbetrieb wegen der geringen Verkehrsnachfrage nicht wirtschaftlich ist, können Taxiunternehmer mit der Durchführung des Betriebes beauftragt werden. Insbesondere für die innergemeindliche Erschließung ist der Einsatz von Großraum-Pkw und Pkw entweder im Linienverkehr oder als Sammeltaxis erwägenswert. In welchem Umfang dadurch eine wirtschaftlichere Bedienung möglich ist, muß im Einzelfall überprüft werden. Neben den geringeren Fahrzeugkosten können beim Sammeltaxi darüber hinaus Einsparungen bei den Personalkosten erwartet werden, wenn nur tatsächlich durchgeführte Fahrten bezahlt werden müssen und keine Vorhaltekosten wie beim normalen Rufbus entstehen. Die Voraussetzung dafür ist dann gegeben, wenn im Bereich des geplanten Sammeltaxis schon mehrere normale Taxis betrieben werden, so daß bei Bedarf ein Fahrzeug für das Sammeltaxi zu den normalen Taxikosten eingesetzt werden kann. Für Gemeinden im ländlichen Raum wird diese Voraussetzung allerdings i.d.R. nicht gegeben sein. Auch der in Holland entwickelte Bürgerbus mit ehrenamtlichen Fahrern kann bei geringer Verkehrsnachfrage sinnvollen Einsatz finden (SCHUSTER, 1992).

Bei der Vergabe von Linien und Richtungsbändern darf nicht nur der Preis entscheiden, sondern es müssen auch die Erfahrung des Betreibers und die zu erwartende Qualität der Betriebsabwicklung einbezogen werden.

## 2.3 Systemkonzept

Um ein attraktives ÖPNV-Angebot zu schaffen, genügt es nicht, ausgehend von der Schwachstellenanalyse des heutigen Angebotes, punktuelle Verbesserungen vorzunehmen. Vielmehr muß das ÖPNV-Angebot aus einem Konzept heraus entwickelt werden, das den Ansprüchen der Fahrgäste ebenso Rechnung trägt wie den organisatorischen und wirtschaftlichen Randbedingungen. Die wesentlichen Merkmale eines solchen neuen Systemkonzeptes sind

- eine an der zentralörtlichen Struktur orientierte funktionale Gliederung des Netzes und der Betriebsformen,
- die Einführung eines Systemtaktes,
- die Abstimmung von Takt, Linienlänge und Umlaufzeit,
- die Einführung eines Umlaufschemas.

### 2.3.1 Funktionale Gliederung des Netzes

Bei einem Busnetz für den ländlichen Raum werden je nach Funktionen der Verkehrsbedienung die drei in **Abbildung 2.4** dargestellten Teilnetze unterschieden (vgl. SCHUSTER, 1992):

- Im *Verkehrsnetz 1. Grades* werden zentrale Orte im Linienbetrieb miteinander verbunden. Regelbetriebsform ist der Linienbetrieb mit Überland-Linienbussen. Die Linien werden möglichst direkt geführt. Dabei kann es in Einzelfällen zu einer bedarfsabhängigen Linienab-

weichung kommen, um benachbarte Siedlungen mit einzubeziehen oder zu einer Linienaufweitung am Linienende, um flächige Strukturen unmittelbar zu erschließen.

- Das *Verkehrsnetz 2. Grades* erschließt Ortschaften im Umland zentraler Orte und übernimmt Zubringer- und Verteilungsfunktion zum Netz 1. Grades. Regelbetriebsform ist der Korridor-Richtungsbandbetrieb mit Midibussen oder Kleinbussen.
- Im *Verkehrsnetz 3. Grades* erfolgt die innergemeindliche Erschließung, bei der einzelne Gemeindeteile mit dem Hauptort verbunden werden. Regelbetriebsform ist der sektorale Richtungsbandbetrieb mit Minibussen oder Großraum-Pkw.

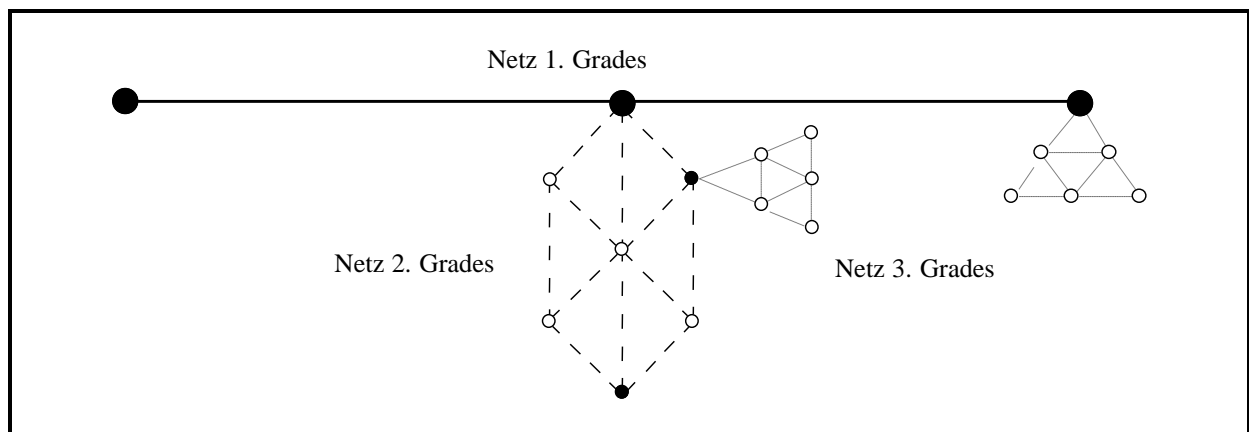


Abb. 2.4: Funktionale Gliederung des Netzes

Die genannte Zuordnung von Betriebsform und Netzfunktion stellt eine Regellösung dar, von der beim Angebotsentwurf zur Anpassung an Besonderheiten der Siedlungs- und Nachfragestruktur abgewichen werden kann. Insbesondere sind Überschneidungen mit der Betriebsform benachbarter Teilnetze zu beachten. Die verschiedenen Teilnetze müssen räumlich und zeitlich so miteinander verknüpft werden, daß zusammenhängende Fahrten über mehrere Teilnetze möglich sind. Wenn zentrale Orte an die Bahn oder die S-Bahn angebunden sind, bildet dieses Verkehrssystem ein übergeordnetes Verkehrsnetz, dessen Liniennetz und Fahrplan Vorgaben für die untergeordneten Netze darstellen.

Die funktionale Gliederung des Netzes erlaubt eine Differenzierung der Aufgaben- und Ausgabenverantwortung zwischen Landkreisen und Gemeinden. Die Netze 1. und 2. Grades fallen in die Zuständigkeit der Landkreise, für das Netz 3. Grades kann die Zuständigkeit an die jeweilige Gemeinde übertragen werden.

Für das ÖPNV-Angebot am Abend und an Wochenenden wird ein modifiziertes Netz verwendet. Dieses Netz erschließt einen Landkreis, ausgehend von der Kreisstadt, vorrangig mit sektoralen Richtungsbandern, die aus dem Verkehrsnetz 1. Grades abgeleitet werden. Die dabei entstehenden Umwege können zu diesen Zeiten in Kauf genommen werden.

### 2.3.2 Systemtakt

Aus Merkmalsgründen wird ein getakteter Fahrplan angestrebt. Diese Forderung ist auch in Richtlinien und Gesetzen (Bayerisches ÖPNV Gesetz, Artikel 4, 1993) enthalten. Mit der Wahl

eines Taktes wird der Bedienungsrhythmus des ÖPNV-Systems, im folgenden *Systemtakt* genannt, festgelegt. VUCHIC (1981) benutzt dafür den Begriff des "Pulsierens". Die Einführung eines getakteten Systems ermöglicht die Koordination von Anschlüssen an Umsteigehaltestellen. Bei jedem Pulsschlag treffen sich die Fahrzeuge mehrerer Linien an den Umsteigehaltestellen. Diese Rendezvous-Technik ermöglicht auch bei großen Fahrzeugfolgezeiten regelmäßige und kurze Umsteigevorgänge. Die Umsteigehaltestellen, sogenannte Zeitknoten, werden in Abhängigkeit von der räumlichen Geometrie des Netzes definiert. Ein Zeitknoten ist eine Umsteigehaltestelle, an der sich die Fahrzeuge der einzelnen Linien zeitlich koordiniert treffen und so Umsteigebeziehungen zwischen allen Fahrzeugen bzw. Linien ermöglichen. Wenn der Zeitknoten nicht gleichzeitig Endhaltestelle der Linie ist, d.h. wenn sich die Linien kreuzen, sind hier für die Fahrzeuge mindestens einer Linie Haltestellenaufenthaltszeiten einzuplanen (**Abbildung 2.5**). Die zeitlichen Vernetzungsmöglichkeiten sind aber auch bei einem getakteten System begrenzt. Insbesondere sollte versucht werden, die Linien nur an einem Zeitknoten auszurichten um überbestimmte Netze zu vermeiden.

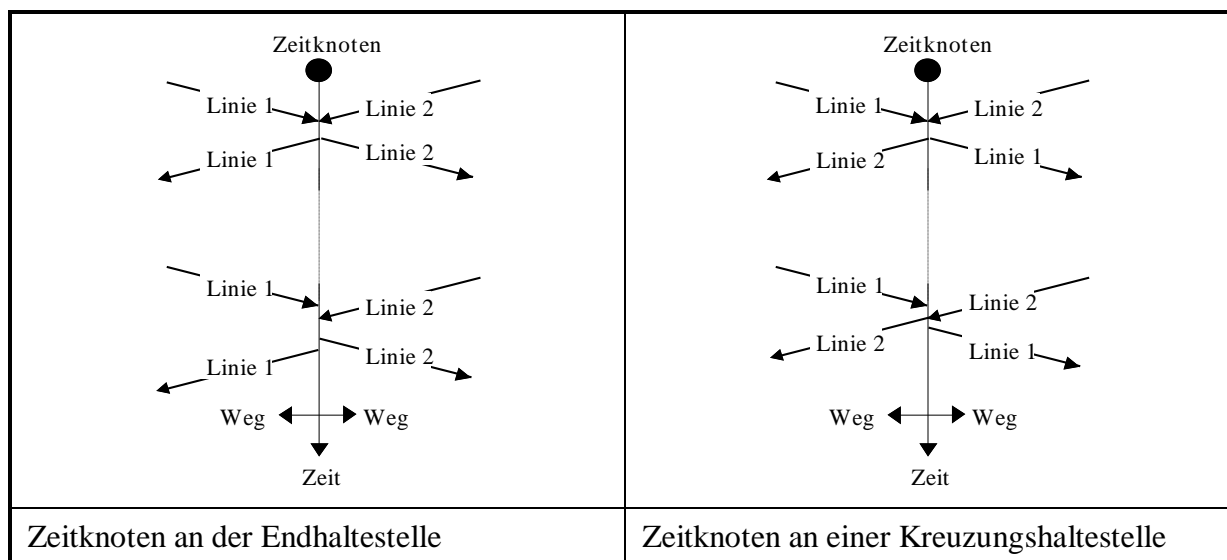


Abb. 2.5: Zeitknoten

Der Systemtakt, der mit dem Takt der Normalverkehrszeit übereinstimmt, ergibt sich aus dem vorgegebenen Fahrplan des übergeordneten Schienenverkehrs und aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Für einen Taktverkehr bieten sich zwei Grundraster an:

- Ein *Stundentakt*, der in der Hauptverkehrszeit auf einen 20- oder 30-Minutentakt verdichtet wird, ist leicht merkbar, führt aber im Vergleich mit dem heutigen Zustand oft zu deutlich höheren Betriebskosten.
- Ein *Zwei-Stundentakt* reduziert gegenüber dem Stundentakt die Betriebskosten. Er eignet sich für die Anbindung an einen 40-Minutentakt (z.B. S-Bahn) und einen 60-Minutentakt (z.B. Regionalzug). In der Hauptverkehrszeit kann das Angebot auf einen 20-, 40-, 60- oder 80-Minutentakt verdichtet werden.

Schülerverkehr, der in den öffentlichen Verkehr integriert werden soll und nach vorgegebenen Schulzeiten verkehrt, kann nur begrenzt in ein Taktschema einbezogen werden. Zusätzlich notwendige Fahrten lassen sich erst bei der genauen Fahrplanerstellung berücksichtigen.

Zusätzlich zum Angebot in der werktäglichen Haupt- und Normalverkehrszeit (Montag bis Freitag, bis ca. 19 Uhr) kann ein Abendverkehr und ein Wochenendverkehr angeboten werden. Dem ÖPNV-Angebot am Abend und am Wochenende wird der Systemtakt der werktäglichen Normalverkehrszeit zugrunde gelegt. Eine Taktverdichtung am Wochenende wird i.d.R. nicht erforderlich sein.

Die Einführung eines Taktes bietet den Fahrgästen ein regelmäßiges und einfach handhabbares ÖPNV-Angebot. Gleichzeitig wird die Planung von Linienverknüpfungen für Umsteigevorgänge erleichtert. Zusätzliche Standzeiten an den Anfangs- bzw. Wendehaltstellen einer Linie können aber den Wirkungsgrad der Linie reduzieren. Ziel der Planung muß es somit sein, diese Verlustzeiten zu minimieren.

### 2.3.3 Takt, Linienlänge und Umlaufzeit

Um einen Systemtakt wirtschaftlich realisieren zu können, wird bereits bei der Festlegung des Linienverlaufs darauf geachtet, daß die Umlaufzeit für eine Linie oder eine Liniengruppe mit dem Systemtakt oder einem Vielfachen des Systemtaktes übereinstimmt. Dadurch werden unrentable Standzeiten im Fahrbetrieb minimiert und der Fahrzeugeinsatz gering gehalten. Um die Umlaufzeit an den Takt anzupassen, kann der Zeitbedarf für die Fahrzeit und die Pausenzeit verändert werden.

Die *Fahrzeit* einer Linie wird durch die Linienlänge und durch die Fahrgeschwindigkeit bestimmt. Wenn die Fahrgeschwindigkeit einer Linie nicht durch absichtliches Langsamfahren oder durch Beschleunigungsmaßnahmen beeinflusst werden soll oder kann, dann bleibt zur Modifizierung der Fahrzeit nur die Linienlänge. **Abbildung 2.6** zeigt, wie bei einem 120-Minuten Systemtakt für ein Fahrzeug eine Umlaufzeit von 120 Minuten erreicht werden kann. Bei einem 40-Minutentakt im übergeordneten Schienennetz kann die Fahrzeit auf eine, zwei oder drei Linien unterschiedlicher Länge aufgeteilt werden. Ein Fahrzeug bedient im zweiten und dritten Fall nicht nur eine Linie, sondern eine Liniengruppe. Die Linien einer Liniengruppe müssen dann bei der Einsatzplanung als eine Einheit bearbeitet werden.

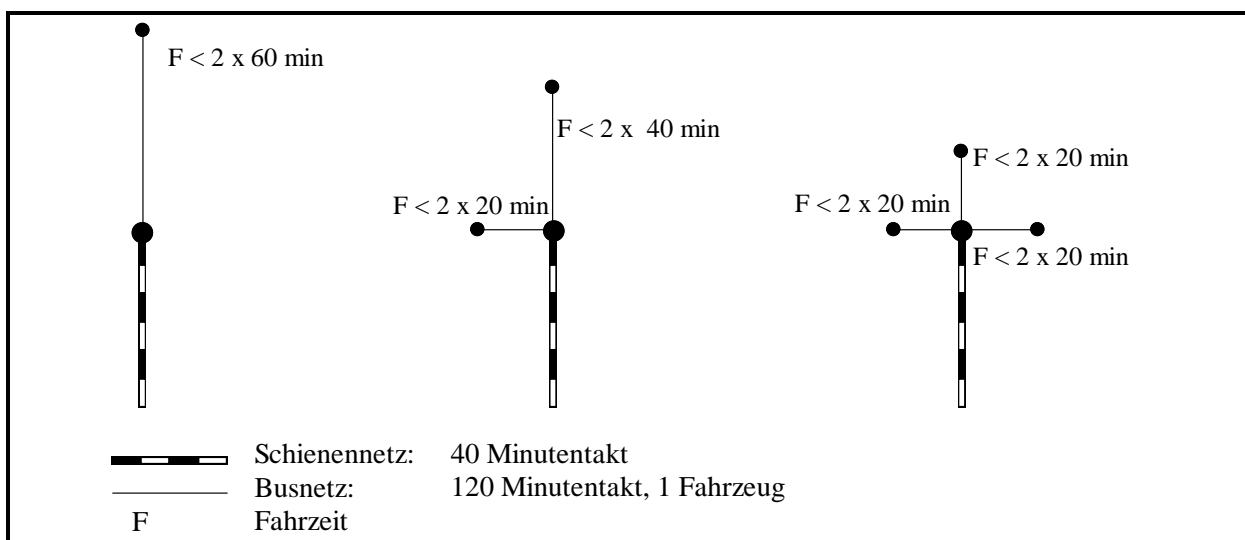


Abb. 2.6: Fahrzeugeinsatz bei einem Systemtakt von 120 Minuten

Innerhalb eines Umlaufes können Standzeiten, die nicht als Puffer- oder Wendezeit notwendig sind, als *Pausenzeit* für den Fahrer genutzt werden, sofern sie die für eine Pause erforderliche Länge aufweisen. Ergeben sich für einen Umlauf keine oder nur sehr kurze Standzeiten, dann müssen Blockpausen eingeplant werden, für die der Fahrer aus dem Umlauf herausgenommen wird.

#### 2.3.4 Umlaufschema

Die Fahrzeug- und Fahrereinsatzplanung innerhalb der Angebotsplanung erfolgt jeweils für eine einzelne Linie oder eine Liniengruppe. Das heute übliche Umsetzen der Fahrzeuge auf andere Linien, das zu einer unübersichtlichen Vernetzung führt, bringt keinen Vorteil, weil die Zeiten des größten Fahrzeugbedarfs zusammenfallen und die Fahrzeuge an den Zeitknoten gleichzeitig abfahren. Jede Linie oder Liniengruppe kann somit unter Beachtung vorhandener Konzessionen an unterschiedliche Betreiber vergeben werden. Fahrplanänderungen wirken sich dann nur mehr auf die Einsatzplanung der betroffenen Linie aus.

Als Grundschemata für die Bedienung einer Linie oder einer Liniengruppe wird bei einem Systemtakt von 120-Minuten der Einsatz von zwei Fahrzeugen und drei Fahrern vorgesehen. Mit diesen Betriebsmitteln kann ein Zwei-Stundentakt, der in der Hauptverkehrszeit und nach Schulschluß zu einem Stundentakt verdichtet wird, realisiert werden. Der erste Fahrer wird in der Frühschicht von ca. 6 Uhr bis 14 Uhr eingesetzt, der zweite Fahrer übernimmt die Nachmittagsschicht von 12 Uhr bis 20 Uhr. Damit überlappen sich die Fahrer zwischen 12 Uhr und 14 Uhr, so daß im mittäglichen Schülerverkehr eine Verdichtung möglich ist. Um auch in der morgendlichen und abendlichen Hauptverkehrszeit eine Verdichtung auf einen Stundentakt zu erreichen, ist ein dritter Fahrer mit einem geteilten Dienst erforderlich. Dieses Umlaufschema ist in **Abbildung 2.7** dargestellt.

Im Verkehrsnetz 2. Grades besteht die Gefahr, daß die Kapazität der dort eingesetzten kleineren Fahrzeuge nicht ausreicht, um Nachfragespitzen im Schüler- und Berufsverkehr abzudecken. Deshalb ist es zweckmäßig die ein- und aussetzenden Fahrzeuge der Linien im Netz 1. Grades über das Linienende hinaus in die Fläche zu verlängern (**Abbildung 2.8**). Auf diese Weise werden in der Hauptverkehrszeit und nach Schulschluß auch kleinere Orte abseits der Hauptverkehrsachsen direkt mit den zentralen Orten und Bahnhöfen des Landkreises verbunden. Außerdem werden Taktverdichtungen im Netz 2. Grades ohne zusätzliche Fahrzeuge ermöglicht.

Aus diesem Grundschemata werden für unterschiedliche Linienlängen unter Berücksichtigung der gesetzlichen Pausenregelungen verschiedene Umlaufschema-Bausteine abgeleitet, die im **Anhang** beigelegt sind.

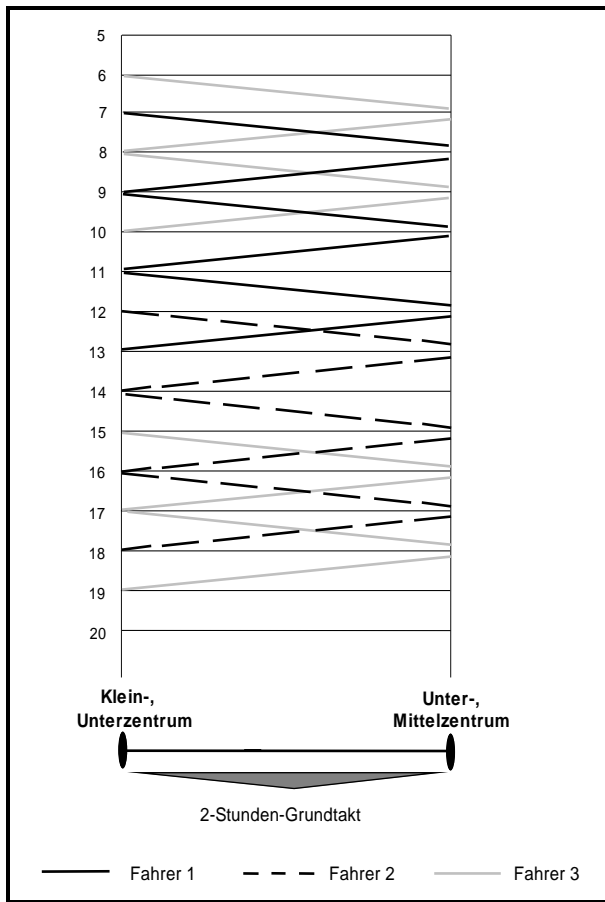


Abb. 2.7: Umlaufschema für Linien 1. Grades

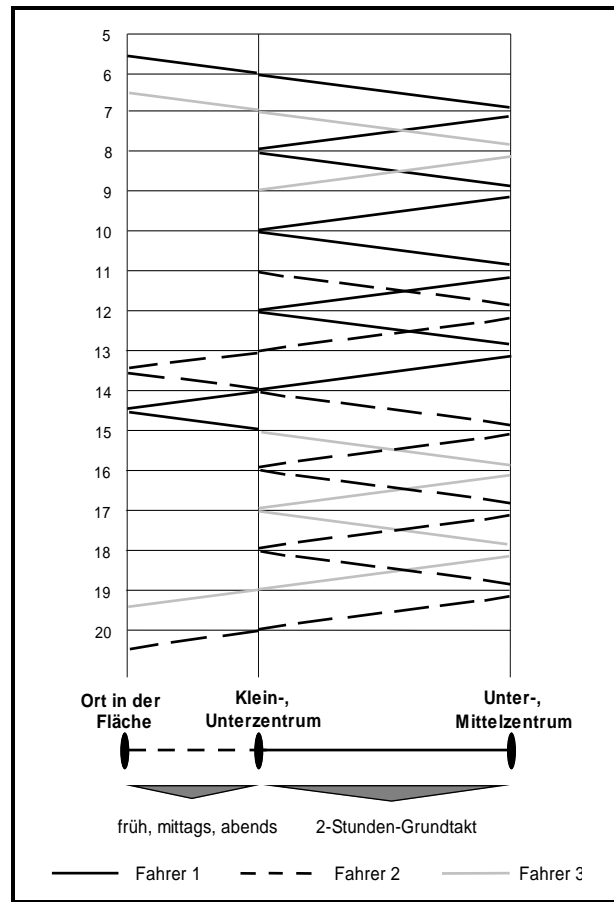


Abb. 2.8: Umlaufschema bei Verlängerung der Linien 1. Grades

## 2.4 Zielkonzept

Nach dem "Leitfaden für Verkehrsplanungen" (FGSV, 1985) werden bei der Erarbeitung eines Zielkonzeptes Zielvorgaben (Gesetze, Normen, Vorschriften) und Zielsetzungen (Entscheidungen der zuständigen politischen Gremien) systematisiert und zu einem Zielfeld zusammengestellt. Um den Grad der Zielerreichung einer Lösung zu beurteilen, braucht man Bewertungsverfahren. Bei den Bewertungsverfahren wird zwischen nicht-formalisierten, teil-formalisierten und formalisierten Verfahren unterschieden (KIRCHHOFF, LEUTZBACH et al. 1993). Bei den nicht-formalisierten Bewertungsverfahren erfolgt eine umfassende Beurteilung durch Einzelpersonen oder Personengruppen. Bei den teil-formalisierten und formalisierten Verfahren werden die Wirkungen nach mehreren Kriterien differenziert beurteilt, wobei die Wirkungen bei den formalisierten Verfahren über Kenngrößen und Gewichte miteinander verrechnet werden (Nutzen-Kosten-Untersuchungen). Sowohl die teil-formalisierten als auch die formalisierten Verfahren benötigen ein Zielkonzept, das

- Zielkriterien zur Beschreibung eines Zielfeldes,
- Kenngrößen der quantitativ erfaßbaren Zielkriterien,
- Anspruchsniveaus für jede Kenngröße und
- Zielgewichte, die die Bedeutung eines Zieles gegenüber anderen Zielen angeben,

umfaßt. Die Erarbeitung eines Zielkonzeptes ist kein objektiver Arbeitsschritt. Bei der Auswahl von Zielkriterien und Kenngrößen, findet eine subjektive Einschätzung statt. Der Planer wählt Kenngrößen, die seiner Meinung nach geeignet sind, die vermuteten oder bekannten Wirkungen eines ÖPNV-Angebotes zu beschreiben. Außerdem können der erforderliche Arbeitsaufwand zur Kenngrößenermittlung oder die Verfügbarkeit von Daten die Auswahl beeinflussen. Kenngrößen, für die z.B. in Richtlinien Anspruchsniveaus definiert sind, werden unter Umständen bevorzugt, da sie mit einem Hinweis auf die Richtlinie einfach bewertet werden können und dem "Stand der Technik" genügen. Innerhalb des Planungsprozesses kann es sinnvoll und notwendig sein, das Zielkonzept zu überarbeiten. Die Überarbeitung wird erforderlich, wenn z.B. die Anspruchsniveaus nicht erreicht werden. Sie kann neben einer Veränderung der Anspruchsniveaus auch die Zielgewichte oder die Einführung zusätzlicher Zielkriterien und Kenngrößen umfassen.

Bei der Bewertung muß zwischen quantitativ und qualitativ beschreibbaren Zielkriterien unterschieden werden. Ein Zielkriterium (Zeitaufwand) ist quantifizierbar, wenn für die Kenngrößen des Zielkriteriums (Reisezeit, Luftliniengeschwindigkeit ...) ein Kennwert (30 Minuten, 20 km/h ...) angegeben werden kann. Für nicht quantifizierbare Zielkriterien, z.B. die Übersichtlichkeit von Netz-, Fahr- und Tarifplan, sind nur qualitative, verbale Aussagen möglich. Bei genauer Betrachtung kann allerdings oft auch ein nicht quantifizierbares Zielkriterium weiter untergliedert und auf eine oder mehrere meßbare Kenngrößen zurückgeführt werden. So könnte man beispielsweise versuchen, die Übersichtlichkeit eines Linienplans durch das Zielkriterium Regelmäßigkeit der Linienführung auszudrücken, das durch die Zahl unterschiedlicher Verbindungsrouten für eine Beziehung quantifiziert werden könnte.

Zur Beurteilung einer Lösung innerhalb des Entwurfsprozesses eignen sich teil-formalisierte Verfahren mit einer multikriteriellen Wirkungsdarstellung. Dabei werden die Kennwerte quantifizierbarer Zielkriterien jeweils einzeln mit vorgegebenen Anspruchsniveaus und mit den Kennwerten des heutigen ÖPNV-Angebotes verglichen. Auf diese Weise können Mängel genau, d.h. kriterienscharf, erkannt und in einer anschließenden Mängelanalyse lokalisiert werden. Die Kenntnis von Ort und Ursache eines Mangels ermöglichen dann gezielte Maßnahmen zur Verbesserung einer Lösung. Für den anschließenden Entscheidungsprozeß müssen die Ergebnisse so aufbereitet werden, daß die wesentlichen Wirkungen der Maßnahmen oder Planfälle erkennbar sind. Das läßt sich durch Häufigkeitsverteilungen von Kenngrößen, sowie durch verbale und graphische Erläuterungen erreichen. Weist ein Planfall auch nach Abschluß des Entwurfsprozesses partielle Mängel in der Angebotsqualität auf, sollte die Ergebnisdarstellung eine Mängelliste enthalten, die die betroffenen Beziehungen aufführt.








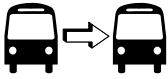




### 2.4.1 Auswahl von Zielkriterien

Mit Hilfe von Zielkriterien können die Wirkungen in unterschiedlichen Bezugsebenen beschrieben werden. Die Wirkungen können sich auf eine Verbindung, eine Beziehung, eine Verkehrszelle, ein Teilverkehrssystem, auf das Gesamtverkehrssystem oder andere vom Verkehr beeinflusste Systeme beziehen. Kenngrößen unterer Bezugsebenen können zu Kenngrößen einer übergeordneten Ebene zusammengefaßt werden. So ist es z.B. möglich, aus den Reisezeiten einzelner Verbindungen zwischen zwei Verkehrszellen die mittlere Reisezeit der Beziehung zu berechnen und weiter die mittlere Reisezeit von/zu einer Zelle oder eines Systems zu ermitteln.

Die Kenngrößen können für jede Bezugsebene bewertet werden. Dabei verbessert sich mit jeder Zusammenfassung die Übersichtlichkeit und verringert sich die Genauigkeit der ermittelten Wirkungen. Für die Bewertung einer Maßnahme innerhalb des Entwurfsprozesses werden daher die Kenngrößen der unteren Bezugsebenen ermittelt und bewertet. Um die Wirkungen eines Planungsvorschlages im Ergebnisbericht und für die politische Instanz zu beschreiben, eignen sich dagegen Mittelwerte und Häufigkeitsverteilungen von Kenngrößen.

Die im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigten Zielkriterien beschränken sich auf Kriterien, die die Wirkungen des Teilverkehrssystems ÖPNV auf die Benutzer und die Betreiber des ÖPNV beschreiben. Dies erscheint gerechtfertigt, da die Wirkungen eines veränderten ÖPNV-Angebotes im ländlichen Raum, vor allem, wenn es nur den straßengebundenen ÖPNV umfaßt, auf andere Systeme sehr gering ist.

Wichtige Kriterien, nach denen ein ÖPNV-Angebot von den Benutzern und den Betreibern beurteilt wird, sind in der **Abbildung 2.9** zusammengestellt. Die benutzerbezogenen Zielkriterien beinhalten Aussagen über die Qualität des Verkehrsangebotes, die Zielkriterien der Betreiber umfassen den Aufwand zur Erbringung des Verkehrsangebotes.

Benutzer	Betreiber
	 <div style="text-align: center;"> Landkreis  ↓  Nahverkehrsgesellschaft  ↓  Verkehrsunternehmen </div>
<b>Zugänglichkeit:</b> Wie weit ist meine Haltestelle entfernt? 	<b>Verkehrsunternehmen:</b> Wie groß ist der <b>betriebliche Aufwand</b> ?
<b>Zeitliche Verfügbarkeit:</b> Wie oft und wann fährt mein Bus? 	Wieviele Fahrzeuge sind erforderlich? 
<b>Zeitaufwand, Schnelligkeit:</b> Wie lange brauche ich, um mein Ziel zu erreichen? 	Wieviele Fahrer sind erforderlich? 
<b>Direktheit:</b> Wie oft muß ich umsteigen? 	Wie gut sind Fahrplan- und Dienstplanwirkungsgrad? 
<b>Preis:</b> Wie teuer ist eine Fahrt? 	
<b>Komfort, Handhabbarkeit:</b> Bekomme ich einen Sitzplatz? Wie gut sind die Informationen? 	<b>Landkreis:</b> Welcher <b>finanzielle Aufwand</b> (Betriebskostendefizit) ist zu erwarten? 

**Abb. 2.9:** Kriterien der Benutzer und der Betreiber zur Beurteilung eines ÖPNV-Angebotes

Jedem Zielkriterium können eine oder mehrere Kenngrößen (Indikatoren) zugeordnet werden. Die **Tabelle 2.1** zeigt Zielkriterien und ihre Kenngrößen für den Wirkungsbereich der Benutzer. In **Tabelle 2.2** sind Kenngrößen für die Zielkriterien des Wirkungsbereiches Betreiber aufgeführt. In dieser Arbeit wird auf die Erstellung eines vollständigen Zielfeldes verzichtet. Es



werden nur solche Zielkriterien und Kenngrößen berücksichtigt, die unmittelbar für den Entwurf eines ÖPNV-Angebotes benötigt werden. Die Tarifgestaltung, die Verfügbarkeit von Information oder das Vorhandensein eines Wetterschutzes an den Haltestellen sind für den Fahrgast wichtige Gesichtspunkte. Diese Aspekte können aber losgelöst vom Netz- und Fahrplanentwurf in einem unabhängigen Arbeitsschritt bearbeitet werden.

<b>Zielkriterien der Benutzer</b>	<b>Kenngröße</b>	<b>Dimension</b>
Zugänglichkeit	• Fußweglänge	[m]
Zeitaufwand, Schnelligkeit	• Reisezeit, Zu- und Abgangszeit, Wartezeit, Beförderungszeit, Umsteigewartezeit	[min]
	• Luftliniengeschwindigkeit	[km/Std]
	• Verhältnis ÖV-Reisezeit zu optimaler ÖV-Reisezeit	[-]
zeitliche Verfügbarkeit	• Bedienungshäufigkeit	[Fahrten/Std]
	• maximale Fahrzeugfolgezeit	[min]
	• Regelmäßigkeit der Abfahrtszeiten	ordinal
Direktheit	• Umsteigehäufigkeit	[Umsteigevorgang]
	• Verhältnis Streckenlänge zu Luftlinienentfernung	[-]
Komfort	• Witterungsschutz an der Haltestelle	nominal
	• Auslastungsgrad	[%]
Handhabbarkeit	• Verfügbarkeit von Information	nominal
	• Zahl der unterschiedlichen Verbindungsrouen	[-]
Preis	• Kosten für eine Fahrt	[DM]

Tab. 2.1: Zielkriterien und Kenngrößen der Benutzer

<b>Zielkriterien der Betreiber</b>	<b>Kenngröße</b>	<b>Dimension</b>
Betrieblicher Aufwand	• Zahl der erforderlichen Fahrzeuge	[Fahrzeuge]
	• Fahrzeugkilometer	[Fahrzeugkm]
	• Zahl der erforderlichen Fahrer	[Fahrer]
	• Personalstunden	[FahrerStd]
Finanzieller Aufwand	• Betriebskosten	[DM]
	• Einnahmen	[DM]

Tab. 2.2: Zielkriterien und Kenngrößen der Betreiber

Bei der Bewertung von Kenngrößen muß sich der Planer bewußt sein, daß zwei Kenngrößen voneinander abhängig sein (z.B. Reisezeit und Luftliniengeschwindigkeit) und somit doppelt bewertet werden können.

Qualitätsstandards für die Angebotsqualität des ÖPNV sollten nicht, wie es zum Teil in Richtlinien (vgl. Richtlinie zur Nahverkehrsplanung, BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND VERKEHR, 1977) geschieht, allgemein verbindlich vorgegeben werden, sondern sind von den politischen Zielen der jeweiligen kommunalen Gebietskörperschaft abhängig. Das gilt insbesondere, wenn die finanzielle Verantwortung bei der Gebietskörperschaft liegt. Nachfolgend werden die Kriterien Zugänglichkeit, Zeitaufwand, Direktheit und zeitliche Verfügbarkeit diskutiert.

#### 2.4.2 Zugänglichkeit

Die *Länge des Fußweges* vom Wohnstandort zur Einstiegshaltestelle und von der Ausstiegshaltestelle zum Zielort ist ein Indikator für die Zugänglichkeit und die Erschließungsqualität des ÖPNV-Netzes. Für die Kenngröße Fußweglänge werden in Richtlinien und in der Literatur (VÖV, 1981; BLENNEMANN/BRANDENBURG, 1977; Bayerische Richtlinie zur Nahverkehrsplanung, 1977) Grenzwerte bzw. Anspruchsniveaus vorgeschlagen. Die Beurteilung der Fußweglänge geht dabei in allen Fällen von der Überlegung aus, daß im ländlichen Raum und zu Bahnhöfen ein längerer Fußweg zumutbar ist. Für die Bewertung eines ÖPNV-Angebotes innerhalb des Entwurfsprozesses erscheint diese Differenzierung nicht sinnvoll, da die mit Bahnhöfen verbundene bessere Verkehrsqualität durch die Zielkriterien Zeitaufwand und zeitliche Verfügbarkeit bereits direkt berücksichtigt wird. Grundsätzlich kann bei einer ÖPNV-Angebotsplanung für den ländlichen Raum im Gegensatz zum städtischen ÖPNV erwartet werden, daß die Kenngröße Fußweglänge wenig Potential für Verbesserungsmaßnahmen bietet, da die eine Haltestelle "am Marktplatz" wegen der geringen Ausdehnung der Orte i.d.R. günstig liegt. In Abhängigkeit von der Lage der Haltestellen können im ländlichen Raum drei Fälle der Haltestellenlage unterschieden werden:

1. Die Haltestelle liegt im Ortskern und ist in einer annehmbaren Gehzeit zu erreichen. Bei einem Straßendorf sind für eine gute Erschließung u.U. mehrere Haltestellen entlang der Hauptverkehrsstraße erforderlich.
2. Die Haltestelle liegt ortsfern an der nächsten Hauptverkehrsstraße, so daß eine Umweg- oder Stichfahrt erforderlich ist, um die Erschließung zu verbessern.
3. Der Ort ist nicht erschlossen.

Verbesserungen sind dann möglich, wenn es gelingt, nicht erschlossene Orte z.B. durch Bedarfshaltestellen an das ÖPNV-Netz anzubinden. Neben der Fußweglänge wird die Zugänglichkeit durch die Qualität des Fußweges angegeben, die verbal beschrieben werden muß.

#### 2.4.3 Zeitaufwand

Der Zeitaufwand kann durch die Kenngröße *Reisezeit* mit den Komponenten

- Zu- und Abgangszeit,
- Wartezeit an der Einstiegshaltestelle,
- Fahrtzeit im Verkehrsmittel einschließlich der Haltestellenaufenthaltszeiten und
- Umsteigewartezeit

angegeben werden. Die Reisezeit eignet sich zur Überprüfung der Erreichbarkeit zentraler Orte. So enthält z.B. die bayerische Richtlinie zur Nahverkehrsplanung (1977) Richtwerte für die Reisezeiten in die nächsten zentralen Orte. Für die Bewertung des Zeitaufwandes innerhalb des Entwurfsprozesses sollte die Kenngröße Reisezeit allerdings nicht verwendet werden, da der Zeitaufwand für den Zu- und Abgangsweg bereits durch die Kenngröße *Fußweglänge* berücksichtigt wird. Die doppelte Bewertung der Fußweglänge wird vermieden, wenn für die Bewertung des Zeitaufwandes die Kenngröße *Beförderungszeit* gewählt wird. Während die Reisezeit den gesamten Zeitaufwand von der Startadresse zur Zieladresse umfaßt, beinhaltet die Beförderungszeit nur die Zeit von der Einstiegshaltestelle zur Ausstiegshaltestelle einschließlich erforderlicher Umsteigezeiten.

Der Teil der Reisezeit, der auf die Wartezeit entfällt, wird in städtischen Räumen oft in Abhängigkeit von der Fahrzeugfolgezeit abgeleitet. Diesem Vorgehen liegt die Annahme zugrunde, daß die Fahrgäste ohne Fahrplankenntnis zufällig zur Haltestelle gehen. Bei Fahrzeugfolgezeiten über 10 Minuten, wie sie im ländlichen Raum die Regel sind, wird der Anteil der zufälligen Fahrgastankünfte an der Haltestelle stark abnehmen, so daß die Wartezeit eher von der Kenntnis der Fußweglänge bzw. der erforderlichen Gehzeit und dem individuellen Sicherheitsbedürfnis nach einer Pufferzeit an der Haltestelle abhängt. Da die Fußweglänge und die Bedienungshäufigkeit als eigenständige Kenngrößen in die Bewertung eingehen, kann die Wartezeit für den Entwurf eines ÖPNV-Angebotes somit entweder vernachlässigt oder besser mit einem konstanten Wert von beispielsweise 5 Minuten angenommen werden. Für die zusätzlichen Wartezeiten an einer Bedarfshaltestelle, die durch Fahrzeitschwankungen der Bedarfsbusse auftreten, lassen sich dagegen mittlere Zeitwerte berechnen. Die gelegentlich verwendete Kenngröße Dispositionszeit (KRUG, 1987), die die Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt des Auftretens eines Fahrtwunsches und dem nächst möglichen Abfahrts- bzw. Abgangszeitpunkt angibt, beschreibt nicht den Zeitaufwand, sondern die zeitliche Verfügbarkeit eines ÖPNV-Angebotes und wird dort behandelt.

Um bei der Beförderungszeit die zurückgelegte Entfernung berücksichtigen zu können, kann die Beförderungszeit

- auf die Luftlinienentfernung oder
- auf die Länge des Beförderungsweges

zwischen der Einstiegshaltestelle und der Ausstiegshaltestelle bezogen werden. Als Indikatoren für den Zeitaufwand erhält man die *Luftliniengeschwindigkeit* bzw. die *Beförderungsgeschwindigkeit*. Zur Beurteilung des Zeitaufwandes hat von diesen beiden Kenngrößen die Luftlinienentfernung den Vorteil, daß sie sich auf eine fest vorgegebene Entfernung bezieht. Der tatsächliche Beförderungsweg kann dagegen auch Umwegfahrten beinhalten, die durch das Zielkriterium Umwegigkeit erfaßt werden.

Alternativ zur Kenngröße Luftliniengeschwindigkeit kann die *zeitliche Umwegigkeit* zur Bewertung des Zeitaufwandes herangezogen werden. Sie ergibt sich aus dem Vergleich der vorhandenen Beförderungszeit einer ÖPNV-Verbindung mit einer minimalen Beförderungszeit, die bei einer optimalen ÖPNV-Verbindung möglich wäre. **Abbildung 2.10** zeigt den Unterschied zwischen der vorhandenen und der optimalen Beförderungszeit. Die optimale Beförderungszeit zeichnet sich dadurch aus, daß die Linien auf dem direkten, kürzesten Weg des Netzes fahren. Schnellere Schienenstrecken werden benutzt, wobei beim Übergang vom

Straßennetz zum Schienennetz eine haltestellenspezifische minimale Übergangszeit angenommen wird. Die zeitliche Umwegigkeit kann mit einem Bestweg-Algorithmus bestimmt werden. Sie bietet gegenüber der Luftliniengeschwindigkeit den Vorteil, daß

- topographisch bedingte Umwegfahrten nicht in die Bewertung eingehen,
- die Reiseweite nicht extra berücksichtigt werden muß,
- Streckenabschnitte, die aus Gründen, die nicht vom ÖPNV zu verantworten sind (z.B. Verkehrsdichte), geringe Fahrgeschwindigkeiten aufweisen, keine schlechte Bewertung bewirken.

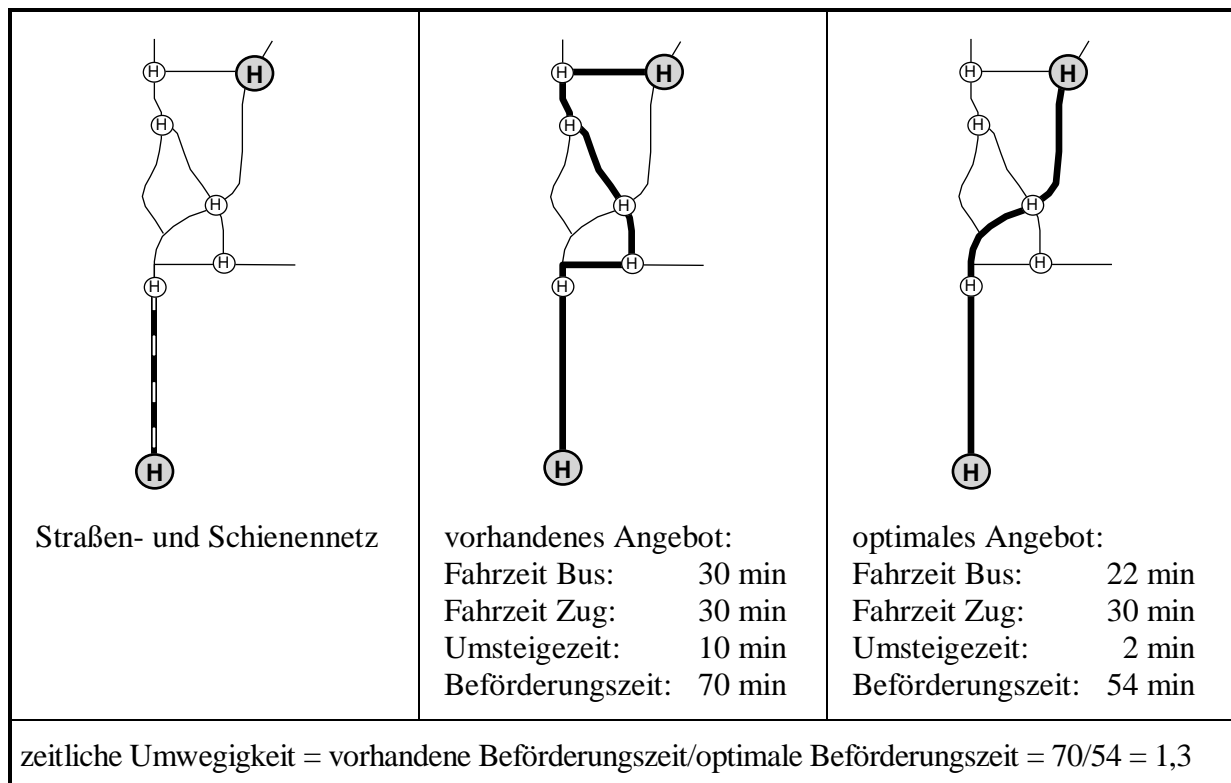


Abb. 2.10: Zeitliche Umwegigkeit

#### 2.4.4 Direktheit

Die Direktheit einer ÖPNV-Verbindung kann durch die Zahl der erforderlichen *Umsteigevorgänge* angegeben werden. Jeder Umsteigevorgang während einer Fahrt wirkt als Qualitätsverlust für den Fahrgast (vgl. PRUSA, 1984). Die Kennwerte der Umsteigehäufigkeit beschränken sich nicht auf ganzzahlige Werte. Für die Mittelwerte einer Quelle-Ziel-Beziehung können sich reelle Zahlen ergeben, wenn die Umsteigehäufigkeit im Tagesverlauf schwankt oder wenn zeitgleich eine direkte Verbindung und eine schnellere Verbindung, die Umsteigen erfordert, angeboten werden.

Eine zweite Kenngröße für die Direktheit ist die *räumliche Umwegigkeit*. Die räumliche Umwegigkeit beschreibt, im Gegensatz zur zeitlichen Umwegigkeit, ein Verhältnis zweier Längen. Sie berechnet sich aus dem Verhältnis der Streckenlänge zur Luftlinienentfernung. Nachdem für den Fahrgast in erster Linie der Zeitaufwand und nicht die benutzte Route von Interesse ist, hat

die zeitliche Umwegigkeit, die die Komponenten Zeit und Weg gleichermaßen berücksichtigt, eine umfassendere Aussagekraft.

Die *Umsteigewartezeit* ist bereits im Zielkriterium Zeitaufwand enthalten. Sie kann aber zusätzliche Informationen über die Qualität der Anschlüsse beinhalten. Zu große Umsteigewartezeiten werden als Zeitverschwendung betrachtet. Bei sehr kurzen Umsteigewartezeiten müssen die Fahrgäste dagegen befürchten, daß sie ihre Anschlüsse verpassen. In dem später vorgestellten Verfahren zur Kenngrößenberechnung wird die Umsteigewartezeit als ein Abbruchkriterium bei der Verbindungssuche verwendet. Dabei werden nur solche Verbindungen beim Aufbau des Verbindungsbaumes zugelassen, die an den Umsteigehaltstellen eine vorgegebene maximale Umsteigewartezeit nicht überschreiten. Umsteigevorgänge mit längerer Umsteigewartezeit werden nicht akzeptiert.

#### 2.4.5 Zeitliche Verfügbarkeit

Die zeitliche Verfügbarkeit des ÖPNV-Angebotes umfaßt die Komponenten *Bedienungshäufigkeit* und *Regelmäßigkeit*. Die Bedienungshäufigkeit wird oft als die Zahl der täglichen Fahrten oder Fahrtenpaare einer Linie interpretiert. Für die Bewertung der Angebotsqualität muß die Bedienungshäufigkeit aber auf eine Quelle-Ziel-Beziehung bezogen werden. Die Bedienungshäufigkeit wird also bei Beziehungen, die ein Umsteigen erfordern, durch die Bedienungshäufigkeit mehrerer Linien beeinflusst und wird durch die Zahl der täglichen Verbindungen oder Verbindungspaare gemessen. Die Regelmäßigkeit drückt die zeitliche Verteilung des Fahrtenangebotes über einen Tag und die Merkbarkeit der Abfahrtszeiten aus.

Während Kenngrößen wie die Fußweglänge, die Reisezeit oder die Umsteigehäufigkeit eindeutig gemessen werden können, erfordert die Kenngröße Bedienungshäufigkeit eine Definition der Maßeinheit Bedienung. Wird eine Bedienung als Verbindung einer Quellzelle mit einer Zielzelle definiert, die zur Befriedigung der Verkehrsnachfrage dieser Beziehung sinnvoll genutzt werden kann, zählt eine Verbindung nur dann als Bedienung, wenn

- die Verbindung eine eigenständige Verbindung darstellt, d.h. frühere oder spätere Verbindungen einen vorgegebenen minimalen Zeitabstand einhalten,
- nach der Ankunft am Ziel der Verbindung eine Rückfahrtmöglichkeit angeboten wird, die eine Mindestaufenthaltszeit am Ziel zuläßt.

Um die Zahl der Bedienungen für eine Beziehung eindeutig zu messen, müssen die angebotenen Verbindungen bekannt sein und vom Planer folgende Daten vorgegeben werden:

- *Beginn und Ende des Meßzeitraums*: Sie definieren den Untersuchungszeitraum. Damit kann die Bedienungshäufigkeit für die gesamte Betriebsdauer oder nur für einen Tageszeitraum bestimmt werden.
- *Bezugspunkt der Messung*: Er legt fest, ob die Abfahrts- oder die Ankunftshaltestelle einer Fahrt für die Messung verwendet wird. Diese Unterscheidung ist bei der Abgrenzung von Untersuchungszeiträumen wichtig, wenn nur der Abfahrts- oder der Ankunftszeitpunkt im betrachteten Zeitraum liegt.

- *Zeitabstand für eine eigenständige Verbindung:* Damit zwei Verbindungen als eigenständige Bedienungen zählen, muß zwischen der Abfahrts- bzw. der Ankunftszeit der beiden Verbindungen ein minimaler Zeitabstand eingehalten werden. Dadurch werden reine Verstärkerfahrten, die aus Kapazitätsgründen nahezu zeitgleich hinter einer regulären Linienfahrt herfahren, oder Parallelbedienungen zweier Linien nur als eine Bedienung gezählt. Der Wert für den minimalen Zeitabstand sollte deutlich kleiner sein als der für die Hauptverkehrszeit geplante Takt. Geeignete Werte für den ländlichen Raum liegen im Bereich zwischen 5 und 20 Minuten.
- *Mindestaufenthaltszeit an der Zielzelle:* Zur Messung von Verbindungspaaren müssen Hin- und Rückrichtung einer Beziehung betrachtet werden. Eine Verbindung von der Quellzelle zur Zielzelle wird nur dann als Verbindungspaar gezählt, wenn eine Rückfahrt angeboten wird, die eine Mindestaufenthaltszeit (z.B. 2 Stunden) an der Zielzelle erlaubt.

Mit dem in **Tabelle 2.3** angegebenen Beispiel für Verbindungen von einem Wohnort in die Kreisstadt bzw. in das Oberzentrum soll die Problematik der Kenngröße Bedienungshäufigkeit verdeutlicht werden. Die Buslinie verbindet Wohnort und Kreisstadt in jeder Richtung mit 6 Linienfahrten. Davon werden nur 5 als eigenständige Verbindungen gewertet, da die Verstärkerfahrt für den Schülerverkehr – ab Wohnort 7.15 – keine verbesserte zeitliche Verfügbarkeit ergibt. Die letzte Fahrt – ab Wohnort 17.50 – kann von den Fahrgästen aus dem Wohnort ebenfalls nicht benutzt werden, da keine Rückfahrt aus der Kreisstadt möglich ist. Letztendlich können also nur 4 der 6 Verbindungen für die Beziehung Wohnort – Kreisstadt genutzt werden.

Bus	Wohnort ab	6.00	7.15	7.20	12.00	14.00	17.50
Bus	Kreisstadt an	6.40	7.55	8.00	12.40	14.40	18.30
Zug	Kreisstadt ab	6.45	–	8.05	12.45	14.45	18.45
Zug	Oberzentrum an	7.20	–	8.40	13.20	15.20	19.20
Zug	Oberzentrum ab	–	8.20	12.20	–	16.20	17.40
Zug	Kreisstadt an	–	8.55	12.55	–	16.55	18.15
Bus	Kreisstadt ab	6.40	9.00	13.00	13.05	17.00	18.30
Bus	Wohnort an	7.20	9.40	13.40	13.45	17.40	19.10
		Wohnort ↓ Kreisstadt	Wohnort ↓ Oberzentrum	Kreisstadt ↓ Wohnort	Oberzentrum ↓ Wohnort		
Alle Verbindungen		6	5	6	4		
Eigenständige Verbindungen		5	5	5	4		
Verbindungspaare		4	4	3	2		

Tab. 2.3: Kennwerte der Bedienungshäufigkeit

Wie aus dem vorgestellten Beispiel ersichtlich ist, sollten für die Bewertung der Bedienungshäufigkeit nur die eigenständigen Verbindungen mit Rückfahrmöglichkeiten berücksichtigt werden. Diese Forderung hat Konsequenzen für die Kenngrößenberechnung mit einem Berechnungsprogramm. Entweder müssen alle Verbindungen nach der Verbindungssuche gespeichert werden oder die Verkehrsbeziehungen  $i-j$  und  $j-i$  müssen bei der Verbindungssuche gleichzeitig bearbeitet werden. Im ersten Fall sind zusätzliche Speicherkapazitäten erforderlich, im zweiten

Fall muß auf die effektivere zeilenweise Bearbeitung der Matrix der Verkehrsbeziehungen verzichtet werden.

Neben der Bedienungshäufigkeit bestimmt vor allem die Regelmäßigkeit des Angebotes, d.h. die zeitliche Verteilung und die Merkbarkeit des Fahrtenangebotes, die Qualität einer Verbindung. Die Regelmäßigkeit wird in der ÖPNV-Angebotsplanung bisher vor allem verbal beschrieben, wobei i.d.R. nur zwischen einem getakteten und einem nicht getakteten Angebot unterschieden wird. Die VÖV-Empfehlungen (1981) beinhalten Vorschläge über die zeitliche Verteilung von Fahrten bei niedrigen Bedienungshäufigkeiten. Um Aussagen über die Regelmäßigkeit des Angebotes machen zu können, werden im folgenden die Begriffe *Gleichmäßigkeit* und *Merkbarkeit* eingeführt. Dabei wird als Maß für den Abstand zweier Verbindungen analog zur Fahrzeugfolgezeit der Begriff der Verbindungsfolgezeit (VFZ) verwendet. Während die Fahrzeugfolgezeit für eine Linie gilt, bezieht sich die Verbindungsfolgezeit auf eine Quelle-Ziel-Beziehung.

Um die *Gleichmäßigkeit* der angebotenen Verbindungen zwischen zwei Verkehrszellen quantitativ zu erfassen, sollen drei mögliche Kenngrößen diskutiert werden:

- Die Kenngröße *Gleichmäßigkeit der Verbindungsfolgezeiten* kann mit Hilfe eines standardisierten Streuungsparameter aus der Häufigkeitsverteilung der Verbindungsfolgezeiten abgeleitet werden. Ein standardisiertes Maß für die Streuung ist der Variationskoeffizient  $V$ , der die Standardabweichung  $s$  als Prozentsatz des Mittelwertes ausdrückt (HERZ et al., 1976). Um die Gleichmäßigkeit ausdrücken zu können, wird der Variationskoeffizient  $V$  in der Weise transformiert, daß ein Wert von 100 % die maximale Gleichmäßigkeit, d.h. einen Takt ohne Sprünge, angibt (**Abbildung 2.11**). Die so berechneten Kennwerte reagieren allerdings, wie das Beispiel in **Abbildung 2.13** zeigt, sehr empfindlich auf Verstärkerfahrten und auf ein häufigeres Fahrtenangebot in der Hauptverkehrszeit. Nachdem solche zusätzlichen Fahrten i.d.R. aus Kapazitätsgründen notwendig sind und eine Verbesserung des Angebotes darstellen, ist die Gleichmäßigkeit der Verbindungsfolgezeiten als Kenngröße zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit weniger geeignet.

Verbindungsfolgezeit:	$VFZ_i = \text{Abfahrt Verbindung (i+1)} - \text{Abfahrt Verbindung (i)} \text{ [min]}$
Anzahl der VFZ:	$n = \text{Anzahl der Verbindungen} - 1$
mittlere VFZ:	$\overline{VFZ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VFZ_i \quad \text{[min]}$
Standardabweichung:	$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (VFZ_i - \overline{VFZ})^2} \quad \text{[min]}$ für $s > \overline{VFZ}$ gilt $s = \overline{VFZ}$
Variationskoeffizient:	$V = \frac{s}{\overline{VFZ}} \times 100 \quad \text{[%]}$
Gleichmäßigkeit der VFZ:	$G = 100 - V = \frac{\overline{VFZ} - s}{\overline{VFZ}} \times 100 \quad \text{[%]}$ $G = 0 \text{ für } n < 2$

Abb. 2.11: Gleichmäßigkeit der angebotenen Verbindungen

- Die Kenngröße *maximale Verbindungsfolgezeit* entspricht dem größten Zeitabstand zweier Verbindungen innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums. Sie kann einfach ermittelt werden, beinhaltet allerdings keine Aussagen über die restlichen Verbindungsfolgezeiten.
- Die Kenngröße *zusätzlich erforderliche Verbindungen* beschreibt die Zahl der zusätzlich erforderlichen Verbindungen, die innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums notwendig sind, damit eine vorgegebene maximale Verbindungsfolgezeit nicht überschritten wird.

Um ein Fahrtenangebot mit den Abfahrtszeiten 6.58 – 8.02 – 8.56 – 9.59... von einem Angebot mit den Abfahrtszeiten 6.58 – 7.58 – 8.58 – 9.58... zu unterscheiden, muß neben der Bedienungshäufigkeit und der Gleichmäßigkeit die *Merkbarkeit* beurteilt werden. Obwohl beide Angebote eine hohe Gleichmäßigkeit erreichen, ist das zweite Angebot einprägsamer und somit benutzerfreundlicher. Es ist getaktet, d.h. aus der Kenntnis einer Abfahrtszeit können weitere Abfahrtszeiten abgeleitet werden. Um die Merkbarkeit zu beurteilen, genügt es allerdings nicht, zwischen einem getakteten und einem nicht getakteten Angebot zu differenzieren, da sich auch die Merkbarkeit getakteter Angebote unterscheiden kann. Die Merkbarkeit eines getakteten Angebotes wird beeinflusst durch den Takt, die Zahl unterschiedlicher Takte und die Zahl unregelmäßiger Verbindungen:

- Ein *Takt* von 10, 15, 20, 30 oder 60 Minuten, der innerhalb einer Stunde regelmäßig wiederkehrende Abfahrtszeiten ergibt, ist einprägsamer als ein 40- oder ein 120- Minutentakt, der sich nur alle zwei Stunden wiederholt. Abfahrtszeiten, die seltener als alle zwei Stunden wiederkehren, sind schwer merkbar und sollten nicht als getaktet bezeichnet werden.
- Unterschiedliche Takte* eines ÖPNV-Angebotes entstehen durch Taktsprünge oder durch die Überlagerung mehrerer getakteter Linien. Taktsprünge ergeben sich durch die Verdichtung des Angebotes in der Hauptverkehrszeit bzw. durch die Ausdünnung des Angebotes in der Schwachverkehrszeit. Eine Überlagerung mehrerer getakteter Linien führt zu unterschied-



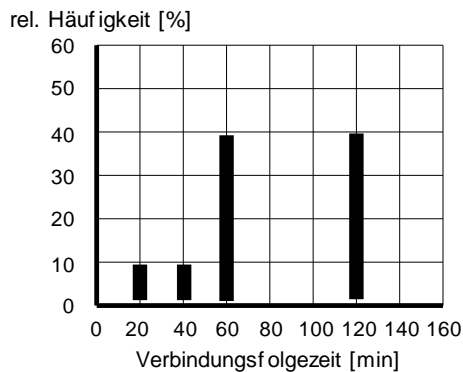
lichen Takten, wenn die einzelnen Linien unterschiedliche Fahrzeugfolgezeiten aufweisen oder wenn die Abfahrtszeiten zweier Linien nicht so koordiniert werden können, daß sich eine exakte Halbierung der Fahrzeugfolgezeiten ergibt.

- *Unregelmäßige Verbindungen*, die z.B. durch Verstärkerfahrten für den Schülerverkehr oder durch einen Expresverkehr nur in geringen Umfang angeboten werden, beeinflussen die Merkbarkeit kaum, solange sie zu keiner Taktunterbrechung führen.

Zur Beurteilung der *Merkbarkeit* kann als Kenngröße die *Zahl der unterschiedlichen Verbindungsfolgezeiten* verwendet werden. Ausgangspunkt für die Merkbarkeit ist eine relative Häufigkeitsverteilung der Verbindungsfolgezeiten (**Abbildung 2.12**). Aus diesem Histogramm läßt sich die Zahl unterschiedlicher Verbindungsfolgezeiten ablesen. Um die Einflüsse seltener, unregelmäßiger Verbindungen auszuschließen, werden die Verbindungsfolgezeiten nach der Größe der relativen Häufigkeit sortiert und dann als relative Summenhäufigkeitsverteilung dargestellt. Für die Ermittlung der Zahl unterschiedlicher Verbindungsfolgezeiten werden nur die häufigsten Verbindungsfolgezeiten berücksichtigt, die zur Erreichung einer vorgegebenen Percentile (z.B. 75 %) erforderlich sind. Diese Verbindungsfolgezeiten werden im folgenden signifikant genannt.

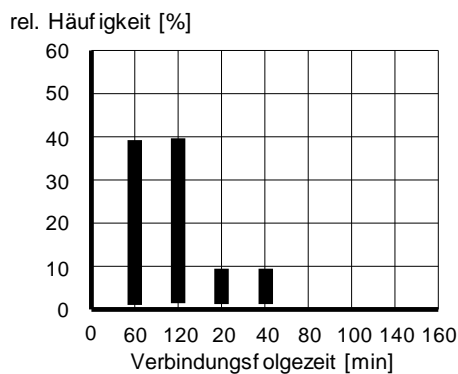
Anzahl der VFZ:	$n = \text{Anzahl der Verbindungen} - 1$
Wertebereich der VFZ:	$i = 0, \text{maximale VFZ} \quad [\text{min}]$
absolute Häufigkeit einer VFZ:	$H_i = \text{Zahl der VFZ mit dem Wert } i \text{ Minuten}$
relative Häufigkeit einer VFZ:	$h_i = \frac{H_i}{n} \times 100 \quad [\%]$

relative Häufigkeitsverteilung der VFZ



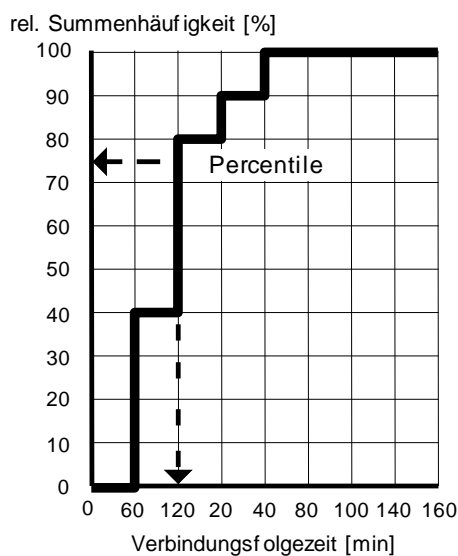
	$i$	$H_i$	$h_i$
1.	20 min	1	10 %
2.	40 min	1	10 %
3.	60 min	4	40 %
4.	120 min	4	40 %

relative Häufigkeitsverteilung der VFZ, sortiert nach Größe der relativen Häufigkeit



	$i$	$H_i$	$h_i$
1.	60 min	4	40 %
2.	120 min	4	40 %
3.	20 min	1	10 %
4.	40 min	1	10 %

relative Summenhäufigkeitsverteilung der VFZ, sortiert nach Größe der relativen Häufigkeit



	$i$	$\Sigma h_i$	
1.	60 min	40 %	< 75 %
2.	120 min	80 %	> 75 %
3.	20 min	90 %	
4.	40 min	100 %	

bei 100 % Percentile: 4 VFZ  
bei 75 % Percentile: 2 VFZ

Abb. 2.12: Beispiel zur Ermittlung der Zahl unterschiedlicher Verbindungsfolgezeiten

Die oben beschriebenen Kenngrößen der Kriterien Bedienungshäufigkeit, Gleichmäßigkeit und Merkbarkeit können einzeln bewertet werden. Um die verschiedenen Kenngrößen zu einer einheitlichen Bewertung zusammenfassen zu können, bieten sich Bewertungsregeln an. Sie werden vom Planer aufgabenspezifisch definiert und bei der Bewertung mit Hilfe eines EDV-Programms auf alle nachgefragten Beziehungen eines ÖPNV-Angebotes angewendet. **Tabelle 2.4** zeigt beispielhaft mögliche Bewertungsregeln zur Beurteilung der zeitlichen Verfügbarkeit eines ÖPNV-Angebotes im ländlichen Raum.

Regel 1:	<i>Der Untersuchungszeitraum beginnt um <b>6 Uhr</b> und endet um <b>18 Uhr</b>.</i>
Regel 2:	<i>Ein Angebot ist <b>gut getaktet</b>, wenn über den gesamten Untersuchungszeitraum höchstens <b>2</b> unterschiedliche Verbindungsfolgezeiten (75 % Percentile) auftreten und wenn diese signifikanten Verbindungsfolgezeiten dem Wert <b>10, 15, 20, 30</b> oder <b>60 Minuten</b> entsprechen.</i>
Regel 3:	<i>Ein Angebot ist <b>ausreichend getaktet</b>, wenn über den gesamten Untersuchungszeitraum höchstens <b>3</b> unterschiedliche Verbindungsfolgezeiten (75 % Percentile) auftreten und wenn diese signifikanten Verbindungsfolgezeiten dem Wert <b>10, 15, 20, 30, 40, 60</b> oder <b>120 Minuten</b> entsprechen.</i>
Regel 4:	<i>Ein Angebot ist sehr gut (++), wenn <b>gut getaktet</b> und mindestens <b>14</b> Verbindungspaare.</i>
Regel 5:	<i>Ein Angebot ist gut (+), wenn <b>ausreichend getaktet</b> und mindestens <b>10</b> Verbindungspaare oder wenn mindestens <b>14</b> Verbindungspaare und maximaler Zeitabstand zweier Verbindungen höchstens <b>150 Minuten</b>.</i>
Regel 6:	<i>Ein Angebot ist ausreichend (o), wenn <b>ausreichend getaktet</b> und mindestens <b>8</b> Verbindungspaare oder wenn mindestens <b>10</b> Verbindungspaare und maximaler Zeitabstand zweier Verbindungen höchstens <b>150 Minuten</b>.</i>
Regel 7:	<i>Ein Angebot ist schlecht (–), wenn mindestens <b>5</b> Verbindungspaare.</i>
Regel 8:	<i>Ein Angebot ist mangelhaft (– –), wenn weniger als <b>5</b> Verbindungspaare.</i>
<i>Die <b>fett</b> gekennzeichneten Ausdrücke sind vom Planer bzw. vom Aufgabenträger des ÖPNV für die jeweilige Planung festzulegen</i>	

**Tab. 2.4:** Beispiel für Bewertungsregeln zur Beurteilung der zeitlichen Verfügbarkeit.

Um die oben vorgestellten Kenngrößen zu veranschaulichen, sind in **Abbildung 2.13** Kennwerte zur Beurteilung der zeitlichen Verfügbarkeit verschiedener Fahrtenangebote zusammengestellt.

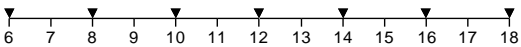
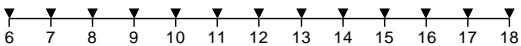
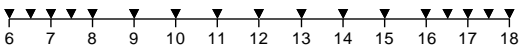
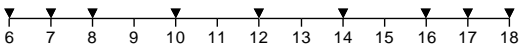
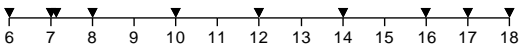
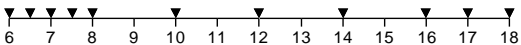
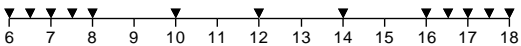
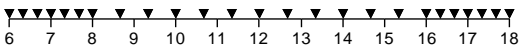
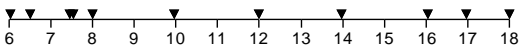
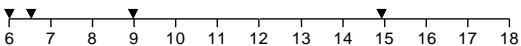
Verbin- dungen	eigen- ständige Verbin- dungen	mittlere VFZ [min]	Standard- abweichung [min]	Gleich- mäßigkeit der VFZ [%]	maximale VFZ [min]	zusätzlich erf. Verbindungen für eine max. VFZ von 60 min	unterschied- liche VFZ bei 100 % Percentile	unterschied- liche VFZ bei 75 % Percentile	Bewertung nach Tab. 2.13
 120-Minutentakt									
7	7	120	0	100	120	6	1	1	–
 60-Minutentakt									
13	13	60	0	100	60	0	1	1	+
 30-, 60-Minutentakt									
17	17	45	15	66	60	0	2	2	++
 60-, 120-Minutentakt									
9	9	90	32	64	120	4	2	2	o
 60-, 120-Minutentakt, Verstärker 7:05									
10	9	80	42	48	120	4	4	2	o
 30-, 60-, 120-Minutentakt									
11	11	72	43	40	120	4	3	2	+
 30-, 120-Minutentakt									
13	13	60	44	26	120	4	2	2	+
 20-, 40-Minutentakt									
25	25	30	10	66	40	0	2	2	++
 6:02, 6:27, 7:29, 7:33, 8:00, 9:59, 12:00, 13:58, 16:01, 16:59, 18:00									
11	10	72	45	37	120	8	10	10	–
 6:02, 6:28, 8:58, 14:59									
4	4	179	169	5	361	5	3	3	--

Abb. 2.13: Kenngrößen zur Beurteilung der zeitlichen Verfügbarkeit unterschiedlicher Verbindungsangebote (Betriebszeit von 6 Uhr bis 18 Uhr). In den Beispielen wird für jede Verbindung eine Rückfahrtmöglichkeit unterstellt.

Die bisher vorgestellten Kenngrößen beurteilen ein Fahrtenangebot unabhängig von der zeitlichen Verteilung der Fahrtwünsche. Um zu beurteilen, wie gut das Fahrtenangebot an die Ganglinie der Verkehrsnachfrage angepaßt ist, eignet sich die Kenngröße *Dispositionszeit*. Sie kann als eine verborgene, nicht nutzbare Wartezeit aufgefaßt werden, die vor dem Verlassen der Wohnung bei nicht ständiger Verfügbarkeit des ÖPNV auftritt, und die den Zeitraum zwischen dem Auftreten eines Fahrtwunsches und dem Abgangszeitpunkt umfaßt. Zur Berechnung der Dispositionszeit müssen daher der genaue zeitliche Verlauf der Verkehrsnachfrage und die Abfahrtszeiten an der Einstiegshaltestelle bekannt sein. Die Dispositionszeit kann dann bei der Aufteilung der Verkehrsnachfrage auf die angebotenen ÖPNV-Verbindungen berechnet werden. Da der zeitliche Verlauf der Verkehrsnachfrage, insbesondere der zukünftigen Verkehrsnachfrage, nur abgeschätzt werden kann, muß die Aussagekraft der Dispositionszeit allerdings in Frage gestellt werden. Wird die Verkehrsnachfrage bei der Ermittlung der Dispositionszeit wie bei KRUG (1987) als konstant angesehen, ist es besser, statt der Dispositionszeit direkt die Häufigkeitsverteilung der Verbindungsfolgezeiten zu beurteilen.

## 2.5 Ortsspezifische Randbedingungen

### 2.5.1 Siedlungsstruktur, Verkehrswegenetz und Bahnangebot

In einer ÖPNV-Angebotsplanung sind die Siedlungsstruktur und das Verkehrswegenetz vorgegeben. Wenn im Untersuchungsgebiet ein Bahnangebot besteht, bildet dieses Angebot ebenfalls eine Vorgabe, die bei der Planung i.d.R. nicht verändert werden kann.

Die *Siedlungsstruktur* umfaßt die Merkmale und die Verteilung der Standorte, die für menschliche Aktivitäten, wie z.B. Wohnen, Arbeiten und Einkaufen, genutzt werden. Wichtige Merkmale eines Standortes sind die Zahl der Einwohner, Arbeitsplätze, Einkaufsstätten, Schulen und die Zentralität des Ortes. Die Strukturmerkmale und die räumliche Lage der Standorte werden auf Verkehrszellen bezogen, die die Siedlungsschwerpunkte repräsentieren.

Das *Verkehrswegenetz* besteht aus dem Straßennetz, dem Schienennetz und dem Fußwegenetz. Das Straßennetz ist der Verkehrsträger für die Busfahrzeuge, und das Schienennetz ist der Verkehrsträger für die Schienenfahrzeuge. Fußwege verbinden die Siedlungsschwerpunkte mit dem Straßen- und dem Schienennetz. Die Strecken des Verkehrswegenetzes werden mit den Merkmalen Streckentyp und Streckenlänge in ein Netzmodell eingegeben. Vorhandene Bahnhöfe und Bushaltestellen können ebenfalls als Teil des Wegenetzes aufgefaßt werden.

Das *Bahnangebot* ist Teil des öffentlichen Verkehrs. Wenn die Buslinien mit den Zuglinien zeitlich koordiniert werden sollen, bilden die Abfahrtszeiten und Ankunftszeiten der Zuglinien Vorgaben für die Angebotsplanung. Dazu müssen der Linienverlauf und der Fahrplan der Zuglinien im Netzmodell abgebildet werden. Das gilt analog für Buslinien, die nicht Gegenstand der Planung sind, für die Fahrgäste jedoch ein unverzichtbares Element des gesamten Verkehrsangebotes darstellen.

Die Siedlungsstrukturdaten, das Verkehrswegenetz und das Bahnangebot werden einmal zu Beginn des Planungsprozesses zusammengestellt und bilden das Grundgerüst des Netzmodells für den weiteren Planungsprozeß.

### 2.5.2 Verkehrsnachfrage

Für die Angebotsplanung kann die Matrix der Verkehrsnachfrage in unterschiedlichen Qualitäten vorliegen:

- *Relativwerte* der Verkehrsnachfrage beschreiben die relative Bedeutung einer Beziehung verglichen mit den anderen Beziehungen eines Untersuchungsgebietes. Sie ist ausreichend für die Festlegung der Form des Liniennetzes und die Ermittlung mittlerer Kennwerte, die die Angebotsqualität einer Zelle oder des Liniennetzes beschreiben (Reisezeit, Umsteigehäufigkeit, Bedienungshäufigkeit ...).
- *Absolutwerte* der Verkehrsnachfrage geben für jede Beziehung die Zahl der Personenfahrten in einem Zeitraum an. Absolutwerte sind zur Dimensionierung eines Angebotes erforderlich, wenn die Belastung von Linien oder einzelner Linienfahrten und die Wahrscheinlichkeit der Nachfrage einer Bedarfshaltestelle bestimmt werden muß. Außerdem setzt eine Berechnung von Fahrgeldeinnahmen Absolutwerte voraus.

Da die ÖPNV-Angebotsplanung für den ländlichen Raum mit Ausnahme des Schülerverkehrs kein Dimensionierungsproblem darstellt, reicht für den Entwurf eine Nachfragematrix aus, die die relative Bedeutung der Beziehungen enthält. Sie kann, sofern keine zuverlässigen Werte bekannt sind, aus den Strukturdaten und dem Verkehrsangebot mit Verkehrserzeugungs- und Verkehrsverteilungsmodellen abgeschätzt werden.

Für ein ÖPNV-Angebot, das innerhalb des Untersuchungszeitraumes nicht konstant ist, d.h. Taktsprünge oder unregelmäßige Abfahrtszeiten aufweist, ergeben sich von der Tageszeit abhängige Kennwerte. In diesem Fall muß zusätzlich zur Verkehrsnachfrage für jeden Fahrtzweck eine Ganglinie der Abgangs- bzw. der Ankunftszeiten angegeben werden. Die Nachfragematrizen müssen dabei getrennt für den Hinweg und den Rückweg als Fahrtenmatrizen und nicht als Verkehrsbeziehungsmatrizen vorliegen.

Aus dem Typ der Kenngröße, die ermittelt werden soll, lassen sich Anforderungen an die Genauigkeit der Verkehrsnachfrage ableiten (**Tabelle 2.5**). Bei unzureichender Kenntnis der Verkehrsnachfrage muß der Planer bei den Kenngrößen, die unmittelbar von der Genauigkeit der Verkehrsnachfrage abhängen, dementsprechend "auf der sicheren Seite liegen" oder mit dem Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge, mit geringeren Einnahmen und mit Verspätungen der Bedarfsbusse rechnen.

Kenngröße	Verkehrsnachfrage		Ganglinie der Abgangs- bzw. Ankunftszeiten	
	Relativwerte	Absolutwerte	geschätzt	genau
Belastung einer Linie		×	×	
Belastung einer Linienfahrt Auslastung eines Fahrzeuges		×		×
mittlere Reisezeit	×		×	
mittlere Reiseweite	×		×	
mittlere Umsteigehäufigkeit	×		×	
mittlere Bedienungshäufigkeit	×		×	
Wahrscheinlichkeit der Nachfrage einer Bedarfshaltestelle		×		×
Einnahmen		×	×	

Tab. 2.5: Anforderungen an die Genauigkeit der Verkehrsnachfrage und der Ganglinie

Um die benutzerbezogenen Kenngrößen auf die Zahl der Einwohner beziehen zu können, wird eine Einwohnermatrix erstellt. Die Umlegung dieser Einwohnermatrix auf das ÖPNV-Angebot ermöglicht Aussagen wie "50 % der Einwohner werden mindestens 10 Fahrten in den nächsten zentralen Ort angeboten". Eine derartige Matrix weist als Quellverkehrsaufkommen einer Verkehrszelle ihre Einwohnerzahl auf, d.h. es wird eine Fahrt pro Einwohner unterstellt. Die Verteilung der Zeilensumme kann sich dann entweder auf eine Spalte "nächstes Zentrum" beschränken oder auf mehrere Spalten z.B. entsprechend der vorhandenen Nachfrage aufgeteilt werden.

Methoden zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage und der Einflüsse der Angebotsqualität auf die Verkehrsnachfrage werden in dieser Arbeit nicht erörtert. Die Verkehrsnachfrage wird innerhalb des Prozesses der ÖPNV-Angebotsplanung als vorgegebene Größe angesehen und den Eingangsgrößen zugeordnet.

### 2.5.3 Kostendaten für Fahrer und Fahrzeuge

Um die Betriebskosten eines geplanten ÖPNV-Angebotes berechnen zu können, sind Kostendaten für die

- fixen Fahrzeugkosten,
- laufleistungsabhängigen Fahrzeugkosten und
- Personalkosten

erforderlich. Darüber hinaus müssen die rechtlichen und tariflichen Vorschriften über die Arbeitszeit bekannt sein. Die betrieblichen Kenngrößen und die Kosten für das heutige ÖPNV-Angebot können nicht berechnet, sondern müssen von den Betreibern erfragt werden.

Die *fixen Fahrzeugkosten* beinhalten die Kosten für Versicherungen, Steuern, Reinigung, Fahrzeugreserve und Management. Dazu kommen für jedes Fahrzeug die anteiligen Kosten der Gebäude- und Werkstattabschreibung.

Die *laufleistungsabhängigen Fahrzeugkosten* umfassen die Kapitalkosten, Kraftstoffkosten, Wartungs- und Reparaturkosten. Die Kapitalkosten (Fahrzeugabschreibung und Verzinsung) sind dann laufleistungsabhängig, wenn die Fahrzeuganschaffungskosten und die Kapitalzinsen gleichmäßig über die gesamte Nutzungsdauer des Fahrzeuges verteilt werden und die Nutzungsdauer von der Kilometerleistung abhängt.

Auf die *Personalkosten* entfällt der größte Anteil der Kosten. Die Fahrer werden nach Arbeitsstunden bezahlt. Zur Arbeitszeit zählen dabei neben den Zeiten zur Fahrgastbeförderung auch die Einsetz- und Aussetzzeiten, Warte-, Steh- und Wendezeiten und Zeiten für Vor- und Abschlußarbeiten.

**Tabelle 2.6** enthält eine Aufstellung der Kostensätze für das Jahr 1993, die in die Kostenrechnung eingehen. Sie gelten für den Busbetrieb in ländlichen Räumen, der sich von städtischen Bereichen vor allem durch eine höhere mittlere Geschwindigkeit und somit durch höhere Fahrleistungen pro Fahrzeug auszeichnet. Bei den Kostensätzen handelt es sich um Anhaltswerte. Die Zuverlässigkeit und die allgemeine Gültigkeit der Werte schwankt besonders bei den fahrzeugbezogenen Kostensätzen. Weitere Kostensätze finden sich bei SCHUSTER (1992) und LEUTHARDT (1994).

Die *Kapitalkosten* ergeben sich aus dem erforderlichen Kredit zur Fahrzeuganschaffung, dem Zinssatz und der Abschreibungsdauer. Die Fahrzeuganschaffung wird derzeit durch Mittel des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes (GVFG) mit bis zu 50 % der Anschaffungskosten gefördert, so daß sich die Kreditsumme halbieren kann. Der Neupreis eines Fahrzeuges hängt von der Fahrzeuggröße und der Ausstattung ab. Im Gegensatz zu den Standardbussen sind für die selten eingesetzten Kleinbusse zuverlässige Neupreise nicht verfügbar. Für Kleinbusse mit 15 bis 20 Sitzplätzen schwanken die Preise zwischen 120.000 und 220.000 DM. Fahrzeuge, die auf der Basis eines Lkw-Transporters aufgebaut werden, sind i.d.R. preiswerter als Fahrzeuge mit robusteren Busfahrzeuggestellen.

Die *Abschreibungsdauer* ergibt sich aus der Laufleistung und der Lebensdauer der Fahrzeuge. SACK/BONSACK (1993) stellen fest, daß die veröffentlichten Ergebnisse über die optimale Nutzungsdauer von Omnibussen zwischen fünf und 13 Jahren schwanken. Im Gegensatz zu



gebrauchten Pkw gibt es keine Preisliste für gebrauchte Busse, so daß Hinweise über die Entwicklung des Restwertes eines Busses in Abhängigkeit von der Fahrleistung und dem Alter fehlen. LEUTHARDT (1991) ermittelt den Restwert für städtische Busse mit Hilfe eines Altersfaktors AF, der das Fahrzeugalter (Nutzungsdauer ND) und die jährlichen Fahrleistung JFL in ein fiktives Alter umrechnet:

$$AF = ND \times (0,6 + 0,4 \times [JFL/50\,000])$$

LEUTHARDT unterstellt dabei, daß bei einem Fahrzeug mit einer jährlichen Fahrleistung von 50.000 km das Alter zu 60 % und die Fahrleistung zu 40 % das fiktive Alter und somit den Restwert bestimmen.

<b>Personal</b>			
Personalkosten	42 DM/Stunde		
<b>Kapitalkosten</b>	Standardbus	Midibus	Kleinbus
Neupreis	430.000 DM	350.000 DM	200.000 DM
Restwert	30.000 DM	20.000 DM	10.000 DM
Nutzungsdauer eines Fahrzeugs	10-12 Jahre, 0,8-1,0 Mio.km	10-12 Jahre, 0,8-1,0 Mio.km	8-10 Jahre, 0,4-0,5 Mio.km
Zinssatz für Kapitalverzinsung	8 Prozent		
Förderung der Fahrzeuganschaffung (GVFG-Mittel)	variabel, bis zu 50 % der Anschaffungskosten		
<b>Fixe Fahrzeugkosten</b>	Standardbus	Midibus	Kleinbus
Reinigungskosten	8.000 DM/Jahr	7.000 DM/Jahr	6.000 DM/Jahr
Versicherung, Steuern, Gebäudeabschreibung, Management	17.000 DM/Jahr	17.000 DM/Jahr	16.000 DM/Jahr
<b>Laufleistungsabhängige Fahrzeugkosten</b>	Standardbus	Midibus	Kleinbus
Kraftstoffkosten	30 DM/100 km	25 DM/100 km	20 DM/100 km
Reparaturkosten	25 DM/100 km	25 DM/100 km	20 DM/100 km
<b>Fahrzeugreserve</b>			
Anteil der Reservefahrzeuge	10 Prozent		

Tab. 2.6: Kostensätze für den Busbetrieb im ländlichen Raum, Kostenstand 1993  
(Quelle: Regionalverkehr Oberbayern GmbH, Nutzfahrzeug-Katalog 93/94)

In den *fixen Fahrzeugkosten* sind mittlere anteilige Kosten pro Fahrzeug für Reinigung, Versicherung, Steuer, Gebäudeabschreibung (Stellplatz, Betriebshof, Haltestelleneinrichtungen) und Management enthalten. Die abgeminderten Werte der fixen Fahrzeugkosten für Midibusse und Kleinbusse wurden aus den bekannten Werten für den Standardbus abgeleitet.

Die *laufleistungsabhängigen Fahrzeugkosten* für Kraftstoff, Reparatur und Wartung sind abhängig von der Fahrzeuggröße, dem Fahrzeugalter und dem Kraftstoff- bzw. Reparaturpreis. LEUTHARDT (1991) gibt eine Kurve für den Zusammenhang zwischen Kraftstoffverbrauch und Gesamtkilometerstand an. Danach verbraucht ein Fahrzeug mit 0,8 Mio. gefahrenen Kilometern etwa 6 % mehr als ein entsprechendes Neufahrzeug. Verglichen mit dem aktuellen Kraftstoffpreis und den von der Topographie und der Linienführung (Haltestellenabstände) beeinflussten Verbrauchsschwankungen können solche Zusammenhänge für eine Kostenabschätzung im Rahmen der Angebotsplanung vernachlässigt werden. Die aufgeführten Werte für die Kraftstoffkosten unterstellen einen Kraftstoffpreis von 1,00 DM/Liter. Die Verbrauchswerte beziehen sich auf ein Fahrzeug mit Schaltgetriebe im flachen, ländlichen Raum.

Die *Fahrzeugreserve* (Werkstatt- und Betriebsreserve) bezieht sich auf die Anzahl der maximal gleichzeitig eingesetzten Fahrzeuge. Die Kosten für die Fahrzeugreserve müssen anteilig auf jedes Fahrzeug verteilt werden.

#### 2.5.4 Rechtliche Vorgaben

Die rechtlichen Vorgaben betreffen in dem hier behandelten Zusammenhang die Arbeitszeit der Fahrer. In der Fahrpersonalverordnung (1993) und im bayerischen Manteltarifvertrag für das private Omnibusgewerbe (LANDESVBAND BAYERISCHER OMNIBUSUNTERNEHMER, 1991) sind die Vorschriften für die Arbeitszeit niedergelegt. Danach gelten für den Linienverkehr bis 50 Kilometer u.a. folgende Regelungen:

1. Als *Arbeitszeit* zu werten sind die Lenkzeit, die Zeit für Vor- und Abschlußarbeiten (30 Minuten pro Tag) und die Zeit für die Fahrscheinabrechnung (Zwei Stunden pro Monat). Dazu kommt unter Umständen der Zeitaufwand für Reparatur-, Wartungs- und Pflegearbeiten.
2. Die *tägliche Arbeitszeit* kann bis zu 10 Stunden betragen. Bei einem geteilten Dienst darf die tägliche Arbeitszeit bis auf 14 Stunden verlängert werden.
3. Ein *geteilter Dienst* ist dann möglich, wenn die Dienstunterbrechung am Wohnort des Arbeitnehmers oder am Betriebssitz erfolgt und mehr als zwei Stunden dauert. Es ist nur eine Teilung pro Arbeitstag zulässig.
4. Die *Pause* innerhalb einer Arbeitsschicht kann auf eine 30-Minuten-Pause, auf zwei 20-Minuten-Pausen oder auf drei 15-Minuten-Pausen verteilt werden. 10-Minuten-Pausen sind zulässig, wenn innerhalb der Arbeitsschicht ein Sechstel der Lenkzeit pausiert wird (Sechstelregelung). Die maximale zusammenhängende Lenkzeit darf 4½ Stunden nicht überschreiten.
5. Die Dauer der *unbezahlten Pausen* richtet sich nach der Dauer der Arbeitsschicht. Bei einer Arbeitsschicht bis zu 8 Stunden können 30 Minuten als unbezahlte Pause berechnet werden. Bei einer längeren Arbeitsschicht sind 60 Minuten als unbezahlte Pause zulässig. Bei geteilten Diensten oder bei Anwendung der Sechstelregelung müssen alle Pausen bezahlt werden.
6. Die *Warte-, Steh- und Lenkzeiten* zählen abzüglich der unbezahlten Pausen zur Arbeitszeit und sind voll zu bezahlen.

Der Bayerische Manteltarifvertrag enthält außerdem Angaben über die Zulagen für Nacht-, Sonn- und Feiertagsarbeit, die das Ergebnis der Kostenberechnung beeinflussen. Danach wird für die Nachtarbeit von Montag bis Samstag zwischen 20.00 und 5.00 Uhr ein Zuschlag von 20 % zum tariflichen Grundlohn bezahlt. Bei Sonntagsarbeit zwischen 0.00 Uhr und 24.00 Uhr beträgt der Zuschlag 50 %, bei Feiertagsarbeit 100 %.

Aus den rechtlichen Vorgaben lassen sich für eine Fahrereinsatzplanung folgende Aussagen ableiten:

- Wenige lange Pausen sind kostengünstiger als viele kurze Pausen. Insbesondere die Sechstelregelung verursacht Kosten, da die Pausen voll bezahlt werden müssen.
- Geteilte Dienste sind teurer als normale Dienste, da hier alle Pausen bezahlt werden müssen.
- Bei normalen Diensten bringen Arbeitszeiten über 8 Stunden geringere Kosten, wenn Pausen von mehr als 30 Minuten anfallen.

Die obigen Aussagen sind nicht allgemein gültig. Sie hängen von tariflichen Regelungen ab, die regional unterschiedlich sind und in der Phase der Zustandsanalyse erfragt werden müssen.

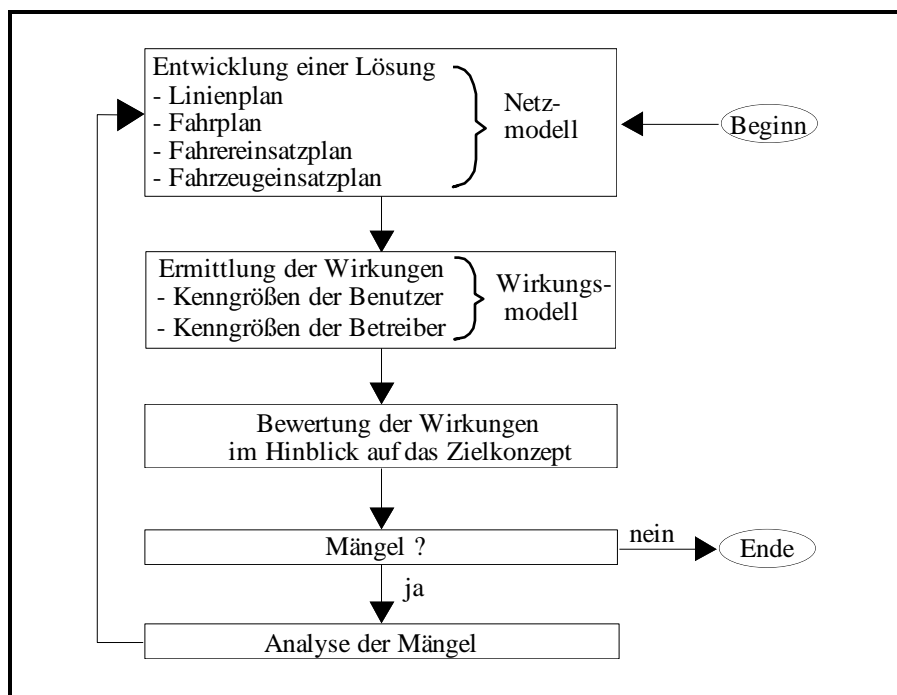
### 3 Ablauf des rechnergestützten Entwurfsprozesses

#### 3.1 Überblick

**Abbildung 3.1** zeigt den Ablauf des Entwurfsprozesses, der sich in die Arbeitsschritte

- Entwicklung einer Lösung,
- Ermittlung der Wirkungen,
- Bewertung der Wirkungen und
- Analyse von Mängeln

gliedert. Die Arbeitsschritte sind miteinander rückgekoppelt. Sie werden solange durchgeführt, bis sich eine befriedigende Lösung, die den Anforderungen des Zielkonzeptes genügt, ergibt.



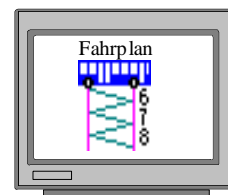
**Abb. 3.1:** Ablauf des Entwurfsprozesses

Dieser Entwurfsprozeß läßt sich in seiner Gesamtheit nicht als geschlossenes mathematisches Modell darstellen, das auf direktem Weg zu einer optimalen Lösung führt. Da jede Straßenstrecke Bestandteil einer Linie sein kann und jede Abfahrtszeit verändert werden kann, sind die Freiheitsgrade des Systems und der Aufwand für eine Optimierung sehr hoch. Um das System für eine Optimierung handhabbar zu machen, wären stark vereinfachende Annahmen notwendig, die die Lösungsvielfalt einschränken und damit die Lösungsqualität beeinflussen würden. Darüber hinaus ließen sich die zahlreichen ortsspezifischen Randbedingungen, insbesondere zeitlich gebundene Verstärkerfahrten für den Schülerverkehr, nur sehr aufwendig in ein Optimierungsmodell einbauen. Eine automatisierte Entscheidungsfindung, die sich auf die Ergebnisse einer Black-Box verläßt, blockiert außerdem notwendige Einblicke und kritische Betrachtungen und verhindert damit spezielle, zielgerichtete Eingriffe in den Entwurfsprozeß (vgl. KRUG, 1987).

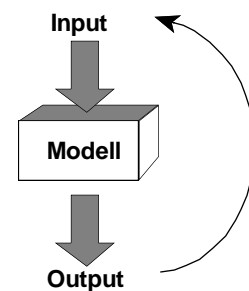
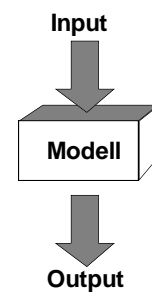
Wegen der Grenzen und Nachteile geschlossener Optimierungsverfahren, kann nur ein rechnergestütztes Entwurfsverfahren eingesetzt werden, bei dem es zu einer Aufgabenteilung zwischen Planer und Rechner kommt. Bei der Entwicklung einer Lösung erstellt der Planer die Pläne des ÖPNV-Angebotes bzw. verändert die Pläne der vorausgegangenen Lösung. Die Daten der Papierdokumente Linienplan, Fahrplan, Fahrer- und Fahrzeugeinsatzplan werden in Rechnerdokumente transformiert und bilden ein Netzmodell, das der Planer bearbeitet. Der Rechner unterstützt den Planer dadurch, daß er den Informationsgehalt der einzelnen Papierdokumente verknüpft und dem Planer wichtige Zusammenhänge visualisiert. Das Netzmodell liefert dann die Eingangsgrößen für die Berechnungen der Wirkungen. Das eingesetzte Wirkungsmodell besteht aus einem Benutzermodell und einem Betreibermodell. Das Benutzermodell simuliert das Verbindungswahlverhalten der Benutzer und bestimmt so die Kenngrößen zur Beurteilung der Angebotsqualität. Das Betreibermodell ermittelt aus den Einsatzplänen den betrieblichen Aufwand und berechnet daraus den finanziellen Aufwand einer Lösung. Für jeden Angebotszustand werden die bei der Wirkungsermittlung berechneten Kennwerte des Angebotes vom Rechner mit vorgegebenen Anspruchsniveaus verglichen oder den Kennwerten des vorhandenen Angebotes gegenübergestellt. Die Ursachen von Mängeln, die in der Bewertung erkannt und in der Mängelanalyse lokalisiert werden können, bilden die Grundlage für eine zielgerichtete Veränderung des Angebotes durch den Planer im nächsten Iterationsschritt des Entwurfsprozesses.

Im rechnergestützten Entwurfsprozeß werden drei Klassen von EDV-Programmen eingesetzt:

1. Programme, die die Daten einer Planung verwalten, darstellen und die Änderungen der Daten ermöglichen, werden als *Dialogprogramme* bezeichnet. Diese Programme bilden die Schnittstelle für einen interaktiven Mensch-Maschine Dialog. Sie ermöglichen die Eingabe bzw. Modifikation von Daten und prüfen die Eingabedaten durch Plausibilitätskontrollen. Sie unterstützen den Anwender, indem sie den Informationsgehalt momentan wichtiger Daten einfach und anschaulich, z.B. graphisch, darstellen. Im Entwurfsprozeß wird ein Dialogprogramm zur Verwaltung von Verkehrswegenetz-, Linienplan-, Fahrplan-, Einsatzplan- und Nachfragedaten und zur Darstellung der Berechnungs- und Bewertungsergebnisse eingesetzt. Die problemorientierte Verknüpfung der Daten durch das Dialogprogramm ermöglicht es, die Zusammenhänge eines ÖPNV-Angebotes zu visualisieren. Auf diese Weise unterstützt, kann der Planer die Inputdaten für die Wirkungsermittlung leichter modifizieren. Das Dialogprogramm orientiert sich an der Struktur der Entwurfsaufgabe und schafft dadurch die Voraussetzung, daß der Planer Ideen und Strategien schnell umzusetzen und auf ihre Wirksamkeit überprüfen kann. Das erfordert unter anderem, daß die beiden folgenden Programmklassen in das Dialogprogramm integriert werden.



2. Programme, die stets einem gleichen Rechenablauf gehorchen und für einen vorgegebenen Input den zugehörigen Output bestimmen, werden *Berechnungsprogramme* genannt. Der Input hat eine Form, aus dem mit Hilfe einer Rechenanweisung ohne weiteren menschlichen Eingriff ein Output abgeleitet wird. Berechnungsprogramme werden im Entwurfsprozeß für die Berechnung und die Bewertung der Wirkungen eines ÖPNV-Angebotes eingesetzt. Input ist das ÖPNV-Angebot in Form eines Netzmodells, dessen Wirkungen mit Hilfe eines Wirkungsmodells ermittelt und bewertet werden.
3. Programme, die unter Anwendung von Methoden des Operations Research Vorschläge für die Lösungen einer Aufgabe ermitteln, heißen *Optimierungsprogramme*. Sie verändern den Input eines Wirkungsmodells solange, bis sich für den Output eine optimale oder zumindest eine befriedigende, suboptimale Lösung ergibt. Optimierungsprogramme können dem Planer Lösungen für Teilaufgaben des Entwurfsprozesses, z.B. Ermittlung eines optimalen Fahrereinsatzes, vorschlagen.



Dieses Kapitel stellt die einzelnen Arbeitsschritte des Entwurfsprozesses vor. Für Arbeitsschritte, die den Einsatz von EDV-Programmen erlauben bzw. erfordern, werden die Anforderungen an die Programme festgelegt. Der Aufbau der Modelle und die Algorithmen der Programme werden dann im anschließenden Kapitel behandelt.

### 3.2 Entwicklung einer Lösung

Um die Entwurfsaufgabe zu strukturieren, werden die rückgekoppelte Entwurfsstufen

- Grobentwurf,
- Feinentwurf und
- Detailentwurf

unterschieden, die der Planer durchläuft, um ein Konzept in ein konkretes, umsetzbares Angebot zu überführen.

Beim *Grobentwurf* wird ein Linienkonzzept erstellt. Ausgehend vom Bahnangebot und der zentralörtlichen Struktur, werden vorrangig an Bahnhöfen und in zentralen Orten Zeitknoten festgelegt. Die Zeitknoten werden durch Linien verbunden, die ein Grundnetz bilden.

Der *Feinentwurf* legt für jede Linie den genauen Linienverlauf fest. Für jede Linie wird ein Umlaufschema gewählt und an die durch die Zeitknoten vorgegebenen Fahrplanzeiten angepaßt. Die Angebotsplanung umfaßt beim Feinentwurf alle Linien und Richtungsbänder. Die Wirkungsermittlung beschränkt sich aus Gründen der Übersichtlichkeit i.d.R. auf die Gemeindeebene, d.h. das Netzmodell enthält als Verkehrszellen nur die Hauptorte der Gemeinden.

An den Feinentwurf schließt sich ein *Detailentwurf* an, der sich vom Feinentwurf nur dadurch unterscheidet, daß bei der Wirkungsermittlung alle Orte einbezogen werden. Der Detailentwurf dient der abschließenden Überprüfung einer Lösung und wird wegen der methodischen Übereinstimmung mit dem Feinentwurf im folgenden nicht weiter behandelt.

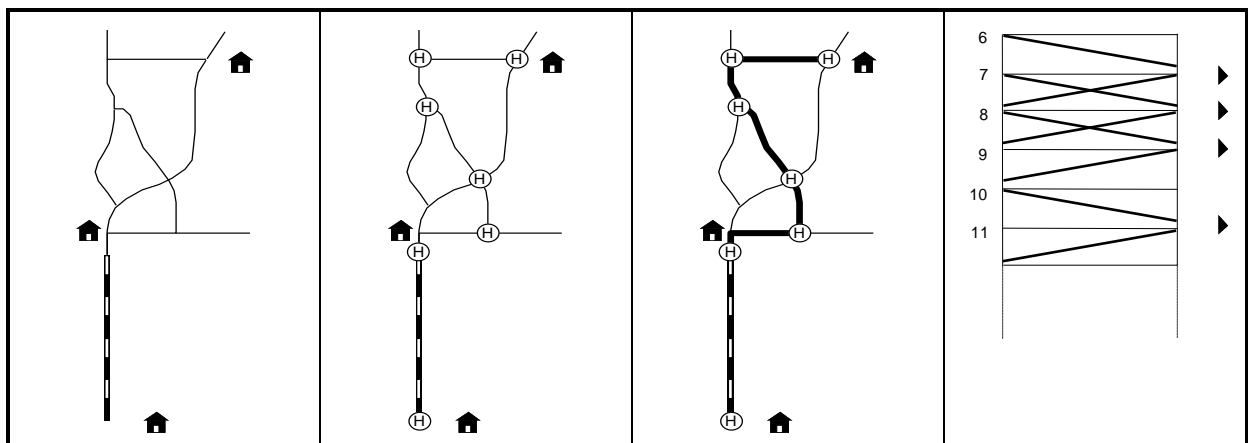
### 3.2.1 Erstellung eines Netzmodells

Die Ausprägung eines ÖPNV-Angebotes ist im Liniennplan, im Fahrplan und in Fahrer- und Fahrzeugeinsatzplänen niedergelegt. Diese Papierdokumente müssen für den rechnergestützten Entwurfsprozeß in Rechnerdokumente transformiert werden. Zusammen mit den Verkehrszellen und den Straßen- und Schienennetzdaten bilden die Pläne des ÖPNV-Angebotes ein Netzmodell, das die räumliche und zeitliche Struktur des Angebotes beschreibt. Ein Netzmodell, das die Eigenschaften des ÖPNV berücksichtigt, setzt sich aus

- den Punktoobjekten Verkehrszelle und Haltestelle,
- den Streckenobjekten Straßenstrecke und Schienenstrecke,
- den Linienobjekten Bedarfsbuslinie, Buslinie, Straßenbahnlinie, U-Bahnlinie und Zuglinie

zusammen. Bei dem Entwurf eines ÖPNV-Angebotes sind die Verkehrszellen sowie die Straßen- und Schienenstrecken i.d.R. vorgegeben und können nicht verändert werden. Aus der trivialen Bedingung, daß Busse nur auf dem Straßennetz und Züge nur auf Schienen fahren können, ergibt sich für die Erstellung eines Netzmodells die in **Abbildung 3.2** dargestellte Reihenfolge.

Der erste Schritt, die Eingabe des Verkehrswegenetzes und der Verkehrszellen, wird einmal zu Beginn des Planungsprozesses durchgeführt und bildet das Grundgerüst des Netzmodells. Dazu werden z.B. Digitalisiergeräte eingesetzt. In diesem Schritt erfolgt auch die Eingabe der Bahnlinien und der Bahnhöfe, die als Vorgabe in den Entwurfsprozeß eingehen. Danach sind die Haltestellen und die Fußwege zu den Haltestellen einzugeben. Während eine Modifikation der Haltestellendaten innerhalb einer Planung nur selten durchzuführen ist, müssen die Liniendaten (Schritte 3 und 4) beim Entwurfsprozeß häufig verändert werden. Daraus ergeben sich die Forderungen an ein Dialogprogramm zur Dateneingabe. Das Dialogprogramm soll Änderungen am Netzmodell schnell und einfach ermöglichen. Dabei müssen die Netz- und Fahrplanzusammenhänge erkennbar sein. Die Elemente des Netzmodells, Vorschläge für die Eingabe der Netzdaten und Möglichkeiten für Plausibilitätskontrollen werden im Kapitel 4.2 beschrieben.



1. Schritt: Streckennetz mit <ul style="list-style-type: none"><li>• Straßennetz,</li><li>• Schienennetz,</li><li>• Verkehrszellen.</li></ul>	2. Schritt: <ul style="list-style-type: none"><li>• Haltestellen,</li><li>• Fußwege.</li></ul>	3. Schritt: Liniennetz mit <ul style="list-style-type: none"><li>• Linienführung,</li><li>• relativen Fahrzeiten.</li></ul>	4. Schritt: Fahrten der Linien mit <ul style="list-style-type: none"><li>• Abfahrtszeiten,</li><li>• Fahrereinsatz,</li><li>• Fahrzeugeinsatz.</li></ul>
--	--	--	--

Abb. 3.2: Arbeitsschritte bei der Erstellung eines Netzmodells



### 3.2.2 Grobentwurf

Beim Grobentwurf legt der Planer die Grundstruktur des geplanten ÖPNV-Angebotes fest. Als Eingangsdaten berücksichtigt der Grobentwurf

- die zentralen Orte des Untersuchungsgebietes und benachbarter Räume,
- die Abfahrts- und Ankunftszeiten der Züge an zentralen Bahnhöfen,
- die Fahrzeiten zwischen den zentralen Orten,
- die Verkehrsbeziehungen zwischen den zentralen Orten.

Mit diesen Eingangsdaten wird in drei Schritten ein Linienkonzept erstellt:

1. Festlegung der Zeitknoten (Umsteigehaltestellen).
2. Verbindung der Zeitknoten.
3. Verdichtung des Liniennetzes.

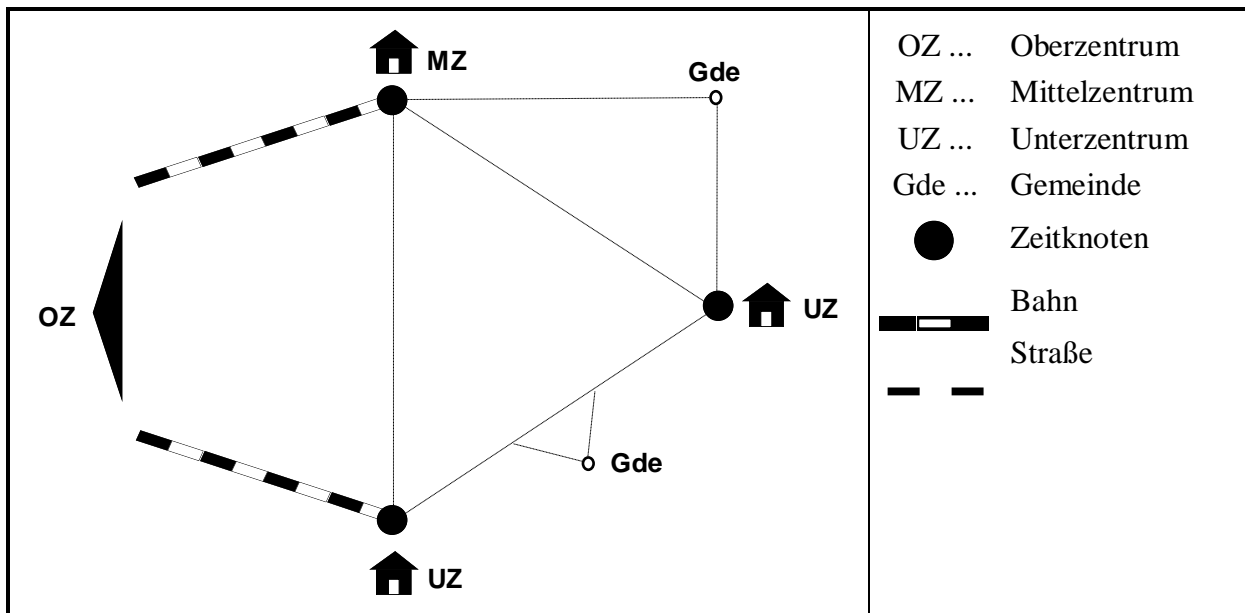
Der Grobentwurf erfolgt i.d.R. manuell. Natürlich ist auch in dieser Entwurfsphase der Rechner-einsatz möglich, d.h. der Planer erstellt zunächst ein vereinfachtes Netzmodell, das

- als Verkehrszellen nur die zentralen Orte,
- als Haltestellen nur die Zeitknoten,
- als Linien nur vereinfachte Linien mit den Anfangs-, End- und Umsteigehaltestellen,
- als Fahrplan nur getaktete Fahrten ohne Verdichtung und Verstärkerfahrten und
- als Verkehrsnachfrage nur die wichtigsten Beziehungen

enthält. Der Netzmodell wird dann in den nachfolgenden Arbeitsschritten sukzessive verfeinert.

### Festlegung von Zeitknoten

Die Zeitknoten werden in Abhängigkeit von der räumlichen Geometrie des Netzes und der zentralörtlichen Struktur festgelegt. Dabei wird darauf geachtet, daß der Abstand der Zeitknoten mit einer Linienlänge korrespondiert, für die die Umlaufzeit mit dem Systemtakt oder einem Vielfachen des Systemtaktes übereinstimmt. Als Zeitknoten eignen sich vor allem zentrale Orte und Bahnhöfe (**Abbildung 3.3**). Sie können auch außerhalb des Untersuchungsgebietes liegen.



**Abb. 3.3:** 1. Schritt: Festlegung von Zeitknoten

Bei jedem Pulsschlag, der durch den Systemtakt vorgegeben wird, treffen sich die Fahrzeuge mehrerer Linien an den Zeitknoten und ermöglichen so auch bei großen Fahrzeugfolgezeiten regelmäßige und kurze Umsteigevorgänge. Bei den Zeitknoten kann unterschieden werden zwischen

- Endknoten, die gleichzeitig Umsteigehaltestelle für die Fahrgäste und Endhaltestelle für die Linien sind und
- Kreuzungsknoten, an denen sich zwei Linien räumlich und zeitlich schneiden.

Die geometrischen Voraussetzungen für die zeitliche Koordinierung zweier Linien an einer Kreuzungshaltestelle zeigt **Abbildung 3.4**. Im linken Teil der Abbildung ist die Verknüpfung zweier Linien mit annähernd gleicher Länge dargestellt. Bei gleichem Takt sind die Umsteigebeziehungen  $1 \rightarrow 3$  und  $4 \rightarrow 2$  zur selben Zeit möglich. Die Umsteigebeziehungen  $3 \rightarrow 1$  und  $2 \rightarrow 4$  der Gegenrichtung finden zeitlich verschoben statt. Da auf jeder Linie nur ein Fahrzeug eingesetzt wird, können nur zwei der vier möglichen Umsteigebeziehungen realisiert werden. Wird die Fahrzeugzahl auf der Linie 1, wie in der rechten Abbildung gezeigt, erhöht, dann sind alle vier Umsteigebeziehungen im Zeitabstand des Taktes  $T_2$  möglich. Allerdings wird nicht für jede Fahrt der Linie 1 an der Umsteigehaltestelle ein Anschluß nach 3 bzw. 4 angeboten, da der Takt  $T_1$  auf ein ganzzahliges Vielfaches des Systemtaktes  $T_2$  verdichtet wird.

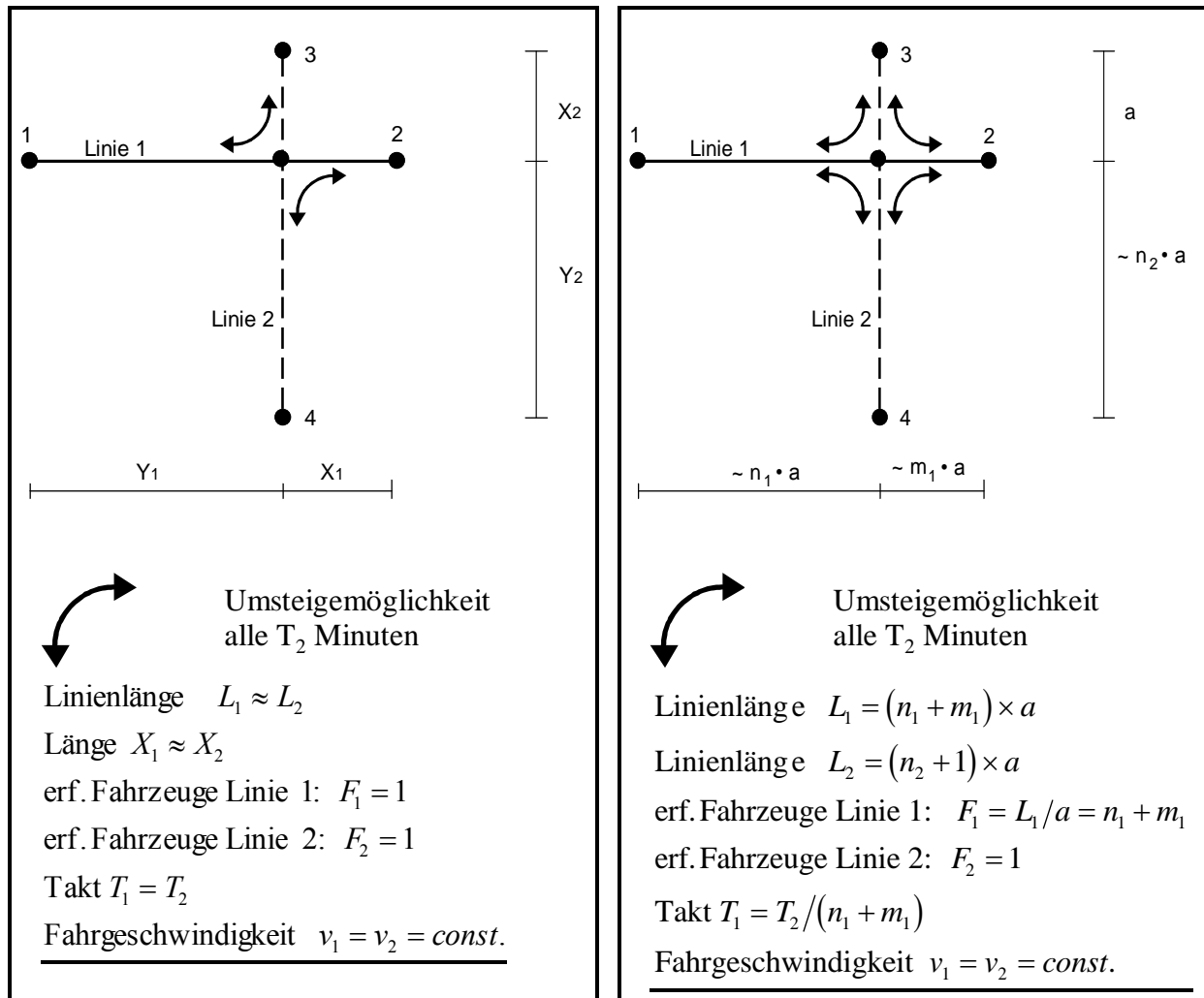


Abb. 3.4: Geometrische Voraussetzungen zur Anschlußsicherung an einer Kreuzungshaltestelle

### Verbindung der Zeitknoten

Bei der Verbindung der Zeitknoten durch Linien sind die zeitlichen Verknüpfungen der Linien an den Zeitknoten zu berücksichtigen. Die Verknüpfungsmöglichkeiten sind auch bei einem getakteten System begrenzt. Besondere Aufmerksamkeit erfordern daher Linien, die zwei Zeitknoten mit vorgegebenen Abfahrts- und Ankunftszeiten verknüpfen. In **Abbildung 3.5** gilt das für die Linie, die die beiden Bahnhöfe miteinander verbindet, wo die Zeiten der Züge vorgegeben sind. Die Verbindung zweier Bahnhöfe durch eine Linie ist mit Anschlußsicherung oft nur dann möglich, wenn an den Bahnhöfen eine getaktete Zugfolge angeboten wird, die dichter als der Systemtakt ist.

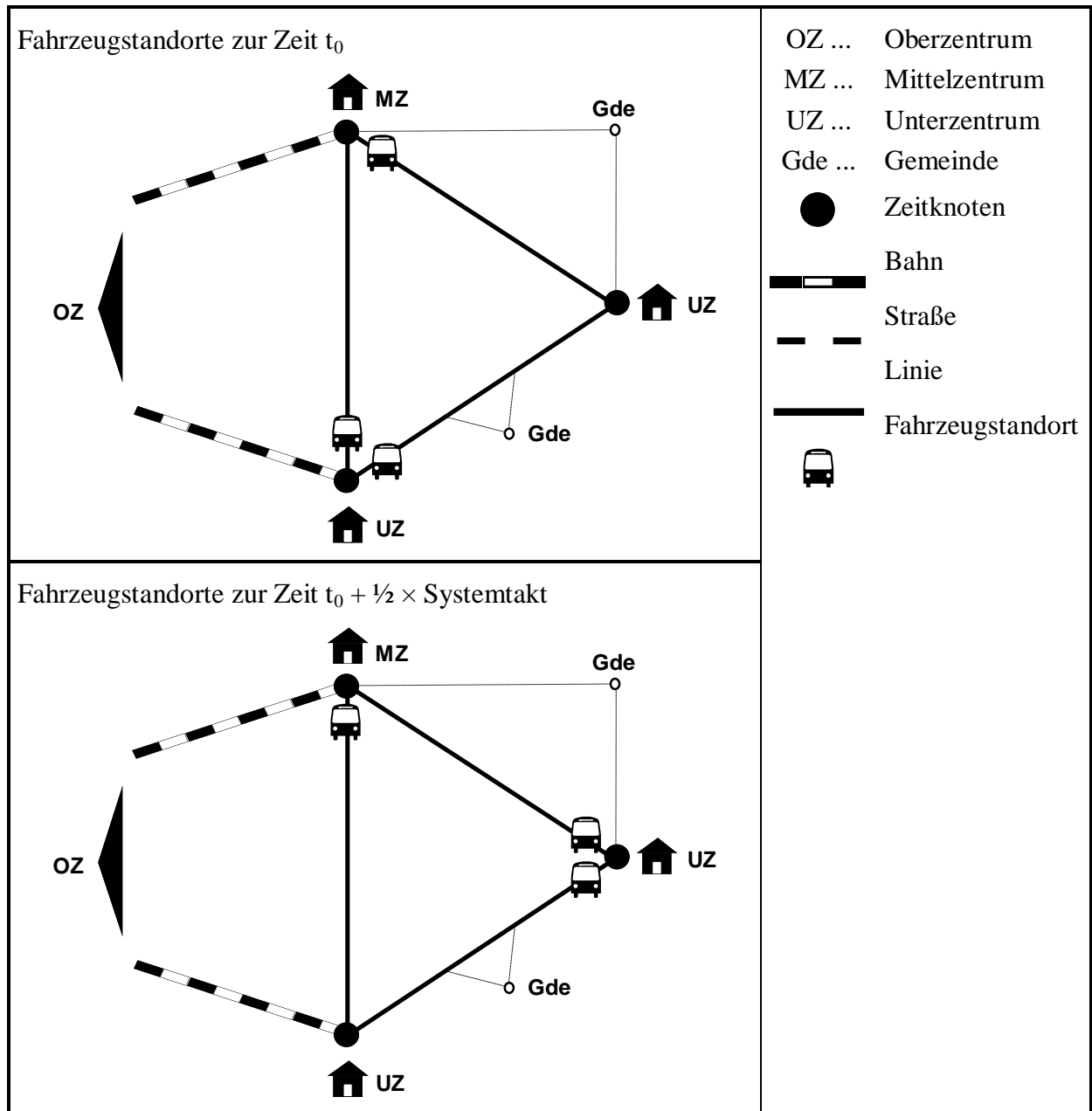


Abb. 3.5: 2. Schritt: Verbindung der Zeitknoten und Verknüpfung der Linien an den Zeitknoten

### Verdichtung des Liniennetzes

Durch die Verbindung der Zeitknoten entsteht ein Grundnetz, das weitgehend mit dem Verkehrsnetz 1. Grades übereinstimmt. Dieses Grundnetz wird anschließend so verdichtet, daß jede Gemeinde an das Liniennetz angeschlossen ist. Für die Erschließung dieser Gemeinden eignen sich vor allem Richtungsbänder (**Abbildung 3.6**). In Einzelfällen kann die Erschließung auch durch Linien 1. Grades erfolgen, sofern die zusätzliche Fahrzeit nicht die durch den Systemtakt vorgegebene Umlaufzeit überschreitet. Die Richtungsbänder, die das Umland der zentralen Orte erschließen, sind in der Regel nur an einen Zeitknoten angebunden, so daß im Verkehrsnetz 2. Grades überbestimmte zeitliche Verknüpfungen die Ausnahme darstellen.

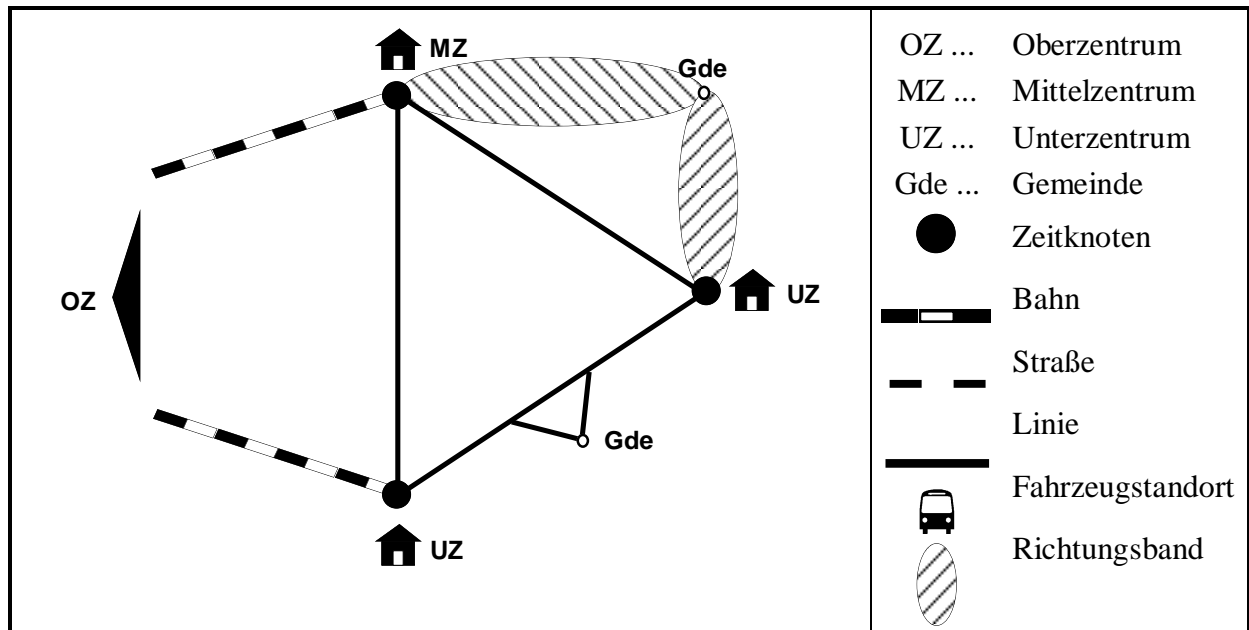


Abb. 3.6: 3. Schritt: Verdichtung des Liniennetzes

### 3.2.3 Feinentwurf

Der Feinentwurf baut auf dem Linienkonzept des Grobentwurfes auf und bestimmt für jede Linie bzw. jedes Richtungsband

- den genauen Linienverlauf,
- den Fahrplan und
- den Fahrzeug- und Fahrereinsatzplan.

Der Feinentwurf erfolgt rechnergestützt, d.h. Linienverlauf, Fahrplan und Einsatzplan werden mit einem Dialogprogramm interaktiv eingegeben und nach Bedarf modifiziert. Nach der Bearbeitung aller Linien und Richtungsbander schließt sich die Wirkungsermittlung, die Bewertung und die Mängelanalyse an. Bei der Wirkungsermittlung und der Mängelanalyse ist es aus Gründen der Handhabbarkeit vorteilhaft, nur Verkehrszellen auf Gemeindeebene, d.h. nur den Hauptort jeder Gemeinde zu berücksichtigen. Dadurch wird die Zahl der Beziehungen begrenzt, die berechnet und analysiert werden müssen. Die Haltestellen der sonstigen Orte werden allerdings in die Linienplanung einbezogen und sind im Fahrplan enthalten. Dadurch ist beim anschließenden Detailentwurf eine Wirkungsermittlung möglich, die alle Orte umfaßt. Bei der Wirkungsermittlung innerhalb des Feinentwurfes wird unterstellt, daß an diesen Haltestellen keine Fahrgäste ein bzw. aussteigen.

### Linienverlauf

Der Verlauf einer Linie wird durch die Angabe einer Anfangshaltestelle, mehrerer Linienhaltestellen und einer Endhaltestelle beschrieben. Außerdem müssen bei einer Buslinie die Straßenstrecken und bei einer Zuglinie die Schienenstrecken, die auf dem Weg von der Anfangs- zur Endhaltestelle benutzt werden, bekannt sein. Ein Linienobjekt besteht also aus Haltestellen-

objekten und Streckenobjekten, die in einer geordneten Reihenfolge vorliegen müssen. Ein Dialogprogramm zur interaktiven Bearbeitung eines Verkehrsnetzes, ein sogenannter Netzeditor (vgl. Kapitel 4.2.1), muß diese Eigenschaften eines Linienobjektes bei der Eingabe einer Linie in das Netzmodell unterstützen. Sind das Straßen- und Schienennetz sowie die Haltestellen bereits Bestandteil eines Netzmodells, kann eine Linie entweder abschnittsweise oder geschlossen in das Netzmodell eingefügt werden.

- Bei der abschnittswisen Eingabe einer Linie markiert der Planer die erste und die letzte Haltestelle eines Linienabschnitts. Der Rechner fügt alle Haltestellen und Strecken, die auf der kürzesten Straßen- bzw. Schienenverbindung der markierten Haltestellen liegen, in den Linienverlauf ein.
- Um eine Linie geschlossen einzugeben, werden die Anfangshaltestelle, die Endhaltestelle und dann alle Linienhaltestellen markiert. Der Rechner sucht mit einem Travelling-Salesman-Algorithmus die Verbindung, die, beginnend an der Anfangshaltestelle, alle Linienhaltestellen auf dem kürzesten Weg mit der Endhaltestelle verknüpft.

Der Rechner bestimmt aus den benutzten Straßen- und Schienenstrecken einen Vorschlag für die relative Fahrzeit zwischen zwei Haltestellen, der vom Planer akzeptiert oder verändert werden kann. Nach der vollständigen Eingabe einer Linie ermittelt der Rechner linienbezogen die Kenngrößen Fahrzeit, Linienlänge, mittlere Fahrgeschwindigkeit und Umwegigkeit. Die Analyse kann auch für einen Linienabschnitt erfolgen. Bei Bedarf verändert der Planer die Liniendaten, d.h. die Linienführung und die Fahrzeiten.

Für den Entwurf eines Richtungsbandes erfordern die wahrscheinlichkeitsbehafteten Kenngrößen zusätzliche Arbeitsschritte, die im Kapitel 3.3 erläutert werden.

### **Fahrplan und Einsatzplan**

Die Fahrplanerstellung und die Einsatzplanung erfolgen in einem Arbeitsschritt. Für jede Linie wird ein Umlaufschema (vgl. Anhang) gewählt, das die Grundstruktur der Bedienungshäufigkeit und des Fahrzeug- und Fahrereinsatzes enthält. Der Planer paßt das Umlaufschema an die spezifischen Randbedingungen der Linie an, d.h. die Abfahrtszeiten der Linie werden so verschoben, daß die Anschlüsse an den Zeitknoten realisiert werden können. Außerdem müssen u.U. zusätzliche Verstärkerfahrten eingefügt werden, die besonderen zeitlichen Bedingungen, z.B. dem Schulbeginn, genügen. In diesem Arbeitsschritt wird der Planer durch einen interaktiven Fahrplaneditor unterstützt (vgl. Kapitel 4.2.2), der folgende Anforderungen erfüllen muß:

- Die Fahrten einer Linie sollen als tabellarischer Fahrplan und als Bildfahrplan dargestellt und bearbeiten werden können.
- Der Fahrplaneditor muß die Fahrten einer Linie verwalten, d.h. Fahrten auf Wunsch des Planers in den Fahrplan einfügen oder aus dem Fahrplan löschen.
- Jede Fahrt einer Linie umfaßt Informationen über den Fahrer, das Fahrzeug, die Abfahrtszeit und die Abfahrtshaltestelle, die der Planer verändern kann.
- Anschlüsse an den Zeitknoten, die die Abfahrtszeiten der Linie bestimmen, müssen für den Planer hervorgehoben werden.

- Um die Wirkungen eines Einsatzplanes zu ermitteln, soll ein Modul zur Kostenrechnung integriert sein, das gleichzeitig die Zulässigkeit des Einsatzplanes überprüft.
- Damit die Fahrzeiten der bearbeiteten Linie verändert werden können, ist es erforderlich, daß der Planer jederzeit zwischen Netzeditor und Fahrplanneditor wechseln kann.

Bei Anwendung des Umlaufschemas (vgl. Kapitel 2.3.4) genügt i.d.R. eine manuelle Einsatzplanung ohne Verwendung eines Optimierungsprogramms. Der Planer markiert die einzelnen Fahrten einer Linie am Bildschirm und weist jeder Fahrt genau ein Fahrzeug und einen Fahrer zu.

### 3.3 Exkurs: Dimensionierung eines Richtungsbandes

Während beim Linienbetrieb alle im Fahrplan aufgeführten Haltestellen fest bedient werden, sieht der Richtungsbandbetrieb vor, daß es neben fest bedienten Haltestellen, z.B. der Anfangs- und der Endhaltestelle, Haltestellen gibt, die nur bei Bedarf angefahren werden. Das Auftreten eines Fahrtwunsches kann als Einzelereignis eines stochastischen Prozesses angesehen werden (GRESCHNER, 1984), so daß für jeder Fahrt des Richtungsbandes die Fahrtroute, d.h. die Folge der angefahrenen Haltestellen, neu disponiert werden muß. Die Kenngrößen

- Fahrzeit,
- Fahrtweite,
- Umwegigkeit,
- Abfahrts- und Ankunftszeit an den Haltestellen

sind für ein Richtungsband dementsprechend innerhalb einer Bandbreite zufällig. Um ein Richtungsband entwerfen zu können, müssen die Häufigkeitsverteilungen dieser Kenngrößen ermittelt werden.

Die Kenngrößen des Richtungsbandes werden durch die Einflußgrößen

- Zahl der fest bedienten Haltestellen,
- Zahl der Bedarfshaltestellen,
- Bedienungshäufigkeit,
- räumliche Verteilung der Haltestellen,
- Verknüpfungsmöglichkeiten der Haltestellen durch das Straßennetz und
- Größe und Struktur der Verkehrsnachfrage,

bestimmt. Für die Dimensionierung eines Richtungsbandes sind das Straßennetz und die Verkehrsnachfrage vorgegeben. Da die Bedienungshäufigkeit i.d.R. durch vorgeschaltete Überlegungen für einen Takt ebenfalls eine feste Größe darstellt, wird bei der Dimensionierung vor allem über die Zahl und die Lage der Haltestellen entschieden, die ein Richtungsband erschließen kann.

Die wichtigste Kenngröße zur Beurteilung eines Richtungsbandes ist die Fahrzeit. Aus der Häufigkeitsverteilung der Fahrzeit und einer vorgegebenen Sicherheitswahrscheinlichkeit (z.B. 95 %), mit der die dem Fahrplan zugrunde gelegten Fahrzeiten eingehalten werden sollen, ergibt sich die *Bemessungsfahrzeit* (**Abbildung 3.7**). Sie ist die Eingangsgröße für die Fahrplanbildung.

Für die seltenen Fälle der Überschreitung der Bemessungsfahrzeit müssen Maßnahmen der Anschlußsicherung ergriffen werden. Die Bindung der Fahrzeit an Wahrscheinlichkeiten ist der Grund dafür, daß die Länge der Richtungsbänder nicht zu groß sein darf.

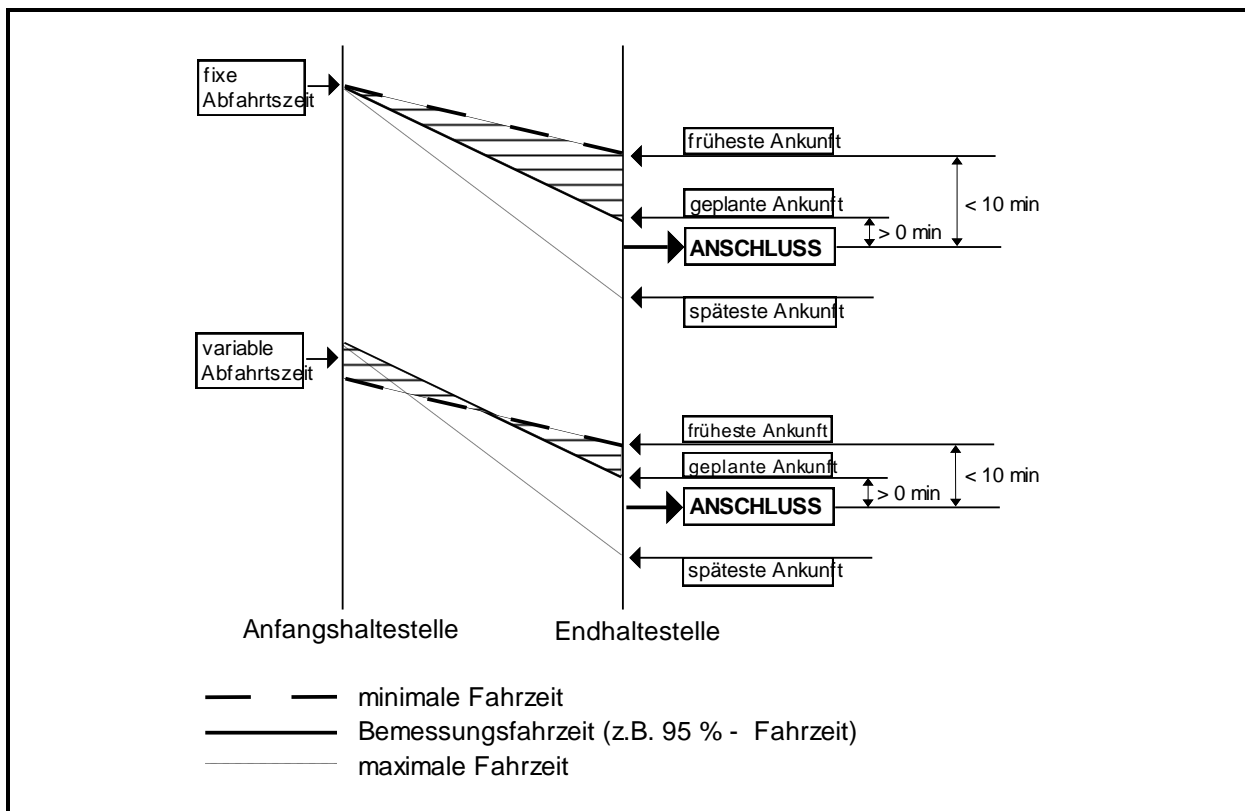


Abb. 3.7: minimale Fahrzeit, Bemessungsfahrzeit und maximale Fahrzeit eines Richtungsbandes

Beim Entwurf eines ÖPNV-Angebotes wird jede im Linienbetrieb betriebene Buslinie mit den rückgekoppelten Arbeitsschritten

- Festlegung der Linienführung,
- Berechnung der Kenngrößen der Linie,
- Erstellung eines Fahrplans,
- Fahrer- und Fahrzeugeinsatzplanung

entwickelt. Für die Dimensionierung eines Richtungsbandes müssen zusätzlich die Häufigkeitsverteilungen der Kenngrößen eines Richtungsbandes berechnet werden. Aus den Häufigkeitsverteilungen und der vorgegebenen Sicherheitswahrscheinlichkeit ergeben sich die *Bemessungskenngrößen*. Die Bemessungskenngrößen entsprechen den Kenngrößen einer Linie, so daß das Richtungsband bei der anschließenden Fahrplanbildung und bei der Wirkungsermittlung wie eine Linie behandelt werden kann. Es ergibt sich folgender Ablauf, der aus den Arbeitsschritten (**Abbildung 3.8**)

- Festlegung der räumlichen Ausprägung,
- Berechnung und Beurteilung der Häufigkeitsverteilungen für die Kenngrößen des Richtungsbandes,
- Festlegung der Bemessungskenngrößen für das Richtungsband,



- Erstellung eines Fahrplans mit Anschlüssen an den geplanten Umsteigehaltestellen,
- Fahrer- und Fahrzeugeinsatzplanung

besteht. Für die Fahrereinsatzplanung gibt es keine Hinweise darüber, ob bedarfsabhängige Standzeiten als Pause angerechnet werden dürfen.

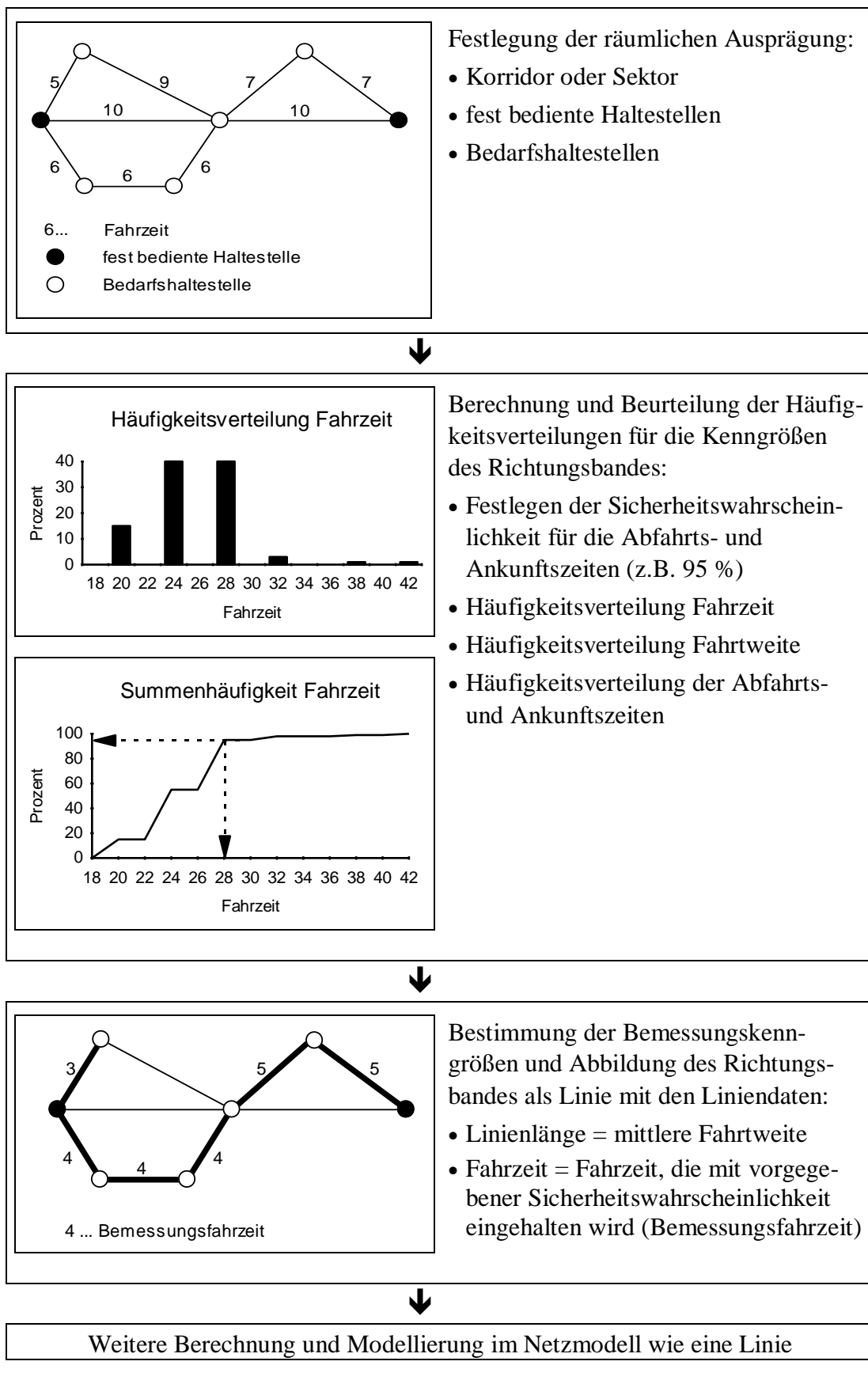


Abb. 3.8: Entwurf eines Richtungsbandes

### 3.3.1 Haltestellen eines Richtungsbandes

Bei den Haltestellen eines Richtungsbandes muß zwischen

- fest bedienten Haltestellen und
- Bedarfshaltestellen

unterschieden werden. Als Kriterium für die Klassifizierung einer Haltestelle dient die Anfahrwahrscheinlichkeit. Haltestellen mit einer hohen Anfahrwahrscheinlichkeit sollten zu fest bedienten Haltestellen erklärt werden, um die Disposition der Fahrzeuge zu erleichtern.

Um die Anfahrwahrscheinlichkeiten von Bedarfshaltestellen zu ermitteln, muß eine auf die Haltestellen des Richtungsbandes bezogene Matrix der Verkehrsnachfrage vorhanden sein. Diese Fahrtwunschmatrix beschreibt für ein gegebenes Zeitintervall die im Mittel zu erwartende Anzahl von Fahrtwünschen. Das Auftreten eines Fahrtwunsches  $F_{ij}$  zwischen einer Einstiegshaltestelle  $i$  und einer Ausstiegshaltestelle  $j$  ist ein seltenes Ereignis, so daß die Fahrtwünsche als Mittelwerte einer Poisson-Verteilung betrachtet werden können. Damit läßt sich die Wahrscheinlichkeit  $W_{ij}$  berechnen, mit der in dem Zeitintervall mindestens ein Fahrtwunsch von  $i$  nach  $j$  auftritt (HAMBURG-CONSULT et al., 1981; GRESCHNER, 1984):

$$W_{ij} = 1 - e^{-m}$$

mit

$W_{ij}$  Wahrscheinlichkeit für das Auftreten mindestens eines Fahrtwunsches von  $i$  nach  $j$  innerhalb eines Zeitintervalls.

$m$  mittlerer Erwartungswert für das Auftreten eines Fahrtwunsches  $F_{ij}$  von  $i$  nach  $j$  innerhalb eines Zeitintervalls.

Die Anfahrwahrscheinlichkeit  $A_i$  einer Haltestelle ist dementsprechend abhängig von der Zahl der Ein- und Aussteiger und der Bedienungshäufigkeit der Haltestelle. Unter der Annahme einer konstanten Ganglinie der Verkehrsnachfrage innerhalb des betrachteten Zeitintervalls und einer getakteten Bedienung ergibt sich folgende Formel für die Anfahrwahrscheinlichkeit  $A_i$ :

$$A_i = 1 - e^{-\frac{(EIN_i + AUS_i)}{B_i}}$$

mit

$A_i$  Anfahrwahrscheinlichkeit der Haltestelle  $i$  innerhalb eines Zeitintervalls.

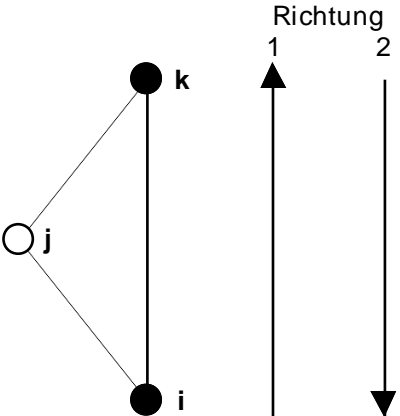
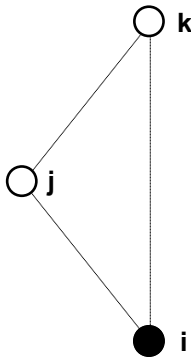


$EIN_i$  mittlerer Erwartungswert für das Auftreten eines Fahrtwunsches, der an der Haltestelle  $i$  beginnt, d.h. einsteigt.

$AUS_i$  mittlerer Erwartungswert für das Auftreten eines Fahrtwunsches, der an der Haltestelle  $i$  endet, d.h. aussteigt.

$B_i$  Zahl der Bedienungen an der Haltestelle  $i$  innerhalb eines Zeitintervalls.

Wird bei der Berechnung der Anfahrwahrscheinlichkeit eines Korridor-Richtungsbandes nur eine Richtung betrachtet, gehen nur die Fahrtwünsche und die Bedienungshäufigkeit dieser

Richtung ein. Bei einer innerhalb des betrachteten Zeitintervalls symmetrischen Fahrtwunschmatrix können die Berechnungen für beide Richtungen zusammengefaßt werden. Als Bedienungshäufigkeit wird dann die Summe der Bedienungen beider Richtungen gesetzt. Bei sektoralen Richtungsbändern, bei denen Anfangs- und Endhaltestelle identisch sind, muß allerdings beachtet werden, daß es nur eine Richtung gibt (**Abbildung 3.9**).

Korridor-Richtungsband		Sektor-Richtungsband
		
Anfahrtswahrscheinlichkeit Haltestelle j Richtung 1: $A_j = 1 - e^{\frac{-(1+1)}{2}}$ $A_j = 0.632$		Anfahrtswahrscheinlichkeit Haltestelle j $A_j = 1 - e^{\frac{-(3+2)}{2}}$ $A_j = 0.918$
Richtung 2: $A_j = 1 - e^{\frac{-(2+1)}{2}}$ $A_j = 0.777$		
Verkehrsnachfrage: $F_{ij} = 1$ $F_{ji} = 2$ $F_{jk} = 1$ $F_{kj} = 1$		Bedienungshäufigkeit pro Richtung: $B_j = 2$
 fest bediente Haltestelle		 Bedarfshaltestelle

**Abb. 3.9:** Anfahrtswahrscheinlichkeit einer Haltestelle für ein Korridor- und ein Sektor-Richtungsband bei gleicher Verkehrsnachfrage und gleicher Bedienungshäufigkeit.

Die in **Abbildung 3.10** berechneten Anfahrtswahrscheinlichkeiten zeigen den Zusammenhang zwischen der Anfahrtswahrscheinlichkeit und der Zahl der Einwohner im Einzugsbereich einer Bedarfshaltestelle. Die Anfahrtswahrscheinlichkeit sinkt mit steigender Bedienungshäufigkeit und abnehmender Einwohnerzahl. Die Zahl der Einwohner, die mit einer Bedarfshaltestelle erschlossen werden können, hängt vom einwohnerspezifischen Verkehrsaufkommen und der Bedienungshäufigkeit ab. Das Berechnungsbeispiel geht von einer konstanten und symmetrischen Verkehrsnachfrage innerhalb des betrachteten Zeitraumes aus, d.h. jeder Einsteiger (erzeugte Personenfahrt) belastet die Bedarfshaltestelle auf dem Rückweg als Aussteiger (angezogene Personenfahrt). Außerdem wird angenommen, daß für alle Fahrwünsche entweder die Einstiegshaltestelle oder die Ausstiegshaltestelle fest bedient wird, d.h. es wird eine strukturierte Verkehrsnachfrage z.B. zu einem zentralen Ort unterstellt. Bei einem

Verkehrsaufkommen von 0,05 (0,10) erzeugten Fahrten in der Normalverkehrszeit (8 Uhr bis 16 Uhr) und einer Anfahrwahrscheinlichkeit von 70 % können dann mit einem 120-Minutentakt (= 4 Bedienung) Orte mit 50 (100) Einwohnern durch Bedarfshaltestellen erschlossen werden. Das Verkehrsaufkommen von 0,05 bis 0,10 erzeugten Fahrten pro Einwohner liegt dabei im Bereich der Werte, die SCHUSTER (1992) für den Einkaufs- und Erledigungsverkehr aus verschiedenen Untersuchungen zusammengetragen hat. Haltestellen mit einer Anfahrwahrscheinlichkeit von mehr als 70 % bis 80 % sollten als fest bediente Haltestellen geplant werden.

Einwohner Ew im Einzugsbereich der Haltestelle		erzeugte Fahrten	angezogene Fahrten	Belastung der Haltestelle	Anfahrwahrscheinlichkeit		
erzeugte Fahrten pro Ew					Bedienungshäufigkeit pro Richtung		
0,10 Fahrten	0,05 Fahrten				4	8	16
10 Ew	20 Ew	1	1	2	0.221	0.118	0.061
20 Ew	40 Ew	2	2	4	0.393	0.221	0.118
30 Ew	60 Ew	3	3	6	0.528	0.313	0.171
40 Ew	80 Ew	4	4	8	0.632	0.393	0.221
50 Ew	100 Ew	5	5	10	0.713	0.465	0.268
60 Ew	120 Ew	6	6	12	0.777	0.528	0.313
70 Ew	140 Ew	7	7	14	0.826	0.583	0.354
80 Ew	160 Ew	8	8	16	0.865	0.632	0.393
90 Ew	180 Ew	9	9	18	0.895	0.675	0.430
100 Ew	200 Ew	10	10	20	0.918	0.713	0.465

Abb. 3.10: Einwohnereinzugsbereich einer Bedarfshaltestelle in Abhängigkeit von der Bedienungshäufigkeit und dem Verkehrsaufkommen für einen Zeitraum.

Die stärkere Verkehrsnachfrage im Berufs- und Schülerverkehr kann durch eine höhere Bedienungshäufigkeit ausgeglichen werden. Sinnvoller ist es jedoch, in der Hauptverkehrszeit mehr Haltestellen fest zu bedienen und dafür, wie in Kapitel 2.3.4 erläutert, einsetzende Fahrzeuge aus dem Verkehrsnetz 1. Grades zu benutzen.

### 3.3.2 Form eines Richtungsbandes

Die Kenngrößen des Richtungsbandes werden nicht nur durch die Bedienungshäufigkeit und die Verkehrsnachfrage beeinflusst, sondern auch durch die Form, d.h. durch die Lage der Haltestellen im Raum und durch die Verknüpfungsmöglichkeiten, die vom Straßennetz vorgegeben sind. Jede nachgefragte Haltestelle, die nicht auf dem direkten Weg von der Anfangshaltestelle zur

Endhaltestelle liegt, verlängert die Fahrzeit. Bei  $n$  Bedarfshaltestellen gibt es  $2^n$  Haltestellenkombinationen, die für eine Fahrt des Richtungsbandes nachgefragt werden können. Für jede Haltestellenkombination  $K$  gibt es eine optimale Route, die die nachgefragten Haltestellen auf dem kürzesten Weg in der Fahrzeit  $T(K)$  bedient. Die Wahrscheinlichkeit  $P(K)$  für das Auftreten einer Haltestellenkombination  $K$  beträgt (HAMBURG-CONSULT et al., 1981):

$$P(K) = \prod_{i \in H} A_i \times \prod_{j \notin H} (1 - A_j)$$

mit

$H$  Menge der nachgefragten Bedarfshaltestellen

$i, j$  Indizes der Bedarfshaltestellen

In dieser Formel beschreibt  $A_i$  die Anfahrwahrscheinlichkeit der Haltestellen, die in der betrachteten Haltestellenkombination enthalten sind.  $1 - A_j$  drückt die Wahrscheinlichkeit aus, daß eine Haltestelle nicht angefahren werden muß, d.h. nicht in der Haltestellenkombination enthalten ist. Aus der Häufigkeitsverteilung der Fahrzeit, die sich aus der nicht stetigen Funktion  $T(K)$  ergibt, leitet sich dann die Bemessungsfahrzeit ab. Für jede Route einer Haltestellenkombination können außerdem die Länge der Route und die Ankunftszeiten an den Haltestellen bestimmt werden. Um ein Richtungsband genau zu bemessen, müssen die Kenngrößen der Route jeder Haltestellenkombination ermittelt werden.

Da die Zahl der zu untersuchenden Haltestellenkombinationen mit jeder zusätzlichen Bedarfshaltestelle exponentiell wächst, wird die genaue Kenngrößenberechnung selbst bei Rechneinsatz schnell sehr aufwendig. Es ergeben sich Rechenzeiten, die für einen interaktiven Entwurf zu lang sind. Aus diesem Grund wird im folgenden ein überschlägiges Verfahren zur Abschätzung der Bemessungsgeschwindigkeit eines Richtungsbandes vorgeschlagen. Das überschlägige Verfahren eignet sich vor allem für den Entwurfsprozeß, wenn unterschiedliche Formen eines Richtungsbandes getestet werden sollen und die Kenntnis der Bemessungsgeschwindigkeit ausreicht. Nach Abschluß des Entwurfs sollte das genaue Verfahren einmal angewendet werden, um alle Kenngrößen des Richtungsbandes exakt zu ermitteln.

### 3.3.3 Verfahren zur überschlägigen Bemessung

Das Verfahren zur überschlägigen Bemessung eines Richtungsbandes beruht auf drei Annahmen:

1. Die Anfahrwahrscheinlichkeit ist für alle Bedarfshaltestellen in etwa gleich groß.
2. Die Fahrzeit von der Anfangs- zur Endhaltestelle ist für jede Haltestellenkombination annähernd gleich, wenn die Zahl der nachgefragten Haltestellen gleich ist.
3. Die Fahrzeit  $T$  einer Haltestellenkombination kann in Abhängigkeit von der Zahl der nachgefragten Haltestellen  $h$  durch die lineare Interpolation zwischen der minimalen und der maximalen Fahrzeit ermittelt werden:

$$T(h) = \min T + (\max T - \min T) \times \frac{h}{n}$$

mit

$\min T$  Fahrzeit auf dem direkten Weg von der Anfangs- zur Endhaltestelle

$\max T$  Fahrzeit auf dem Weg, der alle Haltestellen bedient

$n$  Zahl der Bedarfshaltestellen

$h$  Zahl der nachgefragten Bedarfshaltestellen

Mit diesen Annahmen ist eine Abschätzung der Bemessungsfahrzeit möglich. Als Eingangsdaten müssen bekannt sein:

- der Untersuchungszeitraum.
- die fest bedienten Haltestellen und die Bedarfshaltestellen.
- die Bedienungshäufigkeit im Untersuchungszeitraum.
- die haltestellenbezogene Verkehrsnachfrage bzw. die Zahl der Ein- und Aussteiger pro Haltestelle im Untersuchungszeitraum.
- die Fahrzeit auf dem kürzesten Weg von der Anfangshaltestelle zur Endhaltestelle. Der kürzeste Weg muß alle fest bedienten Haltestellen umfassen.
- die Fahrzeit auf dem längsten Weg von der Anfangshaltestelle zur Endhaltestelle, der alle Haltestellen erfaßt.

Mit diesen Eingangsdaten ergibt sich folgender Ablauf zur Abschätzung der Bemessungsfahrzeit:

1. Berechne die mittlere Zahl der Ein- und Aussteiger aller  $n$  Bedarfshaltestellen.

$$\overline{EIN + AUS} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (EIN_i + AUS_i)$$

2. Berechne die mittlere Anfahrwahrscheinlichkeit aller  $n$  Bedarfshaltestellen.

$$\overline{A} = 1 - e^{-\frac{(\overline{EIN + AUS})}{B}}$$

3. Ermittle die Fahrzeiten für 1 bis  $n$  nachgefragte Haltestellen durch lineare Interpolation zwischen der minimalen und der maximalen Fahrzeit.

$$T(h) = \min T + (\max T - \min T) \times \frac{h}{n}, \text{ für } h = 1, n$$

4. Ermittle die Häufigkeitsverteilung der Fahrzeit. Dazu muß für alle  $h$  von 1 bis  $n$  die Größe  $P(h)$  berechnet werden, die die Wahrscheinlichkeit angibt, daß von  $n$  vorhandenen Bedarfs-

haltestellen mit gleicher Anfahrwahrscheinlichkeit  $A$  genau  $h$  Haltestellen angefahren werden müssen.

$$P(h) = \left[ \bar{A}^h \times (1 - \bar{A})^{(n-h)} \right] \binom{n}{h}, \text{ für } h = 1, n$$

5. Erstelle den Verlauf der Summenhäufigkeit und lese den Wert der Bemessungsfahrzeit ab. Die Bemessungsfahrzeit ist die Fahrzeit, die eine vorgegebene Sicherheitswahrscheinlichkeit einhält.

Eine Bedarfshaltestelle, deren Anfahrwahrscheinlichkeit deutlich über der mittleren Anfahrwahrscheinlichkeit liegt, sollte bei diesem Verfahren in den kürzesten Weg integriert und damit als fest bediente Haltestelle angenommen werden.

### 3.3.4 Genaue Berechnung der Kenngrößen

Folgender Ablauf (vgl. HAMBURG-CONSULT et al., 1981) erlaubt die exakte Berechnung der wahrscheinlichkeitsbehafteten Kenngrößen des Richtungsbandes, der i.d.R. nur mit EDV-Einsatz durchführbar ist (**Abbildung 3.11**):

- Die Haltestellen des Richtungsbandes werden festgelegt.
- Das relevante Straßennetz zwischen den Haltestellen wird eingegeben.
- Erzeugung aller Verbindungsrouten von der Anfangs- zur Endhaltestelle und Ablage im Routenspeicher. Die Zahl der Verbindungsrouten hängt vom Straßennetz, seinem Verknüpfungsgrad und der Haltestellenzahl ab. Sie liegt i.d.R. deutlich unter der Zahl der  $2^n$  Haltestellenkombinationen.
- Vorgabe einer haltestellenbezogenen Fahrtwunschmatrix.
- Festlegung der Bedienungshäufigkeit.
- Aus den im Mittel zu erwartenden Ein- und Aussteigern einer Haltestelle wird unter Annahme einer Poisson-Verteilung die Anfahrwahrscheinlichkeit jeder Bedarfshaltestelle berechnet.
- Für alle  $2^n$  Haltestellenkombinationen werden die Kenngrößen berechnet und gewichtet aufsummiert. Dazu sind folgende Schritte notwendig:
  - Die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Haltestellenkombination wird berechnet.
  - Für die betrachtete Haltestellenkombination wird eine Route aus dem Routenspeicher ausgewählt. Auswahlkriterium ist dabei die kürzeste Gesamtfahrzeit.
  - Die Kennwerte der gewählten Route werden nun mit der Auftretenswahrscheinlichkeit der Haltestellenkombination gewichtet und aufsummiert.
- Nach Abarbeitung aller Haltestellenkombinationen erhält man die Kennwerte des Richtungsbandes als Häufigkeitsverteilungen der Kenngrößen Fahrzeit, Fahrtweite, haltestellenbezogene Abfahrts- und Ankunftszeit.



Da die Zahl der Haltestellenkombinationen mit jeder zusätzlichen Bedarfshaltestelle exponentiell wächst, sind die Einsatzmöglichkeiten dieses Verfahrens begrenzt. Die Grenze liegt bei etwa 20 Bedarfshaltestellen. Nachdem die Fahrzeitschwankungen eines Richtungsbandes, die mit jeder weiteren Bedarfshaltestelle zunehmen, begrenzt werden müssen, stellt diese Grenze jedoch für die Planungspraxis keine Einschränkung dar. Die Zahl der fest bedienten Haltestellen muß nicht beschränkt werden.

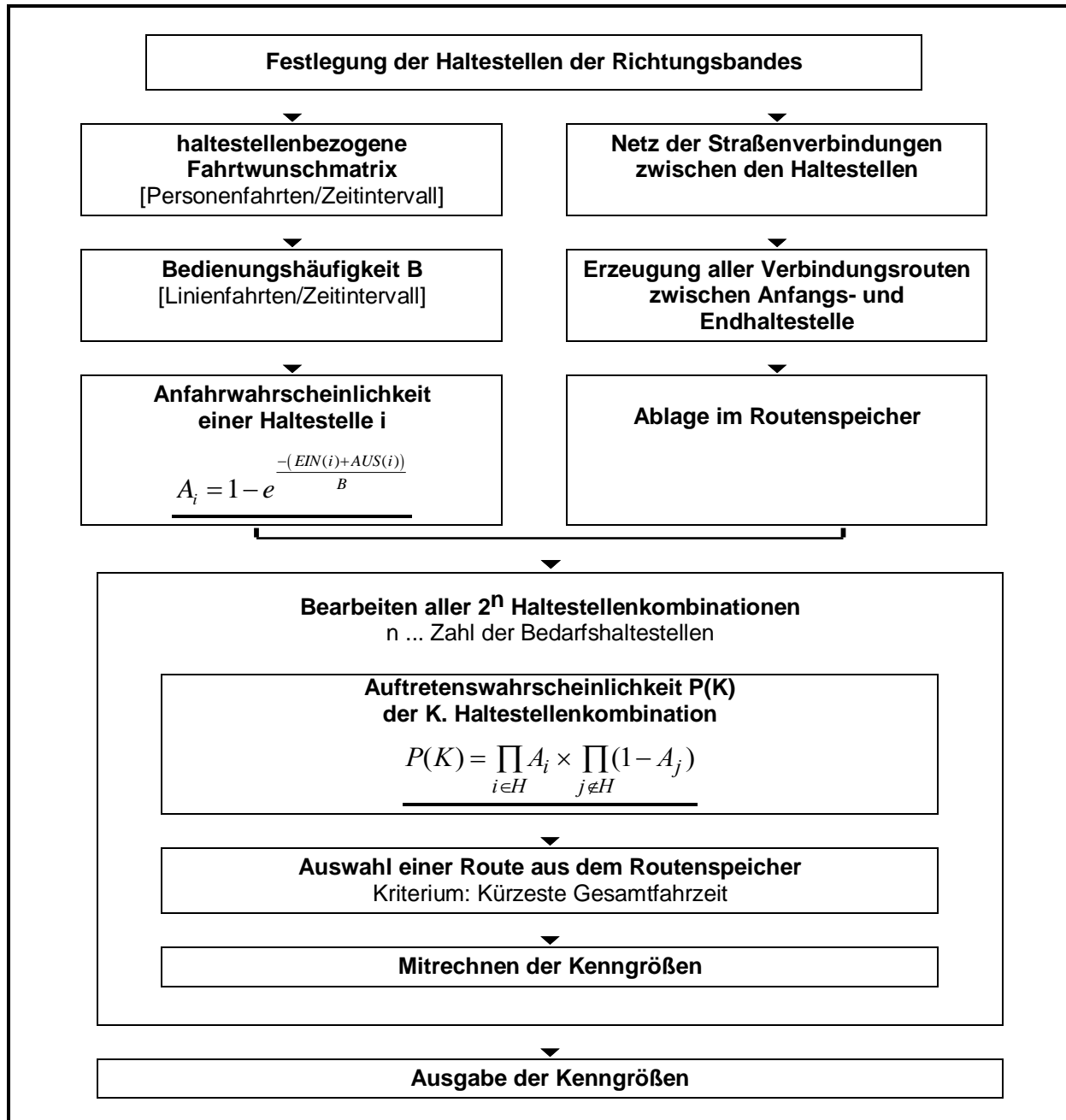


Abb. 3.11: Ermittlung der Kenngrößen für ein Richtungsband

### 3.4 Ermittlung der Wirkungen

#### 3.4.1 Kenngrößen der Benutzer

Die Kenntnis der von einem Verkehrsteilnehmer gewählten ÖPNV-Verbindung von einer Quellzelle  $i$  zu einer Zielzelle  $j$  erlaubt es, die benutzerbezogenen Kenngrößen

- Zugangsweg und Zugangszeit,
- Beförderungszeit durch den Transportträger,
- Umsteigehäufigkeit,
- Übergangszeit an einer Umsteigehaltestelle,
- Umsteigewartezeit an einer Umsteigehaltestelle,
- Abgangsweg und Abgangszeit

zu ermitteln (**Abbildung 3.12**). Durch die Verfolgung einer Ortsveränderung im Netz gewinnt man außerdem Informationen über die benutzte Linienfolge und die Direktheit der Verbindung. Wird nicht nur ein Zeitpunkt, sondern ein Zeitraum betrachtet, können zusätzliche Aussagen über die Bedienungshäufigkeit, d.h. die Zahl der Verbindungen auf einer Route oder die Zahl der Verbindungen für eine Quelle-Ziel-Beziehung, gemacht werden.

Um alle vorhandenen Verbindungen einer Beziehung zu ermitteln, muß eine Verbindungssuche durchgeführt werden. Die bei der Verbindungssuche gefundenen Verbindungen müssen dann als Grundlage für eine Verteilung der Verkehrsnachfrage auf die einzelnen Verbindungen bewertet werden. Ein Verkehrsmodell, das das Verbindungswahlverhalten der Fahrgäste simuliert und so die benutzerbezogenen Kenngrößen bestimmt, besteht aus den drei Komponenten:

1. Verbindungssuche: Ermittlung möglicher Verbindungen.
2. Verbindungswahl: Beurteilung der einzelnen Verbindungen.
3. Verbindungssplit: Zuordnung bzw. Aufteilung der Fahrgäste auf die einzelnen Verbindungen.

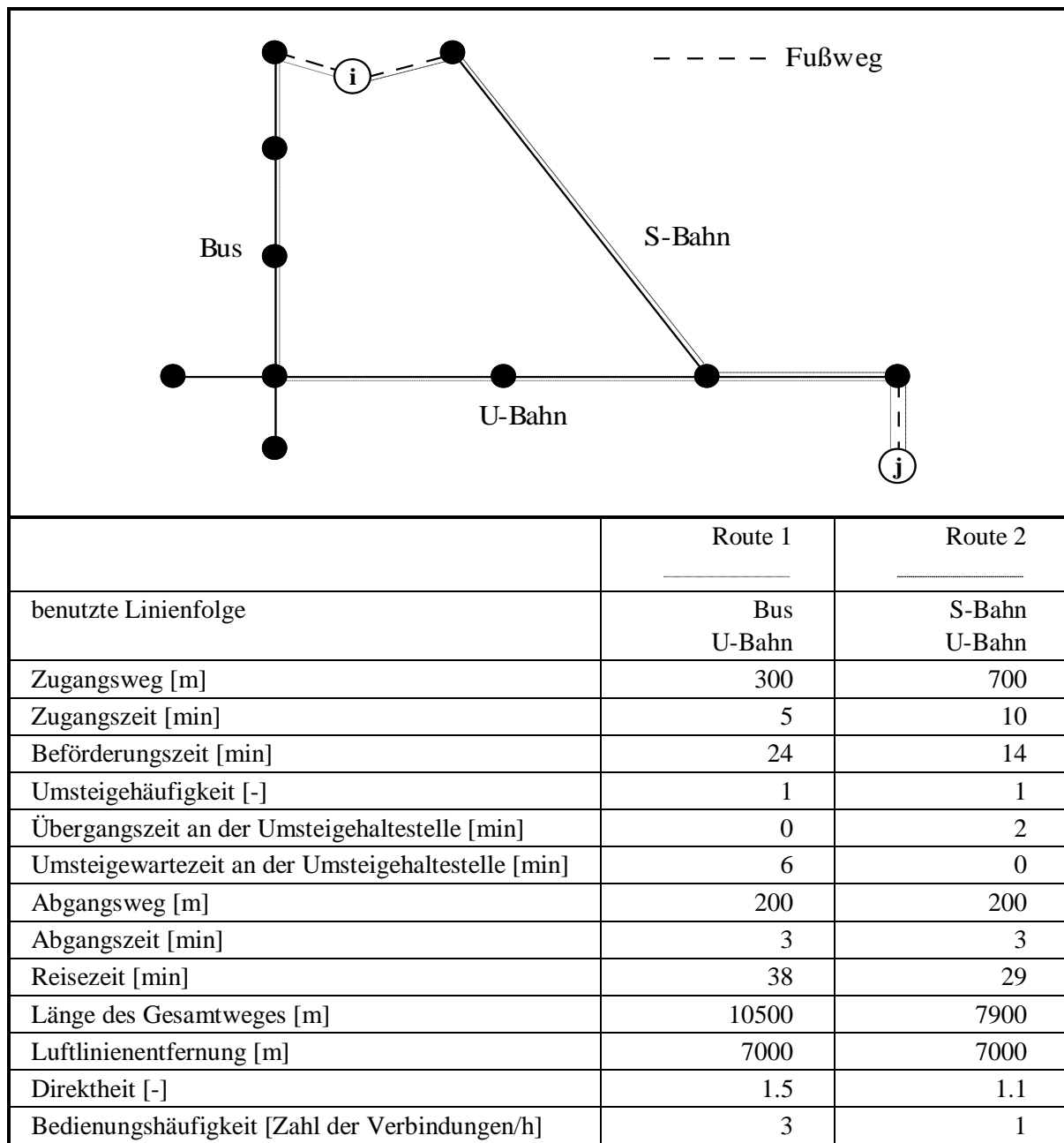


Abb. 3.12: Beispiel für die Kenngrößen einer Beziehung i-j

Als Ergebnis der Verbindungssuche erhält man die Kenngrößen jeder gefundenen Verbindung. Beim Verbindungssplit wird dann nicht nur eine Verbindung betrachtet, sondern es werden alle Personenfahrten von i nach j und die Qualität der angebotenen Verbindungen einbezogen. Gewichtet mit den Fahrgästen, die auf jede Verbindung entfallen, ergeben sich schließlich die mittleren Kenngrößen für die Beziehung i-j. Die vom Verkehrsmodell berechneten mittleren Kenngrößen einer Beziehung lassen sich weiter zu mittleren Kenngrößen einer Verkehrszelle und des gesamten ÖPNV-Netzes zusammenfassen.

### Verbindungssuche

Die Verbindungssuche in ÖPNV-Netzen unterscheidet sich von der Routensuche in IV-Netzen, da das Verkehrsangebot im ÖPNV und im IV unterschiedlich strukturiert ist (**Tabelle 3.1**).

	ÖPNV	IV
Fahrzeugfolge	diskret	kontinuierlich
Fahrweg	Linienverlauf vorgegeben	gesamtes Straßennetz steht zur Verfügung
Zeitpunkt einer Ortsveränderung	Abfahrts- und Ankunftszeitpunkt durch Fahrplan vorgegeben	Abfahrtszeitpunkt frei wählbar
Fahrtdauer	Fahrtdauer durch Fahrplan vorgegeben (Problem: Verspätungen)	Ankunftszeit von Straßennetzbelastung und gewählter Fahrgeschwindigkeit abhängig
Knotenpunkte	Knoten sind die Haltestellen, an denen nur dann umgestiegen werden kann, wenn Anschlüsse bestehen	Jede Kreuzung stellt eine neue Wahlmöglichkeit dar
Kapazität eines Streckenabschnittes	Kapazität durch Fahrzeugfolgezeit und Gefäßgröße leicht und vergleichsweise stetig veränderbar	Kapazität durch Ausbau- oder Steuermaßnahmen nur in sehr geringem Maß kontinuierlich veränderbar

**Tab. 3.1:** Eigenschaften des Verkehrsangebotes im ÖPNV- und im IV

Für die Verbindungssuche im ÖPNV sind verschiedene Verfahren denkbar, die in **Tabelle 3.2** genauer erläutert sind:

- Bestwegsuche ohne Berücksichtigung der Umsteigewartezeiten,
- Bestwegsuche mit pauschaler Berücksichtigung der Umsteigewartezeiten,
- Dynamische Bestwegsuche für einen Zeitpunkt,
- Dynamische Bestwegsuche für einen Zeitraum,
- Dynamische Mehrwegsuche für einen Zeitraum.

Sie unterscheiden sich durch die Genauigkeit der Ergebnisse, durch den Aufwand zur Erstellung eines Netzmodells und durch den Rechenaufwand bei der Wirkungsermittlung.

Um die besonderen Eigenschaften des ÖPNV-Angebotes im ländlichen Raum,

- nicht getaktete, unregelmäßige Abfahrtszeiten und
- große Fahrzeugfolgezeiten,

bei der Verbindungssuche zu berücksichtigen, wird ein dynamischer Mehrweg-Suchalgorithmus angewendet. Dabei wird an Umsteigehaltestellen in Abhängigkeit von der Ankunftszeit und der haltestellenspezifischen erforderlichen Übergangszeit für jede Linie, die die Umsteigehaltestelle bedient, die frühest mögliche Anschlußverbindung benutzt. Auf diese Weise wird die tatsächliche Umsteigezeit und somit die Koordinierung des Fahrplans berücksichtigt. Eine solche Vorgehensweise wird als dynamische Verbindungssuche bezeichnet, da mit den realen Abfahrts-, Ankunfts- und Umsteigezeiten und nicht mit pauschalen Werten, z.B. Umsteigezeit = halbe Fahrzeugfolgezeit, gerechnet wird.

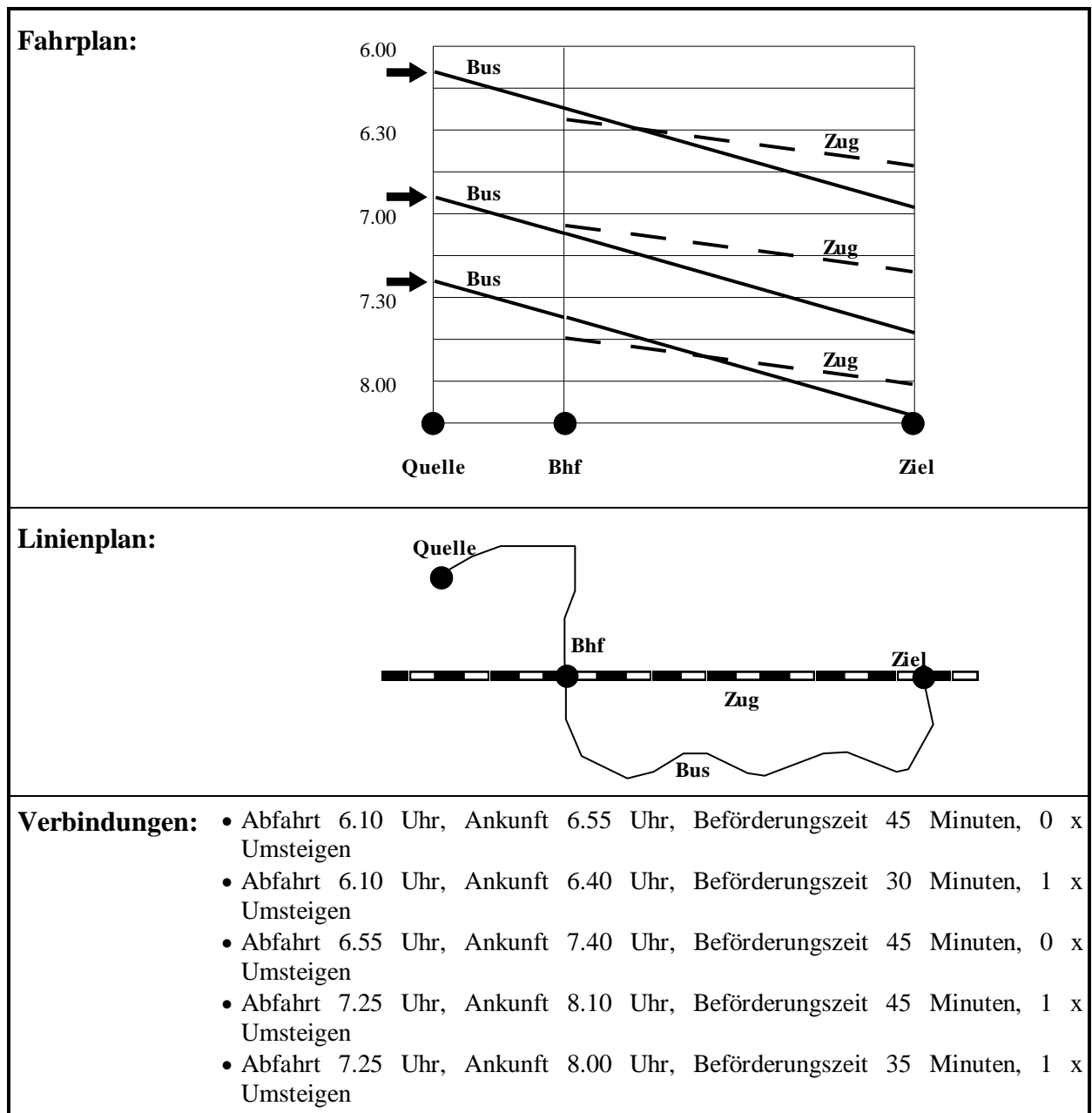
Verfahren	erforderliche Eingabedaten	Beurteilung der Ergebnisse
Bestwagsuche ohne Berücksichtigung der Umsteigewartezeiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrzeit auf jeder Strecke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zeitschnellste Verbindung ohne Berücksichtigung der Umsteigewartezeit und der Bedienungshäufigkeit.</li> <li>• Unrealistische Routenwahl durch häufiges Umsteigen.</li> <li>• Parallel geführte Linienbündel müssen durch fiktive Linie dargestellt werden. Die Aufteilung der Verkehrsnachfrage erfolgt in Abhängigkeit ihres Taktes.</li> <li>• Abschätzung der Reisezeit, d.h. der reinen Fahrzeit möglich; Umsteigehäufigkeit, Umsteigewartezeit und Bedienungshäufigkeit nicht berechenbar.</li> </ul>
Bestwagsuche mit pauschaler Berücksichtigung der Umsteigewartezeiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrzeit auf jeder Strecke</li> <li>• pauschale Umsteigezeit = <math>\frac{1}{2} \times</math> Fahrzeugfolgezeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zeitschnellste Verbindung mit pauschaler Berücksichtigung der Umsteigewartezeit und Bedienungshäufigkeit.</li> <li>• Koordinierung des Fahrplans kann nur dann berücksichtigt werden, wenn alle Linien im gleichen Takt verkehren und die Umsteigewartezeiten als zusätzliche Kanten in das Netzmodell eingeführt werden.</li> <li>• Parallel geführte Linienbündel müssen durch eine fiktive Linie dargestellt werden.</li> <li>• Umsteigehäufigkeit für zeitschnellste Verbindung berechenbar; Abschätzung der Reisezeit; Umsteigewartezeit und Bedienungshäufigkeit nicht berechenbar.</li> </ul>
Dynamische Bestwagsuche für einen Zeitpunkt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrzeit auf jeder Strecke</li> <li>• Abfahrtszeiten der Linienfahrten</li> <li>• Übergangszeit an Haltestellen</li> <li>• Abgangs- bzw. Ankunftszeitpunkt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zeitschnellste Verbindung für den angegebenen Zeitpunkt. Eventuelle Wahlmöglichkeiten zu anderen Zeitpunkten werden nicht berücksichtigt.</li> <li>• Tatsächliche Umsteigezeit und somit die Koordinierung des Fahrplans wird berücksichtigt</li> <li>• Außer der Bedienungshäufigkeit lassen sich alle Kenngrößen für den Zeitpunkt ermitteln.</li> </ul>
Dynamische Bestwagsuche für einen Zeitraum	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrzeit auf jeder Strecke</li> <li>• Abfahrtszeiten der Linienfahrten</li> <li>• Übergangszeit an Haltestellen</li> <li>• Untersuchungszeitraum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zeitschnellste Verbindungen für alle möglichen Abgangszeitpunkte im Untersuchungszeitraum.</li> <li>• Tatsächliche Umsteigezeit und somit die Koordinierung des Fahrplans wird berücksichtigt</li> <li>• Alle Kenngrößen im Untersuchungszeitraum berechenbar.</li> </ul>
Dynamische Mehrwagsuche für einen Zeitraum	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrzeit auf jeder Strecke</li> <li>• Abfahrtszeiten der Linienfahrten</li> <li>• Übergangszeit an Haltestellen</li> <li>• Untersuchungszeitraum</li> <li>• Regeln zur Verbindungswahl</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie bei der dynamischen Bestwagsuche, lassen sich alle Kenngrößen berechnen. Außerdem lassen sich gleichzeitig angebotene Verbindungen bestimmen. Werden z.B. zu einem Zeitpunkt eine direkte Verbindung und eine schnellere Verbindung mit Umsteigen angeboten, können beide Verbindungen berücksichtigt werden.</li> </ul>

Tab. 3.2: Überblick über die Verfahren der Verbindungssuche

Wird eine *dynamische Bestwagsuche für einen Zeitpunkt* durchgeführt, erhält man die zu diesem Zeitpunkt "beste", z.B. die zeit kürzeste, Verbindung zwischen einer Quellzelle und einer Zielzelle. Wie der in **Abbildung 3.13** dargestellte Linienplan und Fahrplan zeigen, ergeben sich für die Abfahrtszeitpunkte 6.10 Uhr und 6.55 Uhr unterschiedliche zeit kürzeste Verbindungen. Der Abfahrts- bzw. der Abgangszeitpunkt kann also die gewählte Verbindung und somit die Kenngrößen einer Ortsveränderung beeinflussen.

Da der "beste" Weg innerhalb eines ÖPNV-Netzes vom Fahrtenangebot zum Abgangszeitpunkt abhängig ist, findet ein dynamischer Bestweg-Suchalgorithmus nur die eine Verbindung, die für den betrachteten Abgangszeitpunkt die frühest mögliche Ankunftszeit anbietet. Das Gesamtfahrplanangebot und eventuelle Wahlmöglichkeiten werden nicht berücksichtigt. Durch die Anwendung eines *dynamischen Mehrwegalgorithmus für einen Zeitraum* können neben der zeit kürzesten Verbindung weitere Verbindungen innerhalb eines Untersuchungszeitraumes ermittelt

werden. Das ÖPNV-Angebot aus **Abbildung 3.13** bietet beispielsweise zwischen 6.00 Uhr und 7.30 Uhr folgende fünf verschiedene Verbindungen an, die mit einem dynamischen Mehrwegalgorithmus bestimmt werden können.



**Abb. 3.13:** Dynamische Verbindungssuche

Ein dynamischer Mehrwegalgorithmus, der zur Verbindungssuche in ÖPNV-Netzen eingesetzt wird, wird in Kapitel 4.3 erläutert.

### Verbindungswahl und Verbindungssplit

Die Routensuche bzw. Verbindungssuche mit Bestwegverfahren oder Sukzessivansätzen erfordert keinen eigenen Arbeitsschritt zur Routenwahl bzw. zum Routensplit, da jeweils nur

eine Route gefunden wird, auf die die Personenfahrten umgelegt werden. Die Anwendung eines Mehrwegverfahrens liefert dagegen etliche Verbindungen, die sich in ihrer räumlichen und zeitlichen Ausprägung unterscheiden. Das Mehrwegverfahren erfordert daher im Anschluß an die Verbindungssuche die zwei zusätzlichen Arbeitsschritte Verbindungswahl und Verbindungssplit.

Im Arbeitsschritt *Verbindungswahl* wird jede in der Verbindungssuche ermittelte Verbindung durch einen Vergleich mit allen anderen Verbindungen bewertet. Dieses Vorgehen ist notwendig, um unlogische Verbindungen, die bei der Anwendung eines Mehrwegverfahrens ermittelt werden können, zu löschen. So kann beispielsweise eine Verbindung, die verglichen mit einer alternativen Verbindung eine gleiche Abfahrtszeit, eine gleiche oder spätere Ankunftszeit und eine größere Umsteigehäufigkeit aufweist, erkannt und gelöscht werden. Um festzulegen, was unter einer unlogischen Verbindung verstanden werden soll, wendet der Planer Regeln an, die in Kapitel 4.3 erläutert werden.

Beim *Verbindungssplit* wird die Verkehrsnachfrage einer Beziehung den angebotenen ÖPNV-Verbindungen dieser Beziehung zugeordnet. Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, das Entscheidungsverhalten der Fahrgäste abzuschätzen. Nach BRAUN (1980, 1983) ist als Grundlage für das Wegewahlverhalten in Straßennetzen die folgende Hypothese anzunehmen:

*Die Verkehrsteilnehmer verhalten sich subjektiv vernünftig und wählen unter den ihrer Ortsveränderung zugrundeliegenden Umständen bzw. Verkehrswegenetzuständen in dem ihnen bekannten Netzteil einen Weg, der ihnen als günstigster erscheint.*

Für das Entscheidungsverhalten der Fahrgäste im ÖPNV kann diese Hypothese wie folgt formuliert werden:

*Die Verkehrsteilnehmer verhalten sich subjektiv vernünftig und wählen unter den ihrer Ortsveränderung zugrundeliegenden Umständen aus dem ihnen bekannten Angebot eine Verbindung, die ihnen als günstigste erscheint.*

Bei dem in **Abbildung 3.13** dargestellten ÖPNV-Angebot können sich bequemere Fahrgäste, z.B. Rentner, für die Verbindungen ohne Umsteigen entscheiden, während zeitempfindliche Berufstätige u.U. die schnelleren Verbindungen mit Umsteigen bevorzugen. Ein Schüler, dessen Unterricht pünktlich um 8.00 Uhr beginnt, kann um diese Zeit nicht erst aus dem Verkehrsmittel aussteigen und muß daher bereits um 6.55 Uhr abfahren. Für einem Berufstätigen mit flexibler Arbeitszeit hat dagegen auch die Verbindung mit Abfahrt um 7.25 Uhr einen Nutzen.

Um spezifische Verhaltensregeln einzubeziehen, wird bei dem in Kapitel 4.3 vorgestellten Verfahren für die Aufteilung der Verkehrsnachfrage auf die angebotenen Verbindungen nach Personengruppen bzw. Fahrtzwecken unterschieden. Außerdem werden zur Beurteilung einer Verbindung nicht nur der Zeitaufwand oder die Umsteigehäufigkeit verwendet, sondern auch die Abfahrts- bzw. Ankunftszeit beurteilt. Dazu muß der Verlauf der Verkehrsnachfrage über den Tag bzw. über den Untersuchungszeitraum durch eine Ganglinie angegeben werden, die die Nachfrage innerhalb eines Zeitintervalls bestimmt. Das Entscheidungsverhalten wird dann für jede fahrtzweckspezifische Nachfragematrix und für jedes Zeitintervall getrennt abgeschätzt.

### 3.4.2 Kenngrößen der Betreiber

Von den betrieblichen Kenngrößen interessieren vor allem

- der *Fahrzeugbedarf* und die *Fahrzeugkilometer*,
- der *Fahrerbedarf* und die erforderlichen *Personalstunden*.

Die Werte dieser Kenngrößen können aus den Fahrzeug- und Fahrereinsatzplänen eines ÖPNV-Angebotes ermittelt werden. Sie sind Eingangsdaten für die Kostenberechnung, die als Ergebnis den betrieblichen Aufwand in Geldeinheiten quantifiziert. Für eine Grobuntersuchung kann die einfache Ermittlung von Fahrzeugkilometern genügen, die mit einem mittleren Kilometerpreis in Kosten umgerechnet werden. Für eine genauere Untersuchung und immer dann, wenn eine verbesserte Effektivität, d.h. ein geringerer mittlerer Kilometerpreis, erwartet wird, muß beim Angebotsentwurf eine Fahrer- und Fahrzeugeinsatzplanung durchgeführt werden. Sie ordnet jeder Fahrt einer Linie einen Fahrer und ein Fahrzeug zu und ermittelt so den Fahrzeug-, Fahrer- und Personalstundenbedarf. Dabei müssen tarifliche Regelungen (Aufrüstzeiten, bezahlte und unbezahlte Pausen) ebenso berücksichtigt werden wie Ein-, Aus- und Umsetzfahrten. Eine Einsatzplanung als Grundlage der Kostenberechnung ist bei Einführung eines Taktverkehrs unumgänglich.

Fahrzeug- und Fahrerbedarf stellen ebenso wie die Kosten absolute Werte dar. Als Anhaltspunkt für die Effektivität einer Planung dienen die betrieblichen Kenngrößen Fahrplanwirkungsgrad, Dienstplanwirkungsgrad (**Tabelle 3.3**) und Kilometerpreis.

Fahrplanwirkungsgrad	$\eta_F = \frac{t_F}{t_F + t_W + t_E}$
Dienstplanwirkungsgrad	$\eta_D = \frac{t_F + t_W + t_E}{t_F + t_W + t_P + t_E + t_S}$
darin bedeuten:	
$t_F$	Zeit zur Fahrgastbeförderung
$t_W$	Wendezeit (einschließlich der in den Fahrzeugumlauf integrierten Pausen)
$t_P$	Pausenzeit (bezahlte Pausen, die nicht in den Fahrzeugumlauf integriert sind)
$t_E$	Zeit für Ein- und Aussetzfahrten
$t_S$	Rüstzeiten und sonstige Verlustzeiten, die sich bei der Dienstplanbildung ergeben

**Tab. 3.3:** Fahrplanwirkungsgrad und Dienstplanwirkungsgrad (LEHNER, 1978)

Der Fahrplanwirkungsgrad gibt an, in welchem Maße die eingesetzten Fahrzeuge produktive Betriebszeit erbringen. Er wird maßgeblich durch die Wendezeiten bestimmt, die u.U. auch Fahrerpausen enthalten können, wenn sie ausreichend lang sind und der Fahrer mit dem Fahrzeug pausiert.

Andere betriebliche Kenngrößen, wie Personenkilometer und Linien- oder Streckenlänge, beschreiben die Effektivität des Verkehrsangebotes oder die Struktur des Netzes. Sie eignen sich für Vergleiche mit anderen Planfällen oder anderen Untersuchungsgebieten, beinhalten aber keine relevanten Aussagen über Qualität oder Kosten.

Eine detaillierte Abschätzung der Betriebskosten, die nicht auf Kilometerpauschalen beruht, erfordert für jede Linie bzw. für eine Gruppe von Linien die fünf Arbeitsschritte

1. Erstellung eines Fahrplans mit der genauen Abfahrtszeit für jede Fahrt der Linie,



2. Erstellung von Fahrzeug- und Fahrereinsatzplänen,
3. Ermittlung der erforderlichen Fahrereinsatzstunden (→ Personalkosten),
4. Ermittlung der erforderlichen Fahrzeuge (→ fixe Fahrzeugkosten),
5. Ermittlung der erforderlichen Fahrzeugkilometer (→ laufleistungsabhängige Fahrzeugkosten).

Die ersten beiden Arbeitsschritte sind eine Aufgabe des Feinentwurfs und wurden dort behandelt. Die Arbeitsschritte drei bis fünf zur Kostenrechnung werden jeweils für eine Linie oder eine Liniengruppe durchgeführt. Dabei muß gewährleistet sein, daß die eingesetzten Fahrer nur auf der betrachteten Linie/Liniengruppe beschäftigt werden. Die Fahrzeuge können dagegen auch für sonstige Fahrten außerhalb der Linie/Liniengruppe verwendet werden. Dann müssen allerdings die jährlichen Fahrzeugkilometer für die Linie/Liniengruppe und die sonstigen Fahrten bekannt sein. Aus diesen beiden Größen wird ein Faktor  $a$  berechnet, der den Anteil der Linie an den gesamten Fahrzeugkilometern ausdrückt:

$$a = \frac{Fzgkm_{Linie}}{Fzgkm_{Linie} + Fzgkm_{Sonstige}}$$

Für die Ermittlung der Personalkosten ist ein anteiliges Aufteilen der Kosten auf sonstige Fahrten nicht möglich, weil nicht nur die Arbeitszeit, sondern auch die zeitliche Verteilung der Fahrten bekannt sein muß.

Für jeden Tagestyp, für den ein eigener Fahrplan vorgesehen ist, muß eine separate Einsatzplanung und Kostenrechnung durchgeführt werden. Dabei wird in der Regel zwischen den Tagestypen

- Montag bis Freitag mit Schule
- Montag bis Freitag ohne Schule
- Samstag,
- Sonntage und Feiertage

unterschieden. Die Berechnung der Personalkosten und der Fahrzeugkosten unterscheidet sich dadurch, daß die Personalkosten zuerst für einen Tag ermittelt und auf das Jahr hochgerechnet werden. Bei den Fahrzeugkosten werden alle Kosten gleich auf ein Jahr bezogen. Aus diesem Grund werden bei dem in Kapitel 4.4 erläuterten Verfahren zur Kostenermittlung Personal- und Fahrzeugkosten getrennt berechnet und abschließend zusammengezählt.

### 3.5 Bewertung und Mängelanalyse

Im Arbeitsschritt Bewertung werden die bei der Wirkungsermittlung berechneten Kennwerte des Angebotes im Hinblick auf die Zielvorgaben beurteilt. Dabei können die Kennwerte eines Angebotes

- mit vorgegebenen Anspruchsniveaus verglichen werden (absolute Bewertung) oder
- den Kennwerten des vorhandenen Angebotes oder eines weiteren Planfalles gegenübergestellt werden (relative Bewertung).

Ziel der Bewertung ist es, Mängel des untersuchten Angebotes zu erkennen. Die erkannten Mängel müssen dann in der Mängelanalyse lokalisiert und auf ihre Ursachen untersucht werden. Sind Ort und Ursache eines Mangels bekannt, können gezielte Maßnahmen zur Verbesserung einer Lösung ergriffen werden.

### 3.5.1 Kenngrößen der Benutzer

Zur Bewertung der Angebotsqualität können die Kenngrößen von

- Haltestellen,
- Linien und
- Beziehungen

ausgewertet werden. Bei den Haltestellen wird die Haltestellenlage zu den Nutzungen, d.h. die Kenngröße Fußweglänge, begutachtet. Für jede Linie können die linienbezogenen Kenngrößen Fahrgeschwindigkeit, Direktheit und Bedienungshäufigkeit betrachtet werden. In die Beurteilung von Beziehungen gehen neben der Haltestellenlage und den linienbezogenen Kenngrößen zusätzlich die räumlichen und zeitlichen Verknüpfungen der Linien ein.

Eingangsdaten der Bewertung sind die Kennwerte benutzerbezogener Kenngrößen, die als Ergebnis der Wirkungsermittlung bekannt sind. Für die Bewertung werden die Kenngrößen von Beziehungen verwendet, da deren Kennwerte die differenziertesten Informationen enthalten. Mit Hilfe eines Berechnungsprogramms können die Kennwerte jeder Beziehung ausgewertet, d.h. den heutigen Werten oder Anspruchsniveaus gegenübergestellt, werden. Auf diese Weise ist es möglich, die Beziehungen zu ermitteln, die einen Mangel aufweisen. Ein Mangel ist gegeben, wenn eine oder mehrere Kenngrößen einer Beziehung

- schlechtere Werte als das heutige Angebot oder
- absolut ungünstige Werte

aufweisen. Die Bewertungsergebnisse werden in Listenform und graphisch für jede Beziehung oder zusammengefaßt, für jede Verkehrszelle oder das gesamte ÖPNV-Netz, ausgegeben. Dabei kann die Bedeutung einer Beziehung, die sich aus der Verkehrsnachfrage ergibt, berücksichtigt werden.

Werden im Arbeitsschritt Bewertung Mängel entdeckt, schließt sich an die Bewertung eine Mängelanalyse an. Sie lokalisiert die Elemente, die Mängel verursachen und weist auf die Ursachen der Mängel hin. **Abbildung 3.14** zeigt typische mangelbehaftete Elemente, Ursachen von Mängeln und deren Wirkungen. Bei der Mängelanalyse wird versucht, ausgehend von den beobachteten Wirkungen, mangelbehaftete Elemente schrittweise einzugrenzen und zu benennen. Das geschieht für

- eine Haltestelle durch die Angabe des Haltestellennamens,
- eine Linie durch die Angabe des Liniennamens
- eine Umsteigehaltestelle durch die Angabe des Haltestellennamens und der nicht koordinierten Linien,
- das Liniennetz durch die Angabe der Quelle-Ziel-Beziehung.



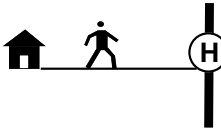
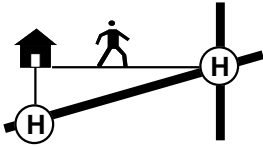
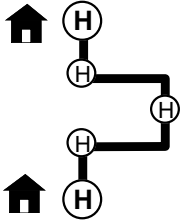
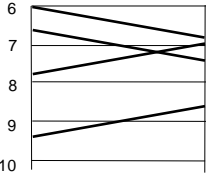
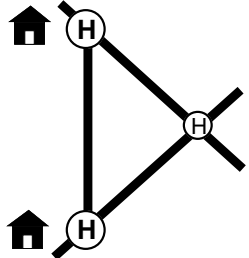
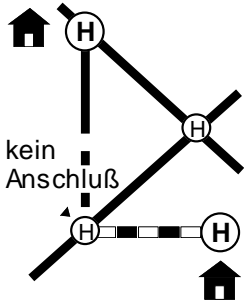
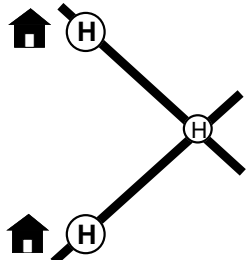
Element	Ursache	Wirkung
Haltestelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• schlechte Haltestellenlage</li> </ul>	langer Fußweg 
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• schlechte Angebotsqualität an der nächstgelegenen Haltestelle</li> </ul>	Fahrgäste weichen auf weiter entfernte Haltestelle mit besserem Angebot aus 
Linie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Fahrgeschwindigkeit</li> <li>• Umwegigkeit</li> </ul>	lange Fahrzeit 
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Bedienungshäufigkeit</li> <li>• geringe Regelmäßigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Bedienungshäufigkeit für alle Verbindungsrouten, die die Linie benutzen</li> <li>• unregelmäßige Verbindungen</li> </ul> 
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• niedrige Bedienungshäufigkeit oder lange Fahrzeit einer direkten Linie</li> </ul>	direkte Linie bietet kein gutes Angebot und die Fahrgäste weichen auf andere, umwegige Verbindungen aus 
Umsteigehaltestelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umsteigewartezeit zu groß, kein Anschluß</li> </ul>	Eine Route mit n Umsteigevorgängen bietet an den Umsteigehaltestellen keine Anschlüsse. Die Fahrgäste weichen auf andere Verbindungen mit n+1 Umsteigevorgängen aus 
Liniennetz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• schlechte Vernetzung</li> <li>• geringe Zahl von Linien</li> </ul>	Fahrgäste müssen umwegige Verbindungen benutzen. Teile der Bevölkerung haben kein Angebot. 

Abb. 3.14: Elemente, Ursachen von Mängeln und Wirkungen

Die Eingrenzung mangelbehafteter Elemente und die Hinweise auf die Ursachen ermöglichen es dem Planer, zielgerichtete Veränderungen des Angebotes vorzunehmen. Die Mängelanalyse als Voraussetzung einer Lösungsverbesserung kann manuell oder rechnergestützt durchgeführt werden.

Bei der *manuellen* Mängelanalyse begutachtet der Planer die Verbindungen einer mangelhaft beurteilten Beziehung. Der Planer vergleicht die vom Benutzermodell berechneten Verbindungen mit den von ihm geplanten Verbindungen. Stimmen berechnete und geplante Verbindungen überein, liegt der Mangel an einer der benutzten Linien. Andernfalls müssen Linienplan und Fahrplan überprüft werden, um festzustellen, warum die geplanten Verbindungen nicht benutzt werden können. In der Regel wird in diesem Fall eine unzureichende zeitliche Verknüpfung als Ursache für die Abweichung von berechneter und geplanter Verbindung erkannt. Bei der manuellen Mängelanalyse können wegen des Arbeitsaufwandes nicht alle mangelhaften Beziehungen, sondern nur die wichtigsten, d.h. die am stärksten nachgefragten Beziehungen, analysiert werden.

Bei der *rechnergestützten* Mängelanalyse wird die bei der manuellen Mängelanalyse angewendete Vorgehensweise formalisiert. **Abbildung 3.15** zeigt den Ablauf der Mängelanalyse für eine Beziehung. Das Berechnungsprogramm überprüft für eine mangelhaft beurteilte Beziehung Schritt für Schritt

- die Fußweglänge,
- die benutzten Linien,
- die Verbindungen,
- die räumliche und die zeitliche Verknüpfung.

Die Analyse einer Beziehung wird abgebrochen, sobald ein Mangel eingegrenzt werden kann. Die Einführung sogenannter Verbindungsklassen reduziert bei der Überprüfung der Verbindungen die Zahl der Verbindungen, die im letzten Arbeitsschritt auf ihre räumliche und zeitliche Verknüpfung beurteilt werden müssen. Dabei umfaßt eine Verbindungsklasse alle Verbindungen, die die gleiche Linienfolge benutzen und die gleichen Gehzeiten, Fahrzeiten und Umsteigezeiten aufweisen. Die Verbindungen einer Klasse unterscheiden sich nur durch die Abfahrtszeit bzw. die Ankunftszeit. Durch die Zusammenfassung zu Verbindungsklassen entfällt die zeitliche Komponente, und es verbleibt die Beurteilung einer Route, die mit einer optimalen Route verglichen werden kann. Durch den Rechnereinsatz können alle mangelhaft beurteilten Beziehungen analysiert werden. Als Ergebnis erhält man eine Liste der Netzelemente, die bei einer Angebotsverbesserung berücksichtigt werden müssen.

Überprüfung der Fußweglänge getrennt für Zugangs- und Abgangsweg		
• Es gibt genau eine Ein- bzw. Ausstiegshaltestelle, die zu weit entfernt ist:	→	• schlechte Lage der Haltestelle
• Es gibt mehrere Ein- bzw. Ausstiegshaltestellen, von denen eine Haltestelle in akzeptabler Entfernung liegt:	→	• schlechtes ÖPNV-Angebot an der Haltestelle
• Es gibt mehrere Ein- bzw. Ausstiegshaltestellen, die alle zu weit entfernt sind:	→	• schlechte Lage der Haltestelle
<i>Anmerkung: die Haltestellenlage sollte bereits beim Entwurf des Haltestellennetzes überprüft werden.</i>		



Überprüfung der benutzten Linien		
• Die Fahrgeschwindigkeit der Linie auf dem benutzten Linienabschnitt unterschreitet eine vorgegebene fahrzeugspezifische Mindestgeschwindigkeit, und der Anteil der Fahrzeit überschreitet einen vorgegebenen Prozentsatz der Reisezeit:	→	• geringe Fahrgeschwindigkeit auf einem Linienabschnitt
• Die Umwegigkeit der Linie auf dem benutzten Linienabschnitt überschreitet eine vorgegebene maximale Umwegigkeit, und der Anteil des Fahrtlänge überschreitet einen vorgegebenen Prozentsatz der Gesamtweglänge:	→	• geringe Direktheit auf einem Linienabschnitt
<i>Anmerkung: die Fahrgeschwindigkeit und die Direktheit der Linien sollte bereits beim Entwurf einer Linie in einem eigenen Arbeitsschritt geprüft werden.</i>		



Überprüfung der Verbindungen		
Bestimme die Zahl der Verbindungsklassen für die Beziehung. Eine Verbindungsklasse enthält dabei alle Verbindungen, die die gleiche Linienfolge und die gleichen Haltestellen bei gleichen Umsteigezeiten benutzen. Die Verbindungen einer Klasse unterscheiden sich also nur durch die Abfahrtszeit bzw. die Ankunftszeit.		
• Es gibt mehr als eine vorgegebene maximale Anzahl n von Verbindungsklassen, und es entfällt auf die n besten Verbindungsklassen weniger als ein vorgegebener Prozentsatz der Verkehrsnachfrage:	→	• geringe zeitliche Regelmäßigkeit einer oder mehrerer Linien, nicht getaktet oder ungleicher Takt



Überprüfung der räumlichen und zeitlichen Verknüpfungen		
Vergleiche die berechnete Linienfolge der Verbindungsklassen mit der Linienfolge bei optimalen Anschlüssen. Die Linienfolge bei optimalen Anschlüssen ergibt sich aus einer Bestwagsuche im Liniennetz, bei der die Umsteigezeit für alle Haltestellen als optimal (2 bis 5 Minuten) angenommen wird. Haltestellen, an denen bewußt nicht umgestiegen werden soll, müssen für Umsteigevorgänge gesperrt werden.		
• Die berechnete Linienfolge unterscheidet sich von der optimalen Linienfolge:	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Anschlüsse der Linien, die bei der Bestwagsuche benutzt werden, an ihren Umsteigehaltestellen,</li> <li>• niedrige oder unterschiedliche Fahrzeugfolgezeit der benutzten Linien.</li> </ul>
• Die berechnete Linienfolge unterscheidet sich nicht von der optimalen Linienfolge:	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>• schlechte Vernetzung</li> <li>• geringe Zahl der Linien</li> </ul>

Abb. 3.15: Ablauf der Mängelanalyse für eine Beziehung

### 3.5.2 Kenngrößen der Betreiber

Zur Bewertung des betrieblichen und finanziellen Aufwandes werden die Fahrzeugkilometer, die Zahl der erforderlichen Fahrzeuge, die Kosten und die Einnahmen für den heutigen und den geplanten Zustand verglichen. Aus den Kosten und den Einnahmen ergibt sich der Kostendeckungsfehlbetrag, der vom Aufgabenträger des ÖPNV zu finanzieren ist. In der Planungspraxis wird der maximal finanzierbare Kostendeckungsfehlbetrag bekannt sein und die mögliche Angebotsqualität, d.h. die Netzform und die Bedienungshäufigkeit begrenzen. Als Anhaltspunkt für die Effektivität einer Planung dient der Vergleich der Kilometerpreise für das heutige und das geplanten ÖPNV-Angebot.

Um betriebliche Mängel des Angebotes zu lokalisieren, werden die betrieblichen Kenngrößen und die Kosten jeder Linie analysiert. Dazu eignen sich

- der Fahrplanwirkungsgrad,
- der Dienstplanwirkungsgrad und
- der Kilometerpreis einer Linie.

Ergeben diese Kenngrößen für eine Linie ungünstige Werte, müssen folgende Mängelursachen untersucht werden:

- *Fahrgeschwindigkeit:* Bei einer geringen durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit erbringt eine Linie eine niedrige Kilometerleistung und es ergibt sich dementsprechend ein hoher Kilometerpreis.
- *Fahrzeugbedarf:* Ein hoher Fahrzeugbedarf und somit hohe Fahrzeugkosten ergeben sich entweder aufgrund von Fehlern bei der Fahrzeugumlaufbildung oder nachfragebedingt, wenn zeitgleich Verstärkerfahrzeuge erforderlich sind.
- *Bedarf an Personalstunden:* Unnötige Personalkosten entstehen, wenn die Fahrerpausen nicht in den Umlauf integriert werden können oder wenn über die erforderlichen Pausenzeiten hinaus Standzeiten bezahlt werden müssen.
- *Kilometeranteil für Ein- und Aussetzfahrten:* Wenn die Fahrer nicht kontinuierlich über einen längeren Zeitraum eingesetzt werden können (wie z.B. bei Verstärkerfahrten), ergibt sich für die Ein- und Aussetzfahrten ein hoher Anteil an der Gesamtkilometerleistung. Die gleiche Wirkung verursachen lange Einsetz- und Aussetzfahrten, die notwendig sind, wenn die erste bzw. letzte Haltestelle ungünstig zum Fahrzeugstellplatz liegt.

## 4 Rechenmodell

Ein ÖPNV-Angebot, das als Rechenmodell formuliert wird, stellt, wie alle Modelle, eine Abstraktion der realen Welt dar. Ziel der Modellierung ist die modellgestützte Vorbereitung von Entscheidungen, die in der realen Welt getroffen werden. Das Rechenmodell besteht dabei aus einzelnen Objekten und den Beziehungen bzw. Wirkungen, die zwischen diesen Objekten bestehen. Für ein Rechenmodell müssen daher

- die Objekte, das sind Fahrgäste, Verkehrszellen, Haltestellen, Linien, Fahrten der Linien, Fahrer und Fahrzeuge, beschrieben und
- die Wirkungen zwischen den Objekten formuliert werden.

In diesem Kapitel wird ein Rechenmodell entwickelt, das sich aus

- einem Netzmodell,
- einem Benutzermodell,
- einem Betreibermodell und
- einem Modell zur Fahrereinsatzplanung

zusammensetzt. Das Netzmodell bildet die relevanten Attribute eines ÖPNV-Angebotes ab und erfordert Methoden, mit denen die einzelnen Elemente des Angebotes erzeugt und bearbeitet werden können. Das Benutzermodell simuliert die Wirkungen eines ÖPNV-Angebotes auf die Benutzer des ÖPNV und wird zur Berechnung der benutzerbezogenen Kenngrößen eingesetzt. Das Betreibermodell ermöglicht die Berechnung des finanziellen Aufwandes. Diese drei Modelle sind essentielle Bestandteile des Rechenmodells, ohne die ein rechnergestütztes Entwurfsverfahren nicht möglich ist. Das Modell zur Fahrereinsatzplanung soll dann beispielhaft zeigen, daß das Rechenmodell um weitere Bestandteile ergänzt werden kann, die den Planer mit Methoden des Operations Research bei der Lösungsfindung unterstützen. Zu Beginn des Kapitels wird kurz das Prinzip der objektorientierten Programmierung vorgestellt. Sie bietet sich für die Entwicklung eines Dialogprogrammes an, da die Elemente eines ÖPNV-Angebotes sehr anschaulich als Objekte aufgefaßt werden können.

### 4.1 Prinzip der objektorientierten Programmierung

Die objektorientierte Modellierung stellt eine neue Denk- und Programmierweise dar, die ein besseres Verständnis von Problemen, eine übersichtlichere Softwareentwicklung und eine einfachere Softwarewartung verspricht. Fundamentale Elemente sind diskrete Objekte, die sowohl aus Daten als auch aus Methoden zur Manipulation dieser Daten bestehen (vgl. RUMBAUGH et al., 1991). Die objektorientierte Programmierung bedeutet eine Abkehr von der sequentiellen Problemlösung, bei der Funktionen und Unterprogramme nacheinander in einer vorgegebenen Reihenfolge durchlaufen werden. Statt dessen werden Objekte erzeugt, die Eigenschaften (Merkmale) und Verhaltensweisen (Methoden) haben. Objekte reagieren auf bestimmte Nachrichten, führen spezifische Aktivitäten durch und senden ihrerseits Nachrichten. Die Reihenfolge, in der die Objekte aktiviert werden, liegt nicht von vornherein fest, sondern ergibt sich erst zur Laufzeit des Programms. Aus diesem Grund eignet sich die objektorientierte Programmierung besonders für die Gestaltung menügesteuerter, interaktiver Programme, die auf Nachrichten des Benutzers



(z.B. Auswahl eines Menüfeldes) reagieren und diese Nachrichten an ein oder mehrere Objekte (z.B. Haltestellenobjekt) weiterleiten.

Eine objektorientierte Programmiersprache (C++, Smalltalk, Simula) unterscheidet sich von anderen Programmiersprachen (C, Fortran) durch die Eigenschaften Datenabstraktion, Vererbung und Polymorphismus (LEMBERG/SCHMADERER, 1991). Diese drei Eigenschaften sollen am Beispiel eines Haltestellenobjektes erläutert werden, das als abstraktes Modell eine reale Haltestelle in einem Netzmodell repräsentiert. Um eine Haltestelle zu beschreiben, müssen die Merkmale der Haltestelle, das sind Koordinate und Name der Haltestelle, bekannt sein. Die x-Koordinate und die y-Koordinate entsprechen dabei zwei Zahlen (natürliche Zahl = Integer-Zahl oder reelle Zahl = Real-Zahl), der Haltestellenname ist eine Folge (String) von Buchstaben (Character). Außerdem sind Methoden erforderlich, mit denen der Planer das Haltestellenobjekt bearbeiten kann. Das Objekt muß auf einem Bildschirm oder Drucker als Haltestelle ausgegeben werden, so daß der Planer das Objekt erkennen, markieren und die Merkmale des markierten Objektes verändern kann. Das Merkmal Koordinate eines Haltestellenobjektes läßt sich z.B. durch das Verschieben der markierten Haltestelle mit einer Maus verändern, der Name kann mit Hilfe eines Dialogfensters bearbeitet werden.

- Die *Datenabstraktion* ermöglicht die Zusammenfassung der fundamentalen Datentypen Integer, Real und Character zu einem neuen abstrakten Datentyp, der z.B. "Haltestelle" benannt wird. Dieser neue Datentyp "Haltestelle" wird durch eine sogenannte Klasse definiert, die die typischen Merkmale gleichartiger Objekte zusammenfaßt. Die Klasse legt außerdem die Methoden fest, mit denen die Merkmale eines Objektes dieser Klasse verändert werden können.
- Die *Vererbung* vereinfacht die Einführung neuer Klassen. Um z.B. Verkehrszellenobjekte erzeugen zu können, muß eine Klasse "Verkehrszelle" definiert werden. Da die Merkmale und Methoden einer Verkehrszelle und einer Haltestelle ähnlich sind, bietet es sich an, die Klasse "Verkehrszelle" aus der Klasse "Haltestelle" abzuleiten. Die neue Klasse erbt die Merkmale (Koordinate, Name) und die Methoden (Ausgabe, Verschieben, Name ändern) der sogenannten Vaterklasse "Haltestelle". Zusätzlich erforderliche Merkmale (z.B. Zellenummer, Einwohnerzahl) und Methoden (Eingabe der Einwohnerzahl) einer Verkehrszelle werden hinzugefügt.
- Die *Polymorphismus*-Fähigkeit (= Vielgestaltigkeit) erlaubt, daß Objekte, die zwar ähnlich sind, aber verschiedenen Klassen angehören, mit Funktionen gleichen Namens bearbeitet werden können. Verschiedene Objekte können deswegen auf die gleiche Nachricht objektspezifisch anders reagieren. Eine Ausgabefunktion mit dem Namen "Output" kann für die Klasse "Haltestelle" z.B. so programmiert werden, daß jede Haltestelle auf dem Bildschirm durch ein H dargestellt wird. Die gleichnamige Ausgabefunktion für die Klasse "Verkehrszelle" zeichnet dagegen einen Punkt und die Zellenummer.

Wesentlich für die Realisierung eines Rechenmodells mit Hilfe der objektorientierten Programmierung ist eine problemspezifische Definition von Klassen. Jede Klasse ist ein Prototyp für die Konstruktion von Objekten und legt die Merkmale und die Methoden für die Objekte dieser Klasse fest. Beim Entwurf einer Klasse ergeben sich die Merkmale und Methoden aus den Fragen oder Nachrichten, auf die ein Objekt dieser Klasse antworten können muß. Ein Objekt der Klasse Haltestelle muß beispielsweise die Fragen "Wie heißt du?" und "Wo liegst

du?" beantworten und auf die Nachricht "Zeichne dich" oder "Zeichne deinen Einzugsbereich" reagieren können.

## 4.2 Netzmodell

Ein *Netzmodell* für den ÖPNV muß die räumliche und zeitliche Struktur des Verkehrsangebotes abbilden. Das Netzmodell besteht aus einer Menge von Elementen, die alle relevanten Daten von Verkehrsnetz, Linienplan, Fahrplan, Einsatzplänen und Verkehrszellen beinhalten. Um die Elemente in das Modell einzugeben und zu bearbeiten, ist ein Netzeditor und ein Fahrplaneditor erforderlich. Mit dem Netzeditor lassen sich die räumlichen Merkmale der Elemente Verkehrszelle, Haltestelle, Strecke und Linie bearbeiten. Der Fahrplaneditor dient zur Manipulation der zeitlichen Merkmale einer Linie, d.h. zur Bearbeitung einzelner Linienfahrten. Der Datenbestand des Netzmodells und die im Netz- und Fahrplaneditor implementierten Methoden zur Datenbearbeitung stellen eine Datenbank dar.

### 4.2.1 Netzeditor

Der Netzeditor stellt die Methoden bereit, mit denen die Netzobjekte des ÖPNV-Angebotes

- Verkehrszelle,
- Haltestelle,
- Strecke und
- ÖPNV-Linie

verwaltet und die Merkmale der Objekte modifiziert werden können. Der Netzeditor sorgt dafür, daß die Netzobjekte im Hinblick auf ihre definierten Eigenschaften und zulässigen Grenzen fehlerfrei sind und daß die Datenkonsistenz zwischen den Netzobjekten gewährleistet ist. In **Abbildung 4.1** ist die Benutzeroberfläche eines Netzeditor dargestellt.

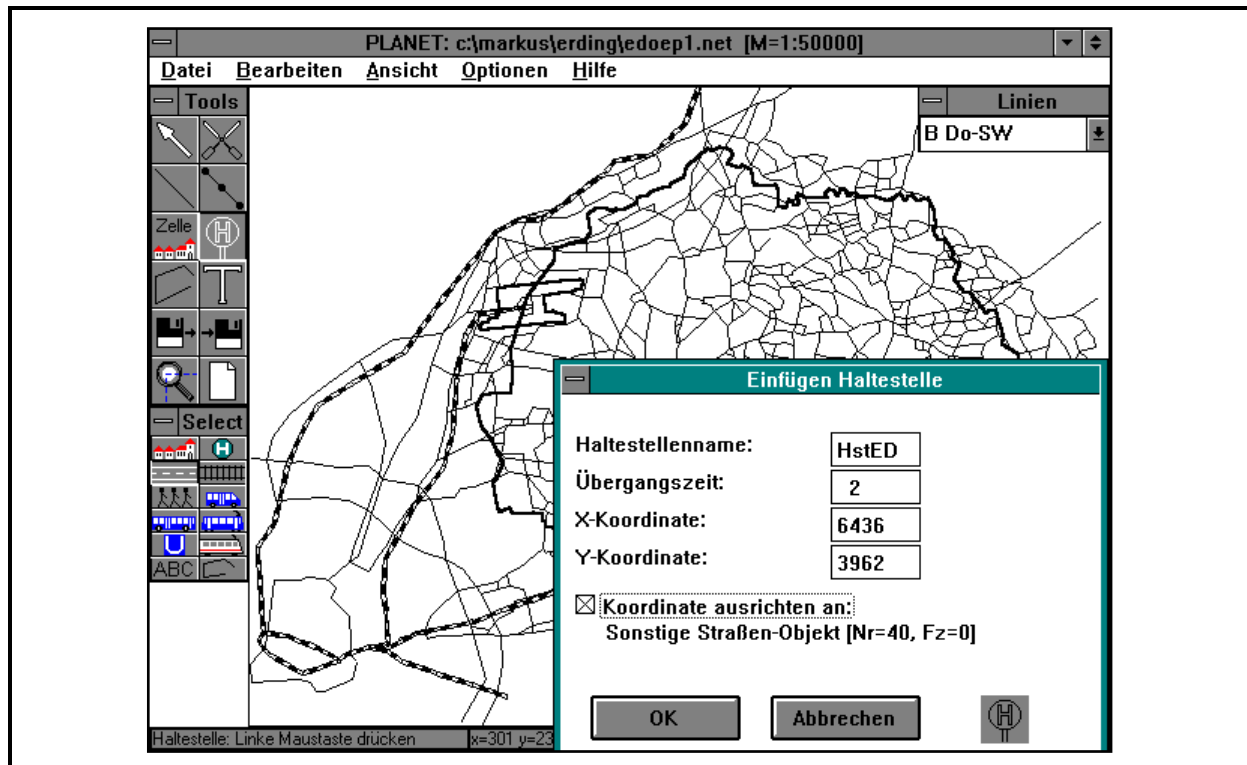


Abb. 4.1: Benutzeroberfläche des Netzeditors

**Abbildung 4.2** zeigt eine Zusammenstellung wichtiger Merkmale und Methoden, die charakteristisch für die Netzobjekte sind. Ausgehend von einer Basisklasse, die die gleichartigen Eigenschaften aller Netzobjekte umfaßt, können bei der objektorientierten Programmierung die einzelnen Netzobjekte um spezifische Merkmale und Methoden ergänzt werden. Während beispielsweise für alle Netzobjekte über die Variable "Farbe" eine objektspezifische Darstellung auf dem Bildschirm oder Drucker erreicht werden kann, haben nur Haltestellenobjekte eine Variable mit dem Namen "Übergangszeit". Die Methoden zur Bearbeitung der verschiedenen Netzobjekte besitzen den gleichen Namen und erfordern vom Planer u.U. gleiche Aktionen, in ihrer Wirkung können sie sich jedoch unterscheiden. Die Methode "Verschieben" verändert die Koordinaten eines markierten Objektes entsprechend den Mausbewegungen des Planers. Bei den Punktobjekten Verkehrszelle und Haltestelle kommt es dabei zu einer Koordinatentranslation. Bei einem Streckenobjekt mit einer Anfangs- und einer Endkoordinate können dagegen eine oder beide Koordinaten verschoben werden.

Objekt	Merkmal (Variable)		Methode
	Name	Beispiel	





alle Objekte (Basisklasse)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Farbe</li> <li>• Schrift</li> <li>• Schriftgröße bzw. Liniendicke</li> <li>• Bildschirmkoordinaten (Pixelkoordinaten)</li> </ul>	rot, blau Courier	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfügen</li> <li>• Löschen</li> <li>• Einlesen von Datei</li> <li>• Speichern auf Datei</li> <li>• Ausgabe auf Bildschirm/Drucker</li> <li>• Markieren auf Bildschirm</li> <li>• Merkmale verändern</li> <li>• Verschieben</li> </ul>
Verkehrszelle 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Koordinate (x,y)</li> <li>• Zellennummer</li> <li>• Zellenname</li> <li>• Einwohnerzahl</li> </ul>	(1000, 2000) Zelle 100 Burgdorf 100 Einwohner	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausgabe der Strukturdaten</li> </ul>
Haltestelle 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Koordinate (x,y)</li> <li>• Haltestellencode</li> <li>• Haltestellenname</li> <li>• Übergangszeit</li> </ul>	(1000, 2000) BDORF Burgdorf-Mitte 2 Minuten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausgabe von Einzugsbereichen</li> </ul>
Strecke 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anfangskoordinate (x,y)</li> <li>• Endkoordinate (x,y)</li> <li>• Fahrzeit</li> <li>• Länge</li> <li>• Richtung</li> <li>• Teilnetz</li> <li>• Nummer</li> <li>• Belastung</li> </ul>	(1000, 2000) (2000, 2000) 10 Minuten 100 Meter Einrichtung Straße/Schiene  100 Personen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausgabe von Belastungsbalken und -mengen</li> </ul>
Linie 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Name der Linie</li> <li>• Linientyp</li> <li>• Liniennummer</li> <li>• Liste der Haltestellen</li> <li>• Liste der Strecken</li> <li>• Liste der Fahrten</li> </ul>	Bus 1 Bus 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Linienaufbereitung</li> <li>• Kenngrößen der Linie</li> </ul>

Abb. 4.2: ausgewählte Merkmale und Methoden der Netzobjekte

Die Netzobjekte werden intern in Listen verwaltet, d.h. für Verkehrszellen gibt es eine Verkehrszellenliste, für die Haltestellen eine Haltestellenliste usw. Die Netzobjekte können u.a. mit folgenden Methoden bearbeitet werden:

- *Einfügen:* Der Planer erzeugt ein Objekt, das in die jeweilige Liste eingefügt wird. Dazu müssen alle Objektmerkmale auf geeignete Weise z.B. über die Maus (Koordinaten) oder über die Tastatur (Name) mit Werten besetzt werden.
- *Löschen:* Ein markiertes Objekt wird aus der entsprechenden Liste gelöscht.
- *Einlesen:* Die vorhandenen Daten eines Netzes werden aus einer sogenannten Netzdatei eingelesen, mit den Daten werden Objekte erzeugt und die Objekte in die Listen eingefügt. Die Netzdatei stellt dabei die externe Form der gesamten Netzinformation dar.
- *Speichern:* Die Netzobjekte werden gespeichert, d.h. jedes Objekt schreibt seine Merkmale in geeigneter Form in die Netzdatei.

- *Ausgabe:* Die Netzobjekte werden auf den Bildschirm oder Drucker gezeichnet.
- *Markieren:* Ein Netzobjekt wird mit der Maus markiert, wenn die Mausposition innerhalb der Objektbegrenzungen liegt. Dazu müssen alle Listen durchsucht und das entsprechende Objekt z.B. durch eine gestrichelte Linie gekennzeichnet werden (**Abbildung 4.3**). Nachdem bei der Darstellung von Verkehrsnetzen mehrere Objekte übereinander liegen können, muß auf diese besondere Situation aufmerksam gemacht werden. Das markierte Objekt wird in einer Statuszeile beschrieben und der Planer kann bei Bedarf weiter suchen.

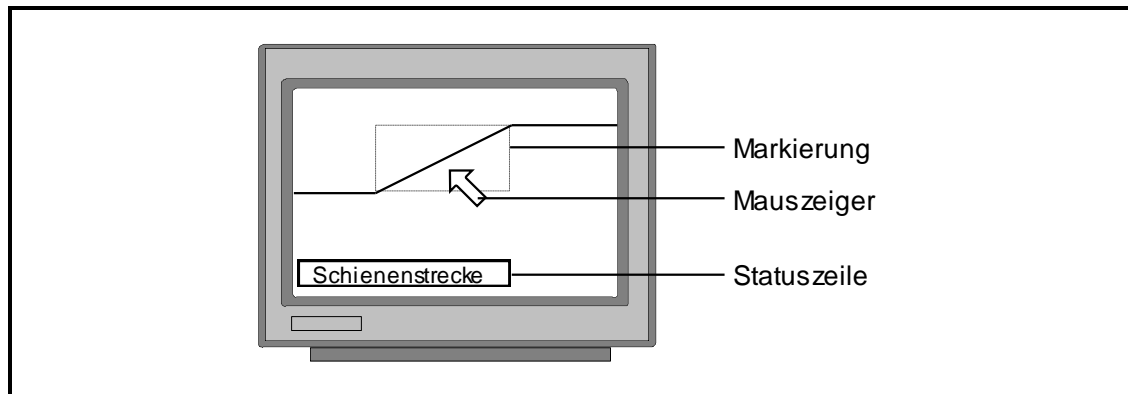


Abb. 4.3: Markieren eines Netzobjektes

- *Verschieben:* Die Koordinaten einer markierten Verkehrszelle, Haltestelle oder Strecke lassen sich mit Hilfe einer Maus am Bildschirm verschieben. Für eine ÖPNV-Linie ist diese Methode nicht geeignet, da sie auf einem Verkehrsträger Straße oder Schiene verläuft.
- *Verändern:* Nachdem ein Netzobjekt markiert ist, kann der Planer den Merkmalen des Objektes andere Werte zuweisen. Durch einen Doppelklick oder eine andere "Nachricht" werden dem Planer objektspezifische Dialogfenster angeboten (**Abbildung 4.4**).

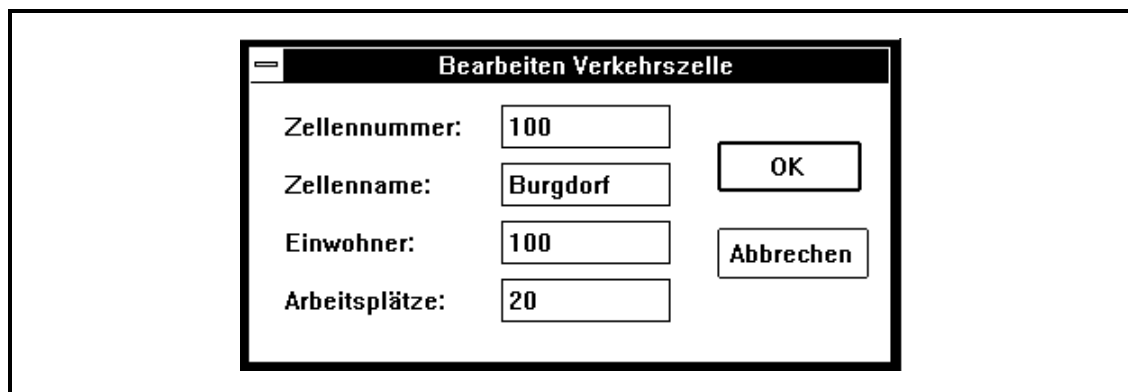


Abb. 4.4: Verändern der Merkmale eines Netzobjektes

Neben diesen Grundmethoden zur Bearbeitung der Objekte eines Netzmodells können andere objektspezifische Methoden sinnvoll oder erforderlich sein, die den Bearbeitungsprozeß vereinfachen. Nachdem die Netzobjekte in einem Gesamtzusammenhang stehen und jede Veränderung eines Objektes Auswirkungen auf andere Objekte des Gesamtsystems haben kann, sind außerdem Methoden notwendig, die auf Nachrichten einzelner Objekte reagieren und das Gesamtsystem aktualisieren. Nachfolgend werden die Netzobjekte Verkehrszelle, Haltestelle,

Strecke und Linie und ihre spezifischen Eigenschaften genauer beschrieben. Zusätzlich zu diesen vier ÖPNV-Netzobjekten können andere Objekte, wie topographische Linien, Matrizen oder erläuternde Texte, den Nutzen des Netzeditors erhöhen.

#### 4.2.1.1 Verkehrszelle

Eine Verkehrszelle ist ein flächiges Objekt, das im Netzmodell auf einen Zellenschwerpunkt reduziert wird. Sie repräsentiert den Einwohnerschwerpunkt der Verkehrszelle. Dieser Zellenschwerpunkt hat die Merkmale

- Nummer der Verkehrszelle,
- Name der Verkehrszelle und
- Koordinate der Verkehrszelle.
- Strukturdaten (Einwohner, Arbeitsplätze ...) der Verkehrszelle.

Jedem Verkehrszellenschwerpunkt wird im Netzmodell genau ein sogenanntes Stutzenpaar zugeordnet, das die Verknüpfung zu einer Verkehrszellen-Matrix darstellt. Jede Verkehrszelle muß über mindestens eine Haltestelle an das Verkehrsnetz angeschlossen werden. Verkehrszelle und Haltestelle sind durch einen Fußweg verbunden.

#### 4.2.1.2 Haltestelle

Eine Haltestelle wird durch die Merkmale

- Haltestellencode,
- Haltestellennamen,
- Haltestellenkoordinate und
- Übergangszeit

beschrieben. Die Übergangszeit gibt die Zeit an, die ein Fahrgast beim Umsteigen benötigt, um von der Zubringerlinie zur Anschlußlinie zu gelangen. Eine Haltestelle muß nicht durch ein eigenständiges Merkmal als Umsteigehaltestelle charakterisiert werden. Ob Fahrgäste an einer Haltestelle umsteigen können, ist nicht von der Haltestelle, sondern von den Abfahrts- und Ankunftszeiten der Linien abhängig, die die Haltestelle bedienen. Die Haltestellenkoordinate muß mit der Anfangs- oder der Endkoordinate einer Strecke übereinstimmen, d.h. eine Haltestelle kann nur in ein vorhandenes Straßen- oder Schienennetz eingefügt werden.

#### 4.2.1.3 Strecke

Eine Strecke wird durch die Merkmale

- Anfangskoordinate der Strecke,
- Endkoordinate der Strecke,
- Teilnetznummer,
- Streckennummer,
- mittlere Fahrzeit für die Strecke,

- Streckenlänge,
- Richtung und
- Belastung je Richtung

definiert. Über die Teilnetznummer wird eine Strecke einem Teilnetz (Straßennetz, Busnetz, Straßenbahnschienennetz, U-Bahnschienennetz oder Bahnschienennetz) zugeordnet. Die Streckennummer legt bei ÖPNV-Strecken die Zugehörigkeit der Strecke zu einer Linie fest. Für Straßenstrecken ist über die Nummer einer Strecke der Zugriff auf zusätzliche Eigenschaften (Kategorie, Kapazität, zulässige Geschwindigkeit) möglich.

#### 4.2.1.4 Linie

Eine ÖPNV-Linie hat einen Liniennamen, eine Liniennummer und einen Typ, der angibt, ob es sich bei der Linie um ein Richtungsband, einen Bus, eine Straßenbahn, eine Eisenbahn usw. handelt. Zusätzlich zu diesen Grundinformationen besteht eine Linie aus einer räumlichen und einer zeitlichen Komponente (**Abbildung 4.5**):

Die *räumliche* Komponente beschreibt den Linienverlauf, d.h. eine geordnete Haltestellenfolge von einer Anfangshaltestelle zu einer Endhaltestelle einschließlich der benutzten Strecken zwischen den Haltestellen. Beim Linienverlauf ("räumlicher Umlauf") wird zwischen dem Hinweg und dem Rückweg unterschieden, da die befahrenen Wege verschieden sein können. Zusammen bilden Hinweg und Rückweg eine Schleife, so daß Anfangs- und Endhaltestelle eines Umlaufs identisch sind. Die Haltestelle, an der der Hinweg endet und der Rückweg beginnt, wird im folgenden Wendehaltestelle genannt. Die Haltestellen zwischen der Anfangshaltestelle und der Wendehaltestelle auf dem Hinweg bzw. die Haltestellen zwischen der Wendehaltestelle und der Endhaltestelle auf dem Rückweg werden Linienhaltestellen genannt.

Die *zeitliche* Komponente wird durch eine Menge von Linienfahrten angegeben, die den Fahrplan der Linie festlegen. Jede Linienfahrt ist durch eine Abfahrtshaltestelle, eine absolute Abfahrtszeit an der Abfahrtshaltestelle und relative Fahrzeiten in ihrer räumlichen und zeitlichen Ausprägung genau bestimmt. Die Abfahrtshaltestelle einer Linienfahrt kann entweder die Anfangshaltestelle oder die Wendehaltestelle der Linie sein. Sie gibt die Richtung – Hinweg oder Rückweg – der Linienfahrt an. Die relativen Zeiten zwischen den Haltestellen liegen durch den räumlichen Verlauf einer ÖPNV-Linie fest, da jede einzelne Strecke das Attribut Fahrzeiten besitzt. Die fahrplanmäßigen Abfahrts- bzw. Ankunftszeiten an einer Linienhaltestelle berechnen sich aus der Aufsummierung der Abfahrtszeitminute und den relativen Fahrzeiten bis zur betrachteten Linienhaltestelle. Die Fahrzeit einer Linienfahrt von der Anfangs- zur Endhaltestelle kann in der Praxis für jede Linienfahrt einen anderen Wert annehmen. Für die Abbildung einer Linie in einem Netzmodell wird hier allerdings davon ausgegangen, daß für eine Linie alle Linienfahrten einer Richtung die gleiche Fahrzeit besitzen, d.h. die relativen Fahrzeiten sind wie die Liniennummer ein Merkmal der Linie. Linienfahrten unterschiedlicher Fahrzeit erfordern die Einführung zusätzlicher Linien. Die zusätzliche Angabe einer Dienstnummer und einer Fahrzeugeinsatznummer für jede Linienfahrt macht die Linie außerdem zum Träger betrieblicher Informationen.

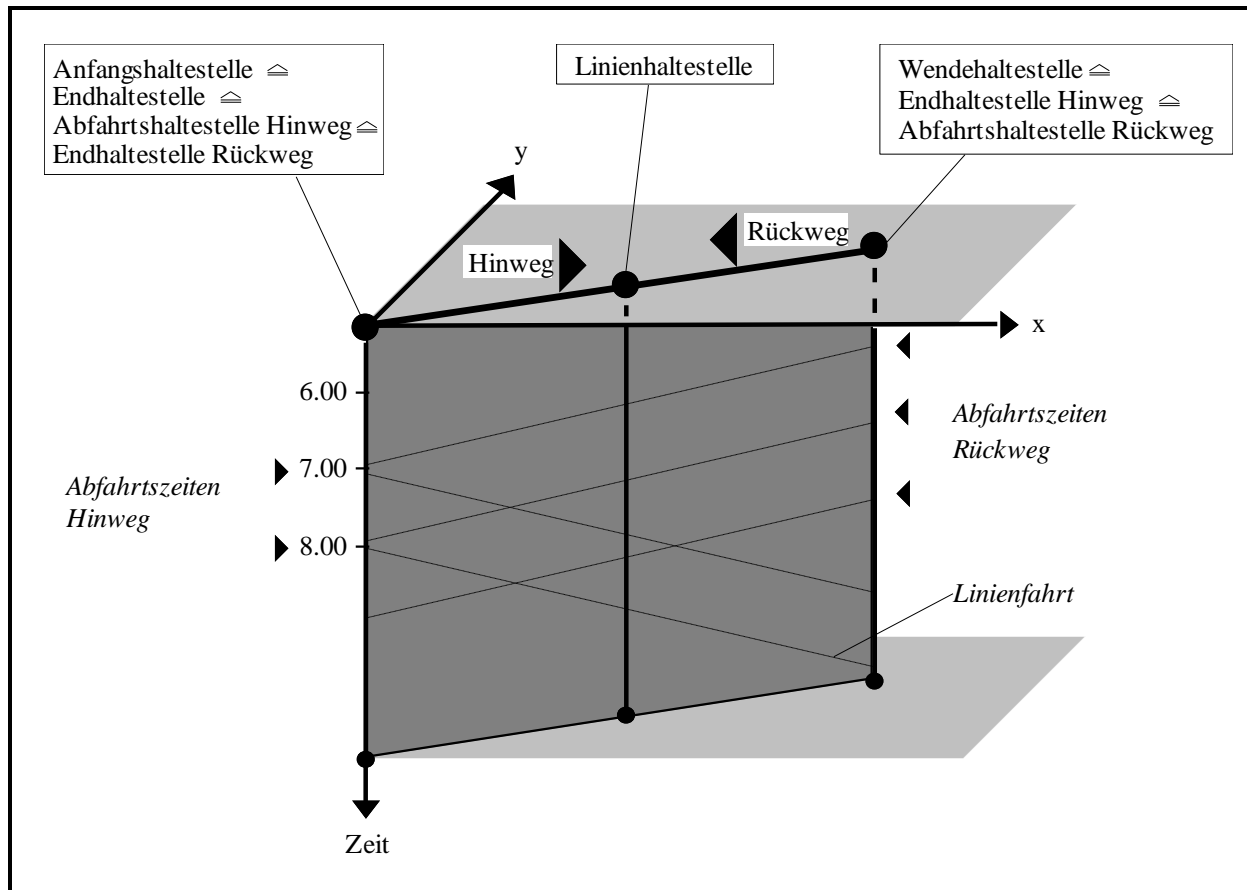


Abb. 4.5: Räumliche und zeitliche Komponenten einer ÖPNV-Linie

Eine ÖPNV-Linie wird somit durch die Merkmale

- Name der Linie,
- Name der Vaterlinie,
- Linientyp (Richtungsband, Bus, Straßenbahn, U-Bahn, DB-Zug),
- Liniennummer,
- Name der Haltestelle, an der die Hinfahrt beginnt (Anfangshaltestelle),
- Name der Haltestelle, an der die Rückfahrt beginnt (Wendehaltestelle),
- Liste der Linienhaltestellen,
- Liste der Strecken mit den relativen Fahrzeiten,
- Liste der Linienfahrten mit den absoluten Abfahrtszeiten

beschrieben. Unter Vaterlinie (**Abbildung 4.6**) wird dabei eine Linienbezeichnung für mehrere Linien verstanden, die dem Fahrgast zwar mit dem gleichen Namen angeboten werden, sich jedoch entweder durch ihren räumlichen Verlauf oder durch die relativen Fahrzeiten unterscheiden.



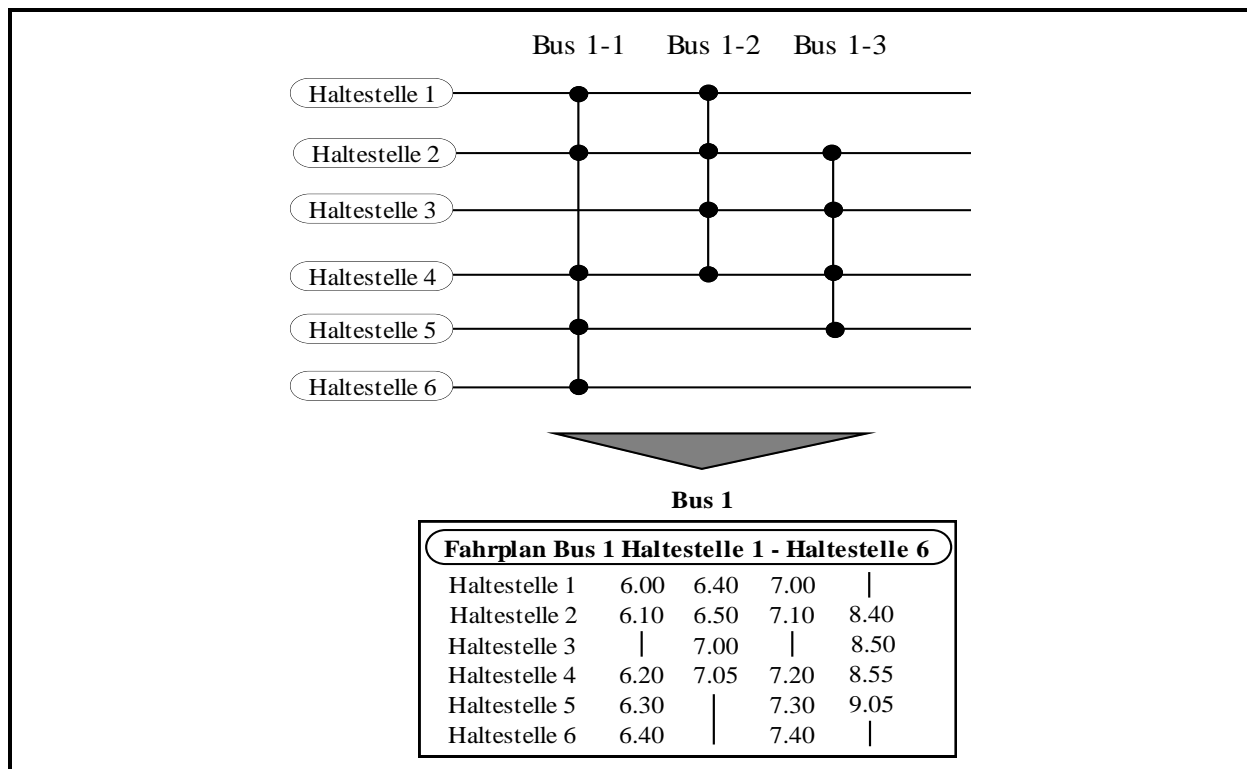


Abb. 4.6: Beispiel für eine Vaterlinie mit drei Teil-Linien.

Um eine Linie zu bearbeiten, d.h. um eine Linie zu erzeugen oder die oben aufgeführten Merkmale zu modifizieren, müssen dem Planer Methoden angeboten werden, die die spezifischen Eigenschaften einer Linie berücksichtigen. Die Merkmale Name, Nummer, Typ, Anfangs- und Wendehaltestelle lassen sich ähnlich wie die Merkmale der Netzobjekte Verkehrszelle oder Haltestelle mit Dialogfenstern verändern. Um die Liste der Linienfahrten und die Liste der Strecken einer Linie zu bearbeiten, sind zusätzliche Methoden erforderlich:

- Zur Bearbeitung der Liste der Linienfahrten benutzt der Planer den in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Fahrplaneditor, mit dem Linienfahrten erzeugt und ihre Eigenschaften verändert werden können.
- Zur Bearbeitung der Streckenliste, d.h. zur Festlegung des Linienverlaufes wird im folgenden eine Methode erläutert, die die einzelnen Strecken einer Linie in eine geordnete Reihenfolge bringt.

Wie in Kapitel 3.2.3 bereits erläutert, kann der Planer den Verlauf einer Linie am Bildschirm entweder abschnittsweise oder geschlossen in das Netzmodell einfügen. Außerdem muß der Netzeditor beim Einlesen aus den in der Netzdatei abgespeicherten Daten ein Linienobjekt erzeugen können. In allen Fällen ergibt sich dabei der folgende Ablauf, mit dem ein Linienobjekt aufgebaut wird:

1. *Erzeugen eines Linienobjektes:* Dazu müssen die Merkmale Name, Nummer, Typ, Anfangs- und Wendehaltestelle angegeben werden.
2. *Aufbau der Streckenliste:* Einzelne Streckenobjekte werden in die Streckenliste eingefügt. Dabei wird versucht die Strecke so in die Liste einzusortieren, daß sich eine geschlossene Schleife ergibt.

3. *Linienaufbereitung*: Bilden die Strecken der Linie nach dem Einlesen bzw. nach der Eingabe aller Strecken keine geschlossene Schleife, müssen die Strecken in eine geordnete Reihenfolge Anfangshaltestelle → Linienhaltestellen → Wendehaltestelle → Linienhaltestellen → Endhaltestelle gebracht werden. Dieser Vorgang wird als Linienaufbereitung bezeichnet. Die Linienaufbereitung muß nach jeder Änderung der Streckenliste durchgeführt werden.

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Struktur der Streckenliste und die Algorithmen erläutert, die zum Aufbau und zur Aufbereitung der Streckenliste notwendig sind. **Abbildung 4.7** zeigt den räumlichen Verlauf einer Linie. Der Linienverlauf beginnt an der Anfangshaltestelle Hst1 und führt über die Linienhaltestelle Hst2 zur Wendehaltestelle Hst3. Der Rückweg führt auf dem gleichen Weg von der Wendehaltestelle Hst3 zurück zur Anfangshaltestelle Hst1. Die zwei dabei benutzten Strecken Hst1 - Hst2 und Hst2 - Hst3 werden in vier Einbahnstrecken S1, S2, S3, S4 umgewandelt. Die Strecken S1 und S4 bzw. S2 und S3 sind sogenannte inverse Strecken, da sie sich bei gleichen Koordinaten nur in der Richtung unterscheiden. Um einer Linie Haltestellen zuzuordnen, werden diejenigen Haltestellen als Linienhaltestellen aufgefaßt, deren Koordinaten mit einer Streckenkoordinate übereinstimmen.

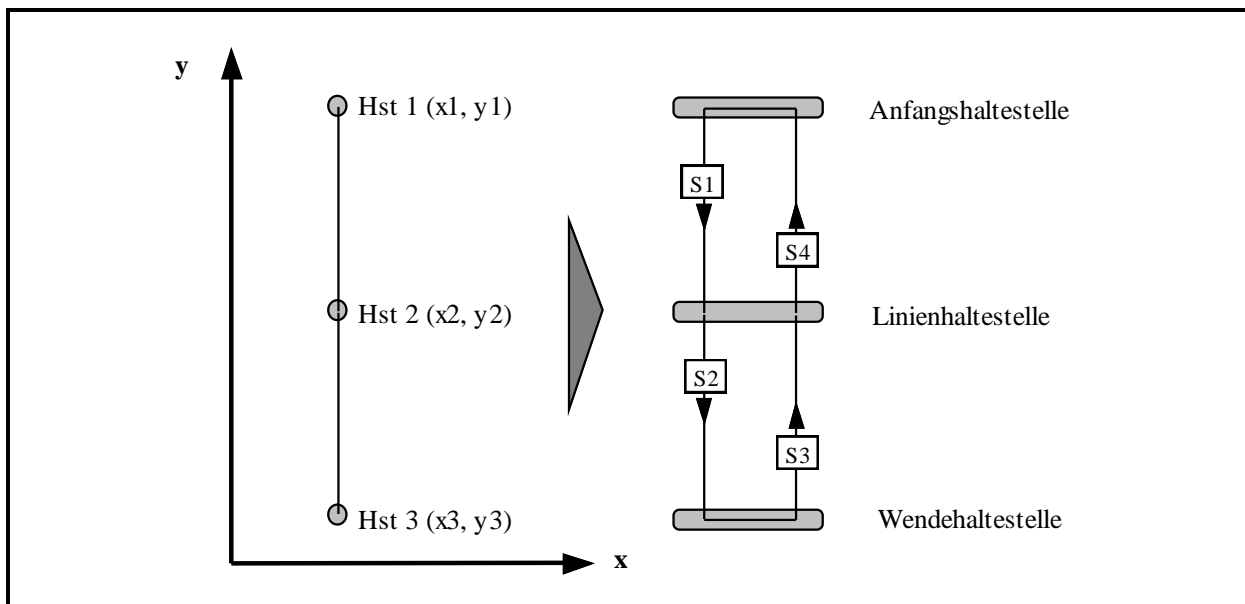


Abb. 4.7: Darstellung des räumlichen Verlaufs einer Linie.

Damit der Linienverlauf einer Linie eindeutig ist, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

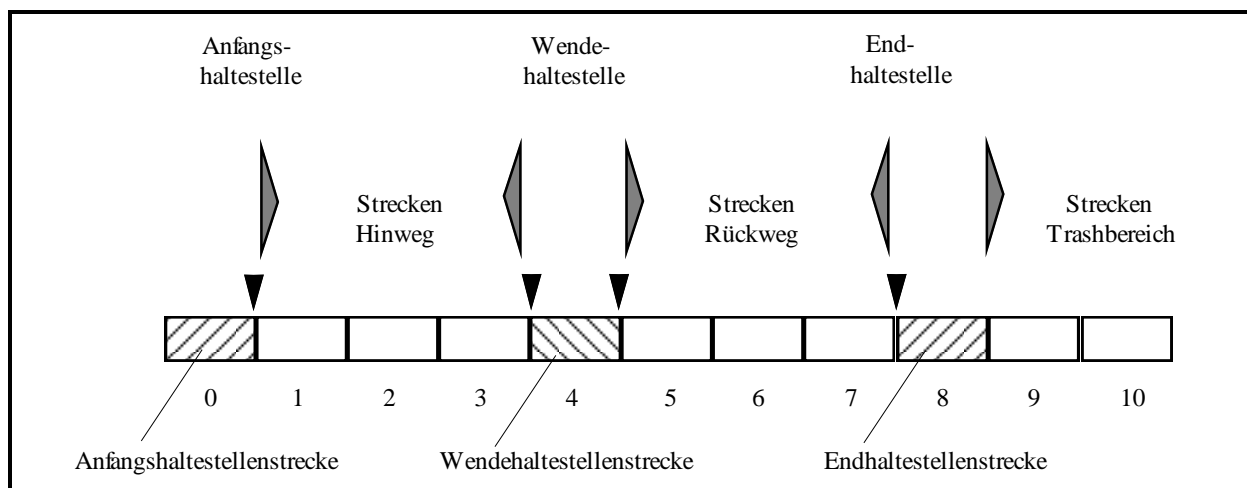
- jede Strecke hat genau eine Vorgänger- und eine Nachfolgerstrecke.
- die erste Strecke hat die Anfangshaltestelle zum Vorgänger.
- die letzte Strecke hat die Endhaltestelle (= Anfangshaltestelle) als Nachfolger.
- mindestens eine Strecke hat die Wendehaltestelle als Nachfolger.
- mindestens eine Strecke hat die Wendehaltestelle als Vorgänger.

Wird eine dieser Bedingungen nicht eingehalten oder kann eine Strecke nicht in diese Reihenfolge eingefügt werden, dann ist die der Linienverlauf unvollständig und muß vom Planer ergänzt bzw. korrigiert werden.

Die Strecken einer Linie werden als Objekte in einer Streckenliste abgespeichert. Die Liste wird zu Beginn, wenn das Linienobjekt erzeugt wird, mit den drei Hilfsstrecken

- fiktive Anfangshaltestellenstrecke zur Koordinate der Anfangshaltestelle,
- fiktive Wendehaltestellenstrecke von und zu der Koordinate der Wendehaltestelle,
- fiktive Endhaltestellenstrecke von der Koordinate der Anfangshaltestelle

vorbesetzt. Die Streckenobjekte können jetzt entweder zwischen der Anfangshaltestelle und der Wendehaltestelle oder zwischen der Wendehaltestelle und der Endhaltestelle eingefügt werden. Strecken, die sich nicht sinnvoll einordnen lassen, werden nach der Endhaltestelle in einem sogenannten Trashbereich zwischengespeichert. **Abbildung 4.8** zeigt die Streckenliste mit ihren unterschiedlichen Bereichen.



**Abb. 4.8:** Struktur der Streckenliste zur Speicherung der Streckenobjekte einer Linie

Ein Streckenobjekt kann bei der Linienaufbereitung, d.h. beim Aufbau der Streckenliste, an genau vier Stellen sinnvoll eingeordnet werden (**Abbildung 4.9**):

1. Anhängen der Strecke auf dem Hinweg (Weg 1) an den Anfangshaltestellen-Arm (Arm 1).
2. Anhängen der Strecke auf dem Hinweg an den (Weg 1) Wendehaltestellen-Arm (Arm 2).
3. Anhängen der Strecke auf dem Rückweg an den (Weg 2) Wendehaltestellen-Arm (Arm 3).
4. Anhängen der Strecke auf dem Rückweg an den (Weg 2) Endhaltestellen-Arm (Arm 4).

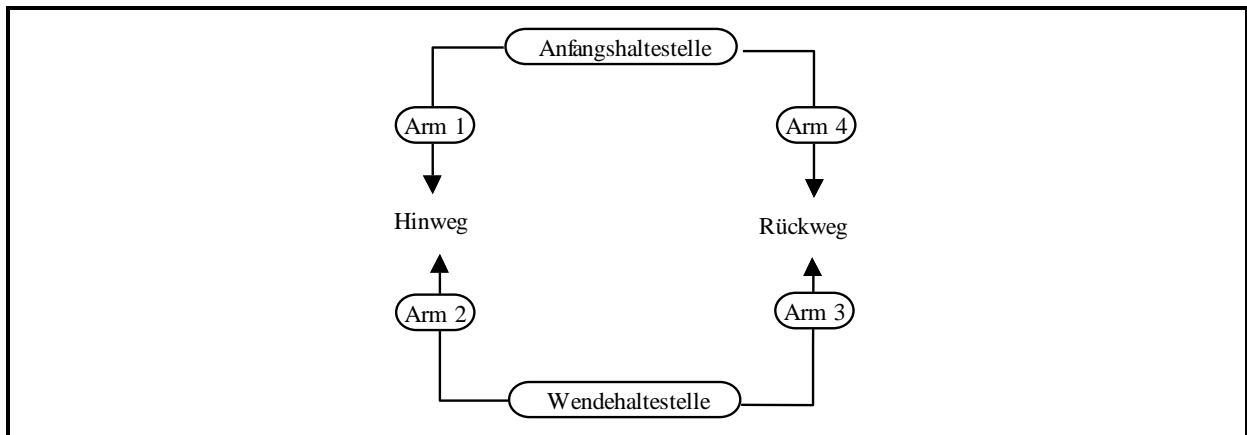


Abb. 4.9: Die vier Positionen, an denen eine Strecke in die Liste eingeordnet werden kann

**Abbildung 4.10** zeigt den Algorithmus zum Aufbau der Streckenliste. Der Algorithmus wird angewendet, um jede neue Strecke, die beim Einlesen oder bei der interaktiven Eingabe einer Linie zugeordnet wird, möglichst sofort in der richtigen Reihenfolge zu positionieren. Dazu sucht die neue Strecke nach einen Arm auf dem Hinweg oder Rückweg, an den sie sich anhängen kann. Dieser Algorithmus eignet sich vor allem für das Einlesen sortierter Strecken aus der Netzdatei. Er vermeidet eine unnötige, zeitaufwendige Linienaufbereitung nach dem Einlesen der Netzdaten.

Einfügen einer neuen Strecken in die Liste								
<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	▶	Prüfe für Hinweg und Rückweg, ob die neue Strecke als Nachfolgerstrecke (Arm = 1, 3) oder als Vorgängerstrecke (Arm = 2, 4) eingefügt werden kann.						
	Strecke kann eingefügt (+) bzw. kann nicht eingefügt (–) werden am ....							
	Hinweg	+	Hinweg	–	Hinweg	+	Hinweg	–
	Rückweg	–	Rückweg	+	Rückweg	+	Rückweg	–
	Einfügen am Hinweg		Einfügen am Rückweg		Existiert Strecke bereits als inverse Strecke auf dem Hinweg		Einfügen im Trashbereich	
					nein	ja		
					Einfügen am Hinweg	Einfügen am Rückweg		
	Einfügen erfolgreich ?							
	ja				nein			
	Trashbereich leer ?				Warte auf neue Strecke			
nein		ja						
Nimm erste Strecke aus dem Trashbereich, lösche sie dort und versuche sie als neue Strecke einzufügen		Warte auf neue Strecke						

Abb. 4.10: Algorithmus zum schrittweisen Aufbau der Streckenliste

Ist der Linienverlauf nach dem Einlesen oder nach der interaktiven Eingabe unvollständig, muß die Linie mit dem in **Abbildung 4.11** dargestellten Algorithmus aufbereitet werden. Jetzt sind alle Strecken bekannt. Sie liegen im Trashbereich der Streckenliste und müssen bei der Aufbereitung an die richtige Listenposition verschoben werden. Der Algorithmus zur Linienaufbereitung versucht die Strecken des Trashbereichs an den freien Armen der Streckenliste anzuhängen. Werden für einen Arm keine oder mehr als eine Vorgänger- bzw. Nachfolgerstrecke gefunden, dann wird an einem anderen Arm weiter gearbeitet. Für einen Linienverlauf mit einer Stichstrecke ist es erforderlich, einen bereits geschlossenen Weg erneut aufzubrechen. Für den Fall, daß sich auch nach der Linienaufbereitung keine eindeutige Lösung ergibt, muß der Planer mit einer Fehlermeldung auf diesen Zustand hingewiesen werden.


Kopiere alle Streckenobjekte in den Trashbereich		
Setze Weg auf Weg 1 (Hinweg) und aktuellen Arm auf Arm 1 Setze alle Arme = offen		
	Bearbeite die letzte Strecke des aktuellen Armes (Weg i, Arm j)	
	Suche im Trashbereich nach allen möglichen Nachfolgern (Arm = 1, 3) bzw. Vorgängern (Arm = 2, 4), die an die aktuelle Strecke angefügt werden können. Ist der Trashbereich leer, dann breche die Aufbereitung ab.  Falls es mehr als eine Nachfolger- oder Vorgängerstrecke gibt, dann versuche, die Zahl auf eine Strecke zu reduzieren: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Streiche bei mehreren identischen Strecken alle Strecken bis auf eine Strecke.</li> <li>2. Streiche Strecken, die zu der aktuellen Strecke invers sind, d.h. Strecken, die dem direkten Rückweg entsprechen.</li> </ol>	
	Genau eine Strecke gefunden	0 oder mehr als eine Strecke gefunden
	Füge die Strecke am Ende des aktuellen Armes ein.	Schließe aktuellen Arm und mache den nächsten offenen Arm zum aktuellen Arm. Sind alle Arme geschlossen, dann breche einen Weg an der Stelle auf, für die es im Trashbereich eine Vorgänger- und eine Nachfolgerstrecke gibt. Ist das nicht möglich, dann breche die Aufbereitung ab.
Prüfe, ob Hinweg und Rückweg geschlossen sind und ob der Trashbereich leer ist. Ist das nicht der Fall, dann sende eine Fehlermeldung, die den Planer auf eine notwendige Korrektur des Linienverlaufes hinweist.		

Abb. 4.11: Algorithmus zur Linienaufbereitung

### 4.2.2 Fahrplaneditor

Der Fahrplaneditor stellt die Methoden bereit, mit denen die Fahrten einer Linie bearbeitet werden können. Er ergänzt den zweidimensionalen Netzeditor, der die Linienobjekte in ihrer räumlichen Ausprägung darstellt, um die dritte zeitliche Dimension. Diese dritte Dimension wird am zweckmäßigsten in der Form eines Bildfahrplans realisiert. In **Abbildung 4.12** ist die Benutzeroberfläche für einen Fahrplaneditor dargestellt.

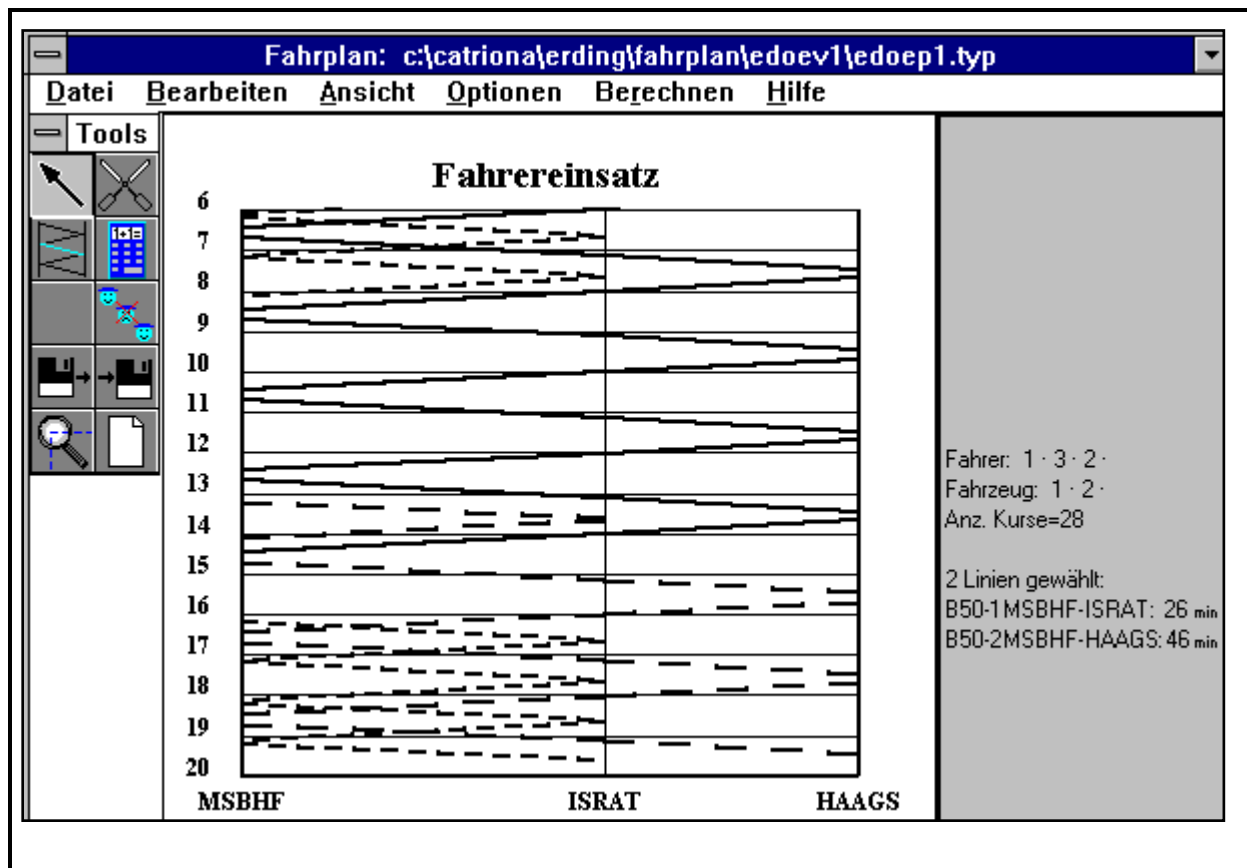


Abb. 4.12: Benutzeroberfläche des Fahrplaneditors

Der Fahrplaneditor unterstützt den integrierten Entwurf von Fahrplänen und Einsatzplänen. Beim Entwurf von Fahrplänen und Einsatzplänen entscheidet der Planer über die Zahl der Linienfahrten und ordnet jeder Linienfahrt genau einen Fahrer, ein Fahrzeug und eine Abfahrtszeit an einer Abfahrtshaltestelle zu. Dabei sollen rechtliche Vorgaben zu Lenkzeiten und Pausenzeiten ebenso eingehalten werden wie geplante Anschlüsse. Die Fahrplan- und Einsatzplanung kann gleichzeitig für eine oder mehrere Linien erfolgen.

Für den Fahrplaneditor werden die Objekte

- Linienfahrt,
- Anschlußfahrt,
- Fahrer und
- Fahrzeug

definiert. Die Linienfahrtobjekte und ihre Merkmale lassen sich dabei innerhalb des Bildfahrplans mit ähnlichen Methoden wie die Netzobjekte erzeugen, verschieben, löschen usw..

Die Anschlußfahrtoobjekte sind dagegen "tote" Objekte, die dem Planer die Abfahrts- und Ankunftszeiten benachbarter Linienfahrten anzeigen, ohne daß der Planer die Merkmale dieser Linienfahrten zu diesem Zeitpunkt verändern kann. Fahrer- und Fahrzeugobjekte enthalten Informationen über Dienstzeiten und Fahrzeugkosten, die für die Kostenberechnung notwendig sind.

Jedes *Linienfahrtoobjekt* gehört zu einer Linie und wird durch die Merkmale

- Liniennummer,
- Abfahrtshaltestelle,
- Abfahrtszeit,
- Fahrerobjekt (Dienstnummer) und
- Fahrzeugobjekt (Fahrzeugeinsatznummer)

definiert. Die Fahrzeiten zwischen den Haltestellen und damit die Neigung der Fahrplantrasse im Bildfahrplan übernimmt das Linienfahrtoobjekt von seiner Linie. Die Abfahrtshaltestelle legt die Richtung der Linienfahrt fest, die Abfahrtszeit entspricht einer Koordinate auf der Zeitachse des Bildfahrplans. Um Linienfahrtoobjekte bearbeiten zu können, müssen folgende Methoden implementiert werden:

- *Einfügen* zusätzlicher Linienfahrten (**Abbildung 4.13**) und *Löschen* vorhandener Linienfahrten.
- *Markieren* eines Linienfahrtoobjektes.
- *Verschieben* eines markierten Linienfahrtoobjektes, d.h. die Abfahrtszeit der Linienfahrt wird verändert. Ein Linienfahrtoobjekt kann nur auf der Zeitachse und nicht auf der Wegachse des Bildfahrplans verschoben werden.
- *Verändern* der Merkmale Dienstnummer, Fahrzeugeinsatznummer und Abfahrtszeit eines markierten Linienfahrtoobjektes (**Abbildung 4.14**).

Einfügen neue Linienfahrt	Eigenschaften Linienfahrt verändern
Linie: <div>B 562-1: TVOMN - EDBHF 32 min</div> <div>B 562-1: EDBHF - TVOMN 32 min B 562-1: TVOMN - EDBHF 32 min B 571-1: FMUBP - TVOMN 53 min B 571-1: TVOMN - FMUBP 53 min</div>	Linie B 581-1 von TVOMN nach DOBHF (Fahrzeit=20 min, Länge= 10.1 km)
Dienstnummer: <input type="text" value="1"/>	Dienstnummer: <input type="text" value="1"/>
Fahrzeugeinsatznummer: <input type="text" value="1"/>	Fahrzeugeinsatznummer: <input type="text" value="1"/>
Abfahrtszeit: <input type="text" value="10.25"/>	Abfahrtszeit: <input type="text" value="10.25"/>
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Abbrechen"/>	<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Abbrechen"/>

Abb. 4.13: Einfügen eines Linienfahrtobjektes    Abb. 4.14: Verändern der Merkmale eines Linienfahrtobjektes

Ein *Anschlußfahrtobjekt* zeigt dem Planer die Abfahrts- und Ankunftszeiten einer benachbarten Linie an ausgewählten Haltestellen. Das Anschlußfahrtobjekt, das als Pfeil auf dem Bildschirm erscheint, dient nur der Information und kann folglich weder markiert noch verändert werden. Es wird durch die Merkmale Liniennummer, Haltestelle und Abfahrtszeit beschrieben. Natürlich lassen sich auch die Merkmale dieser Anschlußfahrten verändern. Dazu müssen sie vom Planer als normale Linienfahrtobjekte in den Fahrplaneditor geladen werden.

Ein *Fahrerobjekt* umfaßt die Merkmale Dienstnummer, Dienstprotokoll und Dienstkosten. Das Merkmal Dienstprotokoll zeichnet dabei für alle Minuten eines Tages die Tätigkeiten (Freizeit, Einsetzfahrt, Linienfahrt, Dienstunterbrechung, Pause usw.) eines Fahrers in einem Datenfeld auf. Dieses Protokoll enthält damit alle Informationen über Arbeitszeit, Lenkzeit, Pausenzeit und Dienstunterbrechungen. Damit kann ein Fahrerobjekt mit der Methode "Berechne deine Kosten" Auskunft gegeben, ob alle rechtlichen Vorgaben eingehalten sind und welche Personalkosten entstehen.

Ein *Fahrzeugobjekt* hat die Merkmale Fahrzeugeinsatznummer, Fahrzeugtyp, Fahrzeugeinsatzprotokoll, Fahrzeugkilometer und Fahrzeugkosten. Über den Fahrzeugtyp können fahrzeugspezifische Daten wie Fahrzeugpreis und Kraftstoffverbrauch bei der Kostenberechnung berücksichtigt werden. Das Merkmal Fahrzeugeinsatzprotokoll wird als ein Datenfeld implementiert, das für jede Minute eines Tages die Verwendung des Fahrzeuges, z.B. die Nummer der bedienten Linienfahrt, protokolliert. Auf diese Weise sind wie beim Fahrerobjekt die Voraussetzungen für eine Methode zur objektspezifischen Kostenberechnung gegeben.

Der Fahrplaneditor verwaltet die Objekte in Listen und setzt die Aktionen des Planers in Nachrichten an die Objekte um. Neben den Aktionen zum Bearbeiten einzelner Objekte bietet der Fahrplaneditor dem Planer weitere Funktionen:

- Der Planer kann zwischen verschiedenen Zeit-Weg-Darstellungen umschalten, die wahlweise den graphischen Fahrplan, den Fahrereinsatzplan oder den Fahrzeugeinsatzplan zeigen. Abhängig vom gewählten Modus werden die Linienfahrten entsprechend den Werten der Merkmale Liniennummer, Dienstnummer und Fahrzeugeinsatznummer verschiedenartig dargestellt.
- Damit der Planer unmittelbar die Wirkungen eines Einsatzplanes überprüfen kann, ist ein Modul zur Kostenrechnung integriert, das gleichzeitig die Zulässigkeit des Einsatzplans überprüft. Dieses Modul ruft nacheinander alle Fahrer- und Fahrzeugobjekte auf, fragt Zulässigkeit und Kosten ab und addiert die Kosten zu einer Gesamtsumme.
- Neben der manuellen Einsatzplanung kann der Planer einen Vorschlag für den Fahrer- und Fahrzeugeinsatz anfordern. Der Fahrplaneditor ruft dann ein Optimierungsprogramm auf (vgl. Kapitel 4.5), das für alle Linienfahrten die Merkmale Dienstnummer und Fahrzeugeinsatznummer derart wählt, daß sich minimale Kosten ergeben.



### 4.2.3 Beispiel

Die Verwaltung der Linienplan-, Fahrplan-, und Einsatzplandaten in einem Netzmodell soll anhand eines Beispiels erläutert werden. Der Linienplan und der Fahrplan für das Beispiel sind in **Abbildung 4.15** dargestellt. Gegeben ist ein Netz mit 3 Buslinien, 4 Verkehrszellen und 4 Haltestellen.

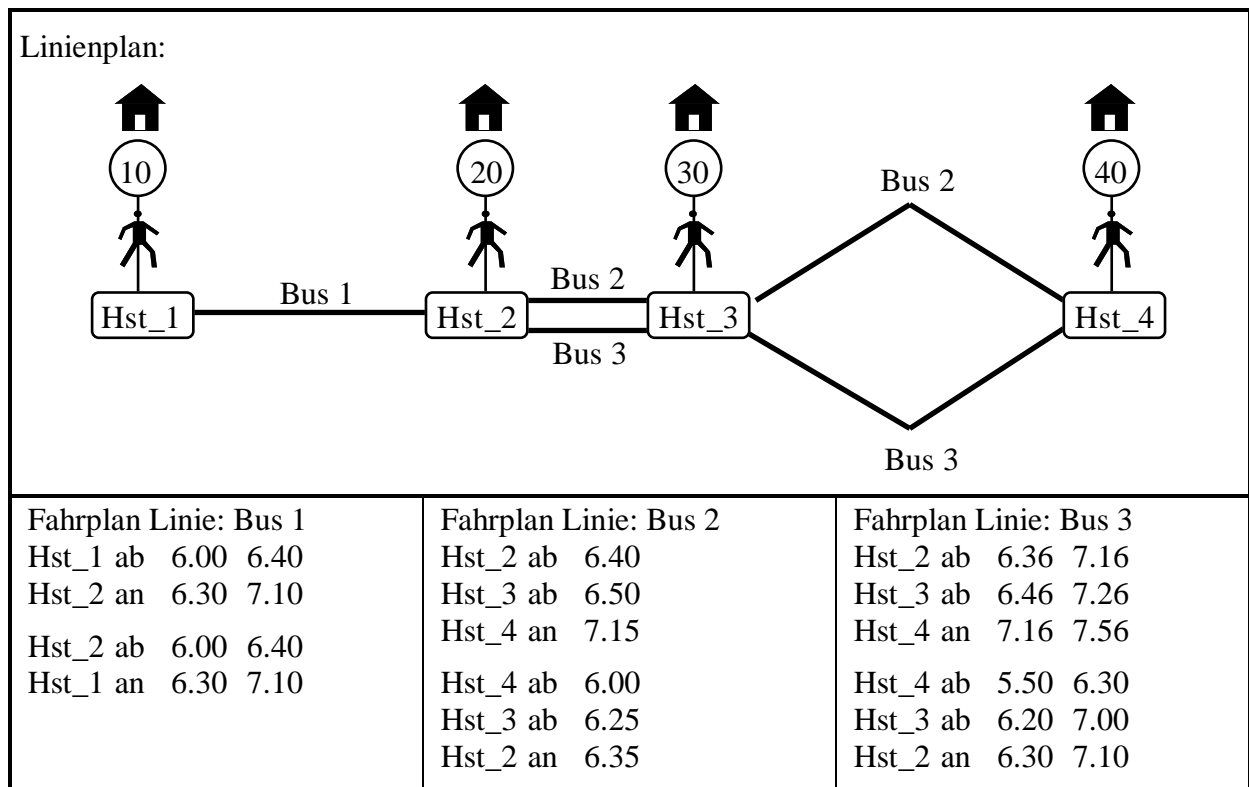


Abb. 4.15: Linienplan und Fahrplan

Die Daten des ÖPNV-Angebotes werden in einer Netzdatei abgespeichert. Die Merkmale der Objekte Verkehrszelle, Haltestelle und Strecke können jeweils zu einem Datensatz zusammengefaßt werden (**Abbildung 4.16**). Ein Linienobjekt setzt sich dagegen aus Grunddaten, Streckenobjekten und Linienfahrtoobjekten zusammen. Beim Einlesen eines Netzmodells in den Netz- und Fahrplaneditor wird jede Linie zuerst mit ihren Grunddaten Name, Nummer, Anfangs- und Wendehaltestelle und der Liste der Linienfahrten erzeugt (**Abbildung 4.17**). Anschließend werden die Streckenobjekte schrittweise, d.h. in der Reihenfolge der Netzdatei, in die Streckenlisten der Linien eingefügt. Dafür müssen Teilnetz und Nummer von Strecke und Linie übereinstimmen. Im Arbeitsspeicher des Netz- und Fahrplaneditors sind die Streckenlisten der Linien dann in aufbereiteter Form vorhanden (**Abbildung 4.18**).

Verkehrszellenobjekte:							
Nummer	Objekt- koordinate [x, y]	Zellenname	Strukturdaten Einwohner, Arbeitsplätze ...				
10	1000 4100	Zelle 10					
20	4000 4100	Zelle 20					
30	5000 4100	Zelle 30					
40	8000 4100	Zelle 40					
Haltestellenobjekte:							
Codename	Objekt- koordinate [x, y]	Übergangszeit [min]	Haltestellenname				
Hst_1	1000 4000	2	Haltestelle 1				
Hst_2	4000 4000	2	Haltestelle 2				
Hst_3	5000 4000	2	Haltestelle 3				
Hst_4	8000 4000	2	Haltestelle 4				
Streckenobjekte:							
Teilnetz	Nummer	Richtung 0=Einrichtung 1=Zweirichtung	Anfangs- koordinate [x, y]	End- koordinate [x, y]	Fahrzeit [min]	Länge [m]	Belastung
0 = Straße	40	1	1000 4000	4000 4000	0	20000	
0 = Straße	40	1	4000 4000	5000 4000	0	5000	
0 = Straße	40	1	5000 4000	6500 5000	0	10000	
0 = Straße	40	1	6500 5000	8000 4000	0	10000	
0 = Straße	40	1	5000 4000	6500 3000	0	10000	
0 = Straße	40	1	6500 3000	8000 4000	0	10000	
2 = Bus	1	0	1000 4000	4000 4000	30	20000	
2 = Bus	1	0	4000 4000	1000 4000	30	20000	
2 = Bus	2	0	4000 4000	5000 4000	10	5000	
2 = Bus	2	0	5000 4000	4000 4000	10	5000	
2 = Bus	2	0	5000 4000	6500 5000	0	10000	
2 = Bus	2	0	6500 5000	5000 4000	0	10000	
2 = Bus	2	0	6500 5000	8000 4000	25	10000	
2 = Bus	2	0	8000 4000	6500 5000	25	10000	
2 = Bus	3	0	4000 4000	5000 4000	10	5000	
2 = Bus	3	0	5000 4000	4000 4000	10	5000	
2 = Bus	3	0	5000 4000	6500 3000	0	10000	
2 = Bus	3	0	6500 3000	5000 4000	0	10000	
2 = Bus	3	0	6500 3000	8000 4000	30	10000	
2 = Bus	3	0	8000 4000	6500 3000	30	10000	
9 = Fussweg	0	1	1000 4100	1000 4000	5	500	
9 = Fussweg	0	1	4000 4100	4000 4000	5	500	
9 = Fussweg	0	1	5000 4100	5000 4000	5	500	
9 = Fussweg	0	1	8000 4100	8000 4000	5	500	

Abb. 4.16: Verkehrszellen-, Haltestellen- und Streckenobjekte in der Netzdatei

<b>Linienobjekte:</b>				
Name	Teilnetz	Nummer	Vatername	Liste der Linienfahrten (Abfahrtsminute, Dienstnummer, Fahrzeugeinsatznummer)
Bus 1	2	1	Bus 1	Abfahrt Hst_1 360, 400; (Anfangshaltestelle)
				Dienst 1, 2;
				Fahrzeug 1, 2;
				Abfahrt Hst_2 360, 400; (Wendehaltestelle)
Bus 2	2	2	Bus 2	Dienst 2, 1;
				Fahrzeug 2, 1;
				Abfahrt Hst_2 400; (Anfangshaltestelle)
				Dienst 3;
Bus 3	2	3	Bus 3	Fahrzeug 3;
				Abfahrt Hst_3 360; (Wendehaltestelle)
				Dienst 3;
				Fahrzeug 3;
Bus 3	2	3	Bus 3	Abfahrt Hst_2 396, 436; (Anfangshaltestelle)
				Dienst 4, 5;
				Fahrzeug 4, 5;
				Abfahrt Hst_3 350, 390; (Wendehaltestelle)
Bus 3	2	3	Bus 3	Dienst 4, 5;
				Fahrzeug 4, 5;
				Abfahrt Hst_2 396, 436; (Anfangshaltestelle)
				Dienst 4, 5;

Abb. 4.17: Grunddaten und Liste der Linienfahrten für die Linienobjekte

Haltestellentyp A = Anfangshaltestelle W = Wendehaltestelle E = Endhaltestelle L = Linienhaltestelle	Haltestellen- code	Koordinate	Länge [m]	Fahrzeit [min]	Summe Fahrzeit [min]
<b>Bus 1</b>					
A	Hst_1	1000 4000	0	0	0
W	Hst_2	4000 4000	20000	30	30
E	Hst_1	1000 4000	20000	30	30
<b>Bus 2</b>					
A	Hst_2	4000 4000	0	0	0
L	Hst_3	5000 4000	5000	10	10
		6500 5000	10000	0	10
W	Hst_4	8000 4000	10000	25	35
		6500 5000	10000	25	25
L	Hst_3	5000 4000	10000	0	25
E	Hst_2	4000 4000	5000	10	35
<b>Bus 3</b>					
A	Hst_2	4000 4000	0	0	0
L	Hst_3	5000 4000	5000	10	10
		6500 3000	10000	0	10
W	Hst_4	8000 4000	10000	30	40
		6500 3000	10000	30	30
L	Hst_3	5000 4000	10000	0	30
E	Hst_2	4000 4000	5000	10	40

Abb. 4.18: Aufbereitete Streckenlisten der Linienobjekte im Arbeitsspeicher des Netz- und Fahrplaneditors

### 4.3 Wirkungsmodell Benutzer

#### 4.3.1 Ziel und Ablauf

Das Modell wird eingesetzt, um die Wirkungen eines ÖPNV-Angebotes auf die Benutzer des ÖPNV zu ermitteln. Dazu wird das Verhalten der Verkehrsteilnehmer bei einem vorgegebenen ÖPNV-Angebot simuliert. Durch die Verfolgung aller Ortsveränderungen im Netz und durch das Mitrechnen der Kennwerte dieser Ortsveränderungen gewinnt man Informationen über die Qualität dieser Verbindungen. Während bei IV-Netzen vor allem die Kenngrößen Reisezeit einer Fahrt und die Belastung eines Straßenabschnittes interessieren, werden zur Beurteilung eines ÖPNV-Angebotes außerdem für jede Verbindung die Kenngrößen

- Zugangsweg bzw. Zugangszeit,
- Beförderungszeit durch den Transportträger,
- Umsteigehäufigkeit,
- Umsteigewartezeit an einer Umsteigehaltestelle,
- Abgangsweg bzw. Abgangszeit

und für jede Beziehung die Kenngröße Bedienungshäufigkeit ermittelt. Aus diesen unmittelbaren Kenngrößen lassen sich weitere mittelbare Kenngrößen wie die Luftliniengeschwindigkeit ableiten.

Zur Ermittlung dieser benutzerbezogenen Kenngrößen muß bekannt sein, welche Verbindungen den Fahrgästen zur Verfügung stehen und für welche dieser Verbindungen sich die Fahrgäste entscheiden. Die Kenngrößenermittlung, die aus den in Kapitel 3.4.1 diskutierten Gründen für die Verbindungssuche einen dynamischen Mehrweg-Algorithmus benutzt, erfordert fünf Arbeitsschritte:

1. In der *Netzaufbereitung* wird das ÖPNV-Angebot, das sich aus Verkehrszellen, Haltestellen, Fußwegen, Linien und ihren Linienfahrten zusammensetzt, in einer sortierten Nachfolgerliste abgespeichert, d.h. es werden sogenannte Teilverbindungen erzeugt. Unter einer Teilverbindung wird dabei der Teil einer Verbindung definiert, der ohne Umsteigen mit einem Fahrzeug bzw. zu Fuß zurückgelegt werden kann (vgl. **Abbildung 4.19**). Eine Verbindung, die sich aus einem Zugangsweg, einer Busfahrt und einem Abgangsweg zusammensetzt, umfaßt also drei Teilverbindungen.
2. Die Teilverbindungen werden bei der *Verbindungssuche* zu möglichen Verbindungen zwischen zwei Verkehrszellen zusammengefügt. Dabei wird ein Verbindungsbaum aufgebaut, der alle Verbindungen von einer Quellzelle zu allen Zielzellen umfaßt, d.h. es wird eine Zeile der Verkehrsnachfragematrix bearbeitet.
3. Die *Verbindungswahl* bewertet und vergleicht alle im Verbindungsbaum gespeicherten Verbindungen einer Quelle-Ziel-Beziehung mit Hilfe von Regeln. Die Verbindungswahl verfolgt das Ziel, sinnvolle Verbindungen, die ein wirkliches Angebot darstellen, und unlogische Verbindungen, die gelöscht werden können, zu unterscheiden. Dieser und die nachstehenden Arbeitsschritte müssen für jedes Element der Nachfragematrix durchgeführt werden.
4. Der *Verbindungssplit* verteilt die Fahrten einer Beziehung auf die ausgewählten Verbindungen. Dazu wird ein Entscheidungsmodell eingesetzt, das die Kenngrößen Gehzeit, Beför-

derungszeit, Umsteigewartezeit und Umsteigehäufigkeit einer Verbindung einbezieht und die Wunschabfahrtszeit bzw. die Wunschankunftszeit der Fahrgäste mit der angebotenen Abfahrts- bzw. Ankunftszeit vergleicht.

- Die Kenngrößen aller Verbindungen werden gewichtet mit den Fahrten der Verbindungen zu *mittleren Kenngrößen für eine Quelle-Ziel-Beziehung* zusammenfaßt.

Fußwege und Liniennetz	Fahrplan																								
<p>Quelle (Q) — Beziehung —&gt; Ziel (Z)</p> <p>Fußweg: Q —&gt; H1, H3 —&gt; Z</p> <p>Linie 1: H1 —&gt; H2</p> <p>Linie 2: H2 —&gt; H3</p> <p>Linie 3: H1 —&gt; H3</p>	<p><u>Linie 1</u></p> <table><tr><td>ab H1</td><td>8.00</td><td>9.00</td><td>10.00</td></tr><tr><td>an H2</td><td>8.20</td><td>9.20</td><td>10.20</td></tr></table> <p><u>Linie 2</u></p> <table><tr><td>ab H2</td><td>8.25</td><td>9.30</td><td>10.25</td></tr><tr><td>an H3</td><td>8.40</td><td>9.45</td><td>10.40</td></tr></table> <p><u>Linie 3</u></p> <table><tr><td>ab H1</td><td>7.00</td><td></td><td></td></tr><tr><td>an H3</td><td>7.30</td><td></td><td></td></tr></table>	ab H1	8.00	9.00	10.00	an H2	8.20	9.20	10.20	ab H2	8.25	9.30	10.25	an H3	8.40	9.45	10.40	ab H1	7.00			an H3	7.30		
ab H1	8.00	9.00	10.00																						
an H2	8.20	9.20	10.20																						
ab H2	8.25	9.30	10.25																						
an H3	8.40	9.45	10.40																						
ab H1	7.00																								
an H3	7.30																								
<p>1. Verbindung mit 3 Teilverbindungen:</p> <p>Quellzelle Q → Haltestelle H1: Fußweg, Gehzeit 10 Minuten</p> <p>Haltestelle H1 → Haltestelle H3: Linie 3, ab 7.00 Uhr, an 7.30 Uhr</p> <p>Haltestelle H3 → Zielzelle Z: Fußweg, Gehzeit 10 Minuten</p>																									
<p>2. Verbindung mit 4 Teilverbindungen:</p> <p>Quellzelle Q → Haltestelle H1: Fußweg, Gehzeit 10 Minuten</p> <p>Haltestelle H1 → Haltestelle H2: Linie 1, ab 8.00 Uhr, an 8.20 Uhr</p> <p>Haltestelle H2 → Haltestelle H3: Linie 2, ab 8.25 Uhr, an 8.40 Uhr</p> <p>Haltestelle H3 → Zielzelle Z: Fußweg, Gehzeit 10 Minuten</p>																									
<p>3. Verbindung mit 4 Teilverbindungen:</p> <p>Quellzelle Q → Haltestelle H1: Fußweg, Gehzeit 10 Minuten</p> <p>Haltestelle H1 → Haltestelle H2: Linie 1, ab 9.00 Uhr, an 9.20 Uhr</p> <p>Haltestelle H2 → Haltestelle H3: Linie 2, ab 9.30 Uhr, an 9.45 Uhr</p> <p>Haltestelle H3 → Zielzelle Z: Fußweg, Gehzeit 10 Minuten</p>																									
<p>4. Verbindung mit 4 Teilverbindungen:</p> <p>Quellzelle Q → Haltestelle H1: Fußweg, Gehzeit 10 Minuten</p> <p>Haltestelle H1 → Haltestelle H2: Linie 1, ab 10.00 Uhr, an 10.20 Uhr</p> <p>Haltestelle H2 → Haltestelle H3: Linie 2, ab 10.25 Uhr, an 10.40 Uhr</p> <p>Haltestelle H3 → Zielzelle Z: Fußweg, Gehzeit 10 Minuten</p>																									

Abb. 4.19: Eine Beziehung und ihre Verbindungen bzw. Teilverbindungen

Bei der Verbindungssuche wird wie bei der Routensuche ein Baum aufgebaut, der die in **Abbildung 4.20** dargestellte Struktur aufweist. In der Graphentheorie ist ein Baum gegenüber einem allgemeinen Graphen durch folgende Eigenschaften ausgezeichnet (BRAUN, 1980):

- Der Baum ist *azyklisch*, d.h. es ist kein Kreis enthalten.
- Es existiert genau ein Astelement, die *Wurzel* des Baumes, das keinen Vorgänger hat. Für alle anderen Astelemente gilt, daß sie genau einen Vorgänger haben. Astelemente, die keinen Nachfolger besitzen heißen *Astendeement*.

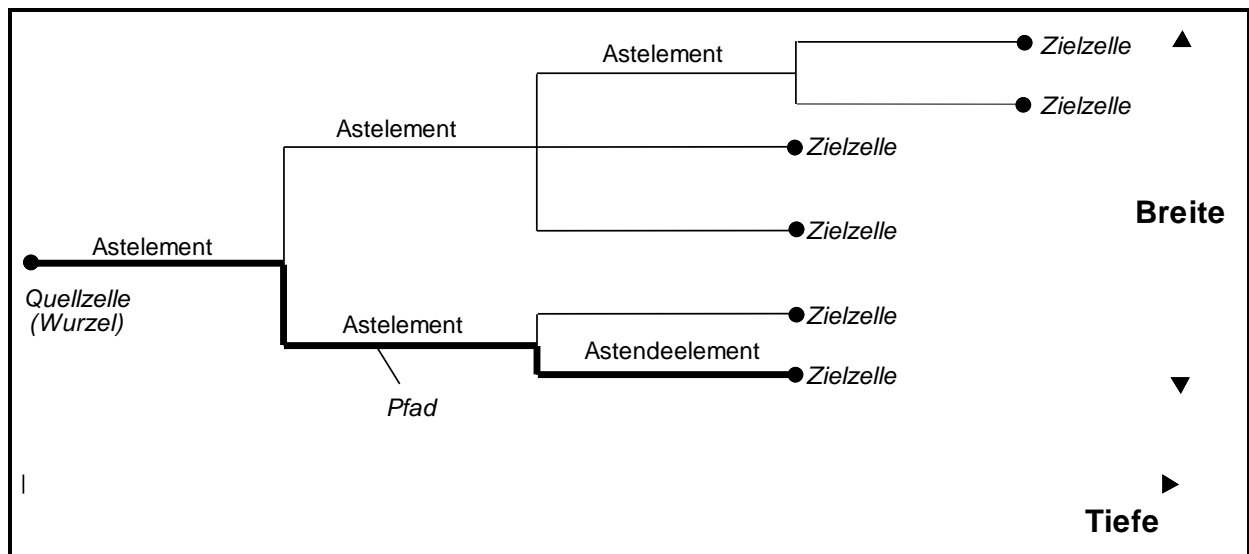


Abb. 4.20: Struktur eines Baumes

Ein *Routenbaum*, der mit einem Bestwegverfahren ermittelt wird, enthält für jede Zielzelle *genau einen* Pfad, der für einen bestimmten Zeitpunkt der kürzesten Route von der Quellzelle zur betrachteten Zielzelle entspricht. Der Pfad setzt sich aus mehreren Astelementen zusammen, die jeweils einen Streckenabschnitt zwischen zwei Knotenpunkten des Verkehrsnetzes repräsentieren.

Eine Verbindungssuche mit einem dynamischen Mehrweg-Algorithmus baut dagegen für einen Betrachtungszeitraum einen *Verbindungsbaum* auf, der zu jeder Zielzelle *mehrere* Pfade umfaßt, die jeweils einer Verbindung entsprechen. Die Verbindungen unterscheiden sich dabei durch ihre zeitliche Lage (Abfahrts- und Ankunftszeit der benutzten Linienfahrten) und unter Umständen auch durch ihre Route (benutzter Linienweg). Da der Verbindungsbaum im Gegensatz zum Routenbaum für jede Zielzelle nicht nur einen, sondern mehrere Pfade enthält, erzeugt die Verbindungssuche einen erheblich breiteren Baum. Die Baumbreite hängt dabei vor allem von der Bedienungshäufigkeit ab, die die Zahl möglicher Verbindungen bestimmt. Die Tiefe des Baumes wird wie bei der Routensuche durch die aufeinanderfolgende Zahl der Astelemente bestimmt, aus denen sich der tiefste Pfad des Baumes zusammensetzt. Während die Breite eines Baumes den Bearbeitungsaufwand bei der Baumerstellung linear beeinflusst, steigt der Bearbeitungsaufwand durch die Tiefe des Baumes wesentlich stärker als linear, da an jedem Verzweigungspunkt zusätzliche Wahlmöglichkeiten hinzukommen. Nachdem bei der Verbindungssuche somit ein möglichst wenig tiefer Baum erwünscht ist, wird die Struktur des Baumes dadurch vereinfacht, daß ein Astelement nicht nur einen Streckenabschnitt, sondern einen ganzen Linienabschnitt, d.h. eine Teilverbindung, repräsentiert. Auf diese Weise läßt sich die Tiefe des Baumes und somit der Bearbeitungsaufwand für die Verbindungssuche stark einschränken.

### 4.3.2 Datenstrukturen

#### 4.3.2.1 Teilverbindung

Eine Verbindung zwischen zwei Verkehrszellen setzt sich aus mehreren Teilverbindungen zusammen. Jede Teilverbindung wird durch den Datensatz

- Anfangsknotennummer,
- Abfahrtszeitminute am Anfangsknoten,
- Endknotennummer,
- Ankunftszeitminute am Endknoten,
- benutzte Liniennummer,
- Nummer der benutzten Linienfahrt und
- Weglänge

beschrieben. Eine Teilverbindung repräsentiert dabei entweder

- einen Fußweg von der Quellzelle zur Einstiegshaltestelle,
- eine umsteigefreie Beförderung mit einer Linie zwischen der Einstiegs- bzw. Umsteigehaltestelle und der Ausstiegs- bzw. Umsteigehaltestelle oder
- einen Fußweg von der Ausstiegshaltestelle zur Zielzelle.

Dabei sind die Abgangszeitpunkte für einen Fußweg frei wählbar, während die Teilverbindungen mit einer ÖPNV-Linie den Abfahrts- und Ankunftsrestriktionen der benutzten Linienfahrt unterliegen. Eine Teilverbindung mit einer Linie kann sich über mehrere Zwischenhaltestellen, die keine Wende- oder Endhaltestellen sind, erstrecken und umfaßt dann mehrere Strecken- bzw. Linienabschnitte. Die Teilverbindungen werden in einem vorgeschalteten Arbeitsschritt Netzaufbereitung generiert. **Abbildung 4.21** zeigt, wie die Teilverbindungen für eine Linie in der Netzaufbereitung aufgebaut werden.

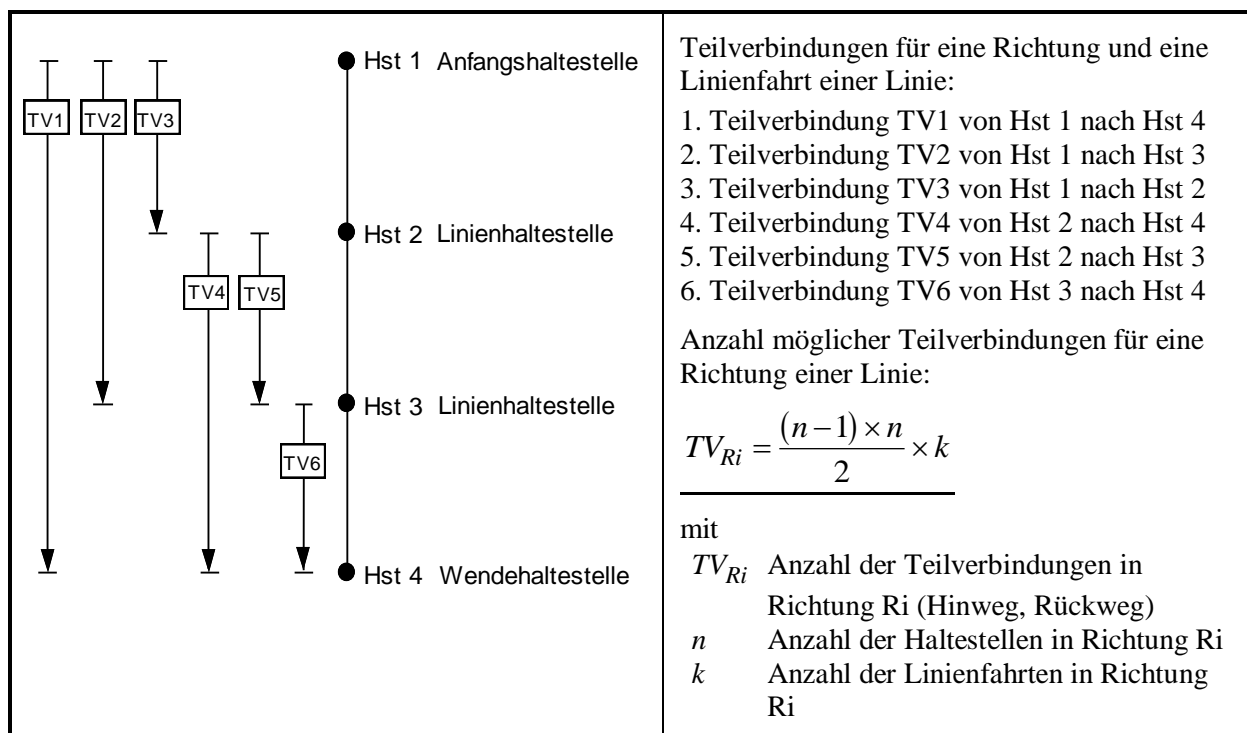


Abb. 4.21: Erzeugung von Teilverbindungen einer Linie bei der Netzaufbereitung

Bei der Netzaufbereitung genügt es, nur diejenigen Haltestellen zu berücksichtigen, an denen in eine Linie ein- bzw. ausgestiegen werden kann. Das ist bei Haltestellen der Fall, die im Netzmodell durch einen Fußweg erschlossen sind oder die von mehr als einer Linie bedient werden und somit mögliche Umsteigehaltestellen darstellen. Das Benutzermodell kann im übrigen auch Park-and-Ride (P&R) Fahrten berücksichtigen. Dazu werden mit einem vorgeschalteten IV-Routensuchverfahren IV-Teilverbindungen von der Verkehrszelle zu allen P&R Haltestelle generiert, die in ihren Eigenschaften den Fußweg-Teilverbindungen ähnlich sind.

#### 4.3.2.2 Verbindung

Eine Verbindung von der Quellzelle zu einer Zielzelle wird durch eine Menge von Teilverbindungsdatensätzen beschrieben. Dabei enthält jeder Datensatz die Informationen für eine Teilverbindung, d.h. für eine Streckenfolge im Netz, die ohne Umsteigen mit dem gleichen Fahrzeug bzw. zu Fuß zurückgelegt werden kann. Die Folge der Teilverbindungen stellt dann die gesamte Verbindung dar. Die Zahl der Teilverbindungen einer Verbindung ergibt sich aus der Umsteigehäufigkeit einer Verbindung. In ÖPNV-Netzen sind mehrere Kombinationen von Teilverbindungen möglich, die in **Tabelle 4.1** bis zu einer Umsteigehäufigkeit von 2 Umsteigevorgängen dargestellt sind. Ein Wechselvorgang bezeichnet dabei den Übergang von einer Teilverbindung auf eine nachfolgende Teilverbindung. Er tritt beim Einsteigen, Umsteigen und beim Aussteigen auf. Die Zahl der Knoten umfaßt die Quellzelle, die Zielzelle und alle Einstiegs-, Ausstiegs- und Umsteigehaltestellen.

	Fußweg	Fußweg-Fußweg	Fußweg-Linie-Fußweg	Fußweg-Linie-Linie-Fußweg	Fußweg-Linie-Linie-Linie-Fußweg
Datensätze	1	2	3	4	5
Wechselvorgänge	0	1	2	3	4
Umsteigehäufigkeit	0	0	0	1	2
Zahl der Knoten	2	3	4	5	6

Tab. 4.1: Mögliche Kombinationen von Teilverbindungen auf dem Weg von einer Quellzelle zu einer Zielzelle

#### 4.3.2.3 Verbindungsbaum

Der Verbindungsbaum, der bei der Verbindungssuche aufgebaut wird, ist schematisch in **Abbildung 4.22** dargestellt. Der Baum besteht aus einer Wurzel, das ist die Quellzelle, und aus Astelementen, die jeweils einer Teilverbindung entsprechen. Ein Astelement heißt offen, wenn der Endknoten der Teilverbindung keine Verkehrszelle ist, andernfalls wird es als geschlossen bezeichnet. Um keine Teilverbindungen mehrfach speichern zu müssen, werden die Teilverbindungen des Verbindungsbaumes mit rekursiver Vorgängernotation in einer Teilverbindungsliste und in einer Verknüpfungsliste abgespeichert.



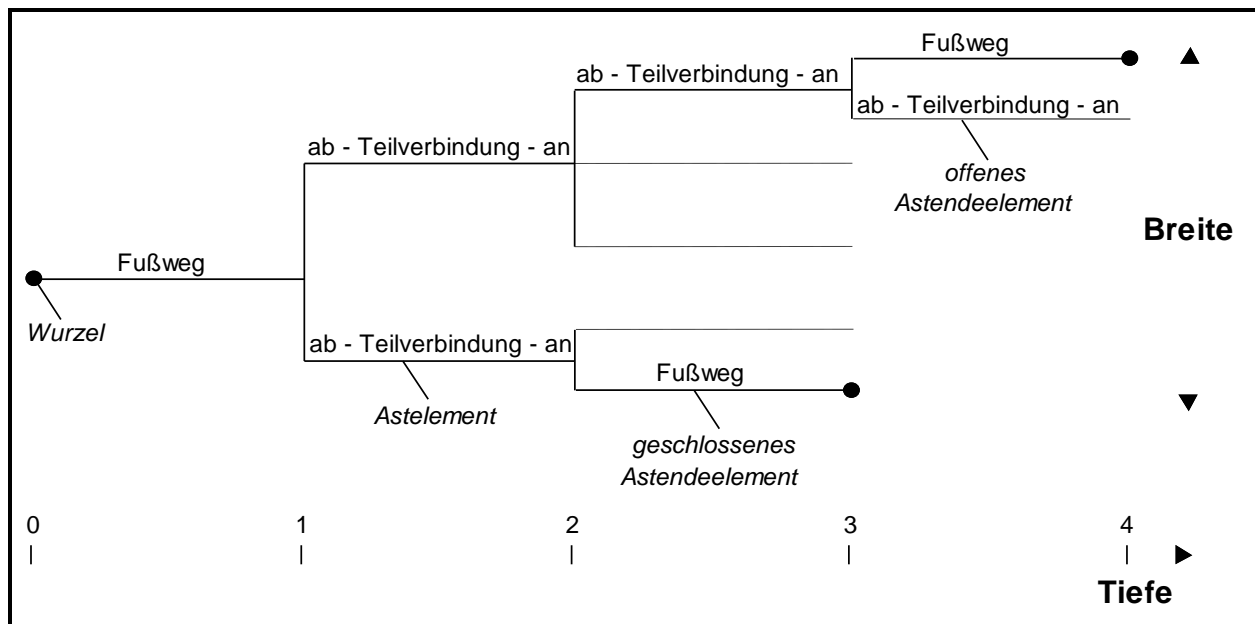


Abb. 4.22: Verbindungsbaum

Die *Teilverbindungsliste* enthält die Nummern der Teilverbindungsdatensätze. Beginnend mit einem 0. Teilverbindungsdatensatz werden an die Liste die Nummern der Datensätze angefügt, die beim Aufbau des Baumes als zulässige Nachfolge-Teilverbindungen ermittelt werden. In die Teilverbindungsliste kann eine Datensatznummer mehrfach angefügt werden.

Die *Verknüpfungsliste* enthält die Position, an der der zugehörige Vorgänger-Datensatz einer Teilverbindung in der Teilverbindungsliste abgespeichert ist. Über die Verknüpfungsliste kann somit für jeden Endknoten des Verbindungsbaumes die gesamte Verbindungsroute zurück bis zum Quellknoten ermittelt werden. Da es sich um einen Baum handelt, ist die Zuordnung eines Endknotens zum Quellknoten eindeutig.

**Abbildung 4.23** zeigt ein Beispiel für eine Teilverbindungsliste mit der dazugehörigen Verknüpfungsliste.

0	1	6	7	<b>8</b>	11	12	13	15	<b>8</b>	14	16	<b>17</b>	<b>24</b>	<b>17</b>	18	<b>24</b>	<b>17</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	Teilverbindungsliste
0	1	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	6	7	8	8	9	11	12	16	Verknüpfungsliste
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Position Pos

Die fett markierten Teilverbindungsdatensätze sind Astendeelemente, deren Endknoten eine Verkehrszelle ist. Um z.B. vom Astende-Datensatz 24 an der Position 20 zur Wurzel zu gelangen, werden folgende Teilverbindungsdatensätze benutzt:

24 (Pos=20) → 18 (Pos=16) → 13 (Pos=8) → 6 (Pos=3) → 1 (Pos=2) → 0 (Pos=1)

Dieses Astende hat 5 Teilverbindungen als Vorgänger, d.h. es muß 5-3=2 mal umgestiegen werden.

Abb. 4.23: Beispiel für eine Teilverbindungsliste und eine Verknüpfungsliste

### 4.3.3 Verbindungssuche

Bei der Verbindungssuche wird aus einer sortierten und numerierten Teilverbindungsliste (Nachfolgerliste) für jede Verkehrszelle  $i$  ein Verbindungsbaum (**Abbildung 4.22**) aufgebaut. Wurzel des Baumes ist die Verkehrszelle  $i$  bzw. der Stutzen der Verkehrszelle. Beim Aufbau des Baumes wächst der Baum ausgehend von der Wurzel Schritt für Schritt um weitere Astelemente (= Teilverbindungen). Dabei werden für jedes offene Astelement des Baumes zulässige Teilverbindungen als Nachfolger gesucht. Um den Umfang des Baumes und damit den Rechenaufwand zu reduzieren, werden Abbruchkriterien festgelegt, die die Tiefe und die Breite des Baumes begrenzen. Dadurch ergibt sich ein Verbindungsbaum, der sich durch eine vorgegebene, sehr geringe Tiefe und eine unbekannte Breite auszeichnet. Die Tiefe wird vom Planer durch eine maximale Umsteigehäufigkeit vorgegeben. Die Breite des Baumes hängt vom ÖPNV-Angebot und den Abbruchkriterien ab, die der Planer wählt.

#### 4.3.3.1 Abbruchkriterien

Um den Aufwand bei der Verbindungssuche, die nicht nur die eine beste Verbindung, sondern alle sinnvollen Verbindung ermitteln soll, zu reduzieren, werden folgenden Abbruchkriterien eingeführt:

- Der Aufbau des Baumes wird abgebrochen, wenn die Tiefe  $T$  des Baumes eine vorgegebene, maximale Umsteigehäufigkeit  $UH_{\max}$  überschreitet.

$$T \leq UH_{\max} + 2$$

- Eine neues Astelement darf nur dann an den Baum angeschlossen werden, wenn die Reisezeit  $RZ$  [Minuten] zum neuen Astende eine maximal zulässige Reisezeit  $RZ_{\max}$  nicht überschreitet. Die maximal zulässige Reisezeit für die Verbindung von einer Quellzelle zu einem Astende ergibt sich aus der minimalen Reisezeit  $RZ_{\min}$  für die betrachtete Beziehung, die um einen konstanten Betrag und einen zusätzlichen Faktor erhöht wird. Dabei sollte ein kleiner Faktor  $Fak1_{RZ}$  (1.0 bis 1.1) gewählt werden, da ein Fahrgast eher eine konstante Reisezeitverlängerung in Kauf nehmen wird als eine Verlängerung, die von der Reiseweite abhängt (vgl. SONNTAG, 1977).

$$RZ \leq RZ_{\max} = RZ_{\min} \times Fak1_{RZ} + Fak2_{RZ}$$

- Eine neues Astelement darf an den Baum nur dann angeschlossen werden, wenn die Umsteigehäufigkeit  $UH$  zum neuen Astende eine maximal zulässige Umsteigehäufigkeit  $UH_{\max}$  nicht überschreitet. Die maximal zulässige Umsteigehäufigkeit für die Verbindung von einer Quellzelle zu einem Astende ergibt sich aus der minimal notwendigen Umsteigehäufigkeit  $UH_{\min}$  für die betrachtete Beziehung, die um einen konstanten ganzzahligen Betrag erhöht wird. Dieses Abbruchkriterium begrenzt im Gegensatz zum ersten Kriterium nicht die Tiefe des gesamten Baumes, sondern die Tiefe für einzelne Beziehungen.

$$UH \leq UH_{\max} = UH_{\min} + Fak1_{UH}$$

- Eine neues Astelement darf an den Baum nur dann angeschlossen werden, wenn die Umsteigewartezeit  $UZ$  zum neuen Astende eine maximal zulässige Umsteigezeit  $UZ_{\max}$  nicht überschreitet.

$$UZ \leq UZ_{\max}$$

#### 4.3.3.2 Aufbau des Verbindungsbaumes

In **Abbildung 4.24** ist der Ablauf des Algorithmus dargestellt, mit dem der Verbindungsbaum für eine Quellzelle aufgebaut wird. Ausgangspunkt ist ein 0. Teilverbindungsdatensatz, dessen Endknoten die Quellzelle ist. Von dieser Wurzel werden die Teilverbindungen als Nachfolger akzeptiert, die die Quellzelle als Anfangsknoten haben. Das können nur Fußwege sein, die die Quellzelle mit einer Haltestelle verbinden. Im nächsten Schritt werden die Teilverbindungen als Nachfolger angefügt, die von diesen Einstiegshaltestellen weiterführen. Allgemein müssen folgende Bedingungen erfüllt sein, damit der Algorithmus eine Teilverbindung  $j$  an ein offenes Astendeelement, d.h. an eine Teilverbindung  $i$ , anfügen kann:

- Die Teilverbindung  $i$  muß offen sein, d.h. ihr Endknoten darf keine Verkehrszelle sein.
- Die Teilverbindung  $i$  muß mit der Teilverbindung  $j$  räumlich verknüpft sein, d.h. der Endknoten von  $i$  muß mit dem Anfangsknoten von  $j$  übereinstimmen.
- Die Teilverbindung  $i$  muß eine andere Linie benutzen als die Teilverbindung  $j$ , damit nicht in die gleiche Linie umgestiegen wird.
- Die Ankunft der Teilverbindung  $i$  muß vor der Abfahrt der Teilverbindung  $j$  liegen. Dabei kann eine haltestellenspezifische Übergangszeit berücksichtigt werden.
- Die Abfahrt der Teilverbindung  $j$  muß innerhalb der vorgegebenen maximalen Umsteigewartezeit nach der Ankunft der Teilverbindung  $i$  erfolgen.
- Die vorgegebenen Werte für die maximale Reisezeit und die maximale Umsteigehäufigkeit dürfen für den Endknoten der Teilverbindung  $j$  nicht überschritten werden.

---

BEGIN Aufbau Verbindungsbaum

Setze für alle Knoten (Haltestellen, Verkehrszellen) die Reisezeit und die Umsteigehäufigkeit := sehr große Zahl

Setze für die Wurzel die Reisezeit := 0 und die Umsteigehäufigkeit := 0

Erzeuge einen 0. Teilverbindungsdatensatz (Stutzen)

Die Datenelemente der 0. Teilverbindung haben die Werte:

Anfangsknoten := 0;

Abfahrtsminute := 0;

Endknoten := Wurzel := Quellzelle;

Ankunftsminute := 0;

Liniennummer := 0

Initialisiere die Teilverbindungsliste,

d.h. setze 1. Element der Teilverbindungsliste auf 0 (= 0. Teilverbindungsdatensatz).

Initialisiere die Verknüpfungsliste,

d.h. setze 1. Element der Verknüpfungsliste auf 0 (= Listenanfang).

Setze Tiefe T des Baumes auf T:=0

WHILE Tiefe ≤ maximale Umsteigehäufigkeit + 2

BEGIN Suche die Nachfolger-Teilverbindungen für alle offenen Teilverbindungen i der Tiefe T

BEGIN Überprüfe für alle Teilverbindungen j, ob sie ein zulässiger Nachfolger der Teilverbindung i sind

IF Anfangsknoten[j] = Endknoten[i] (*Teilverbindungen sind räumlich verknüpft*)

AND Linie[j] ≠ Linie[i] (*nicht in gleiche Linie umsteigen*)

AND Abfahrtsminute[j] > Ankunftsminute[i] (*Abfahrt vor Ankunft*)

AND Abfahrtsminute[j] ≤ Ankunftsminute[i] (*Umsteigewartezeit zu lang*)

AND Reisezeit (Wurzel → Endknoten[j]) ≤  $RZ_{\max}$  (Wurzel → Endknoten[j])

AND Umsteigehäufigkeit (Wurzel → Endknoten[j]) ≤  $UH_{\max}$  (Wurzel → Endknoten[j])

THEN

BEGIN Einfügen der Teilverbindung j als neuen Nachfolger

Füge die Teilverbindung j in die Teilverbindungsliste und notiere die Position der Vorgängerverbindung i in der Verknüpfungsliste.

IF Reisezeit (Wurzel → Endknoten[j]) <  $RZ_{\min}$  (Wurzel → Endknoten[j]) THEN

$RZ_{\min}$  (Wurzel → Endknoten[j]) = Reisezeit (Wurzel → Endknoten[j])

IF Umsteigehäufigkeit (Wurzel → Endknoten[j]) <  $UH_{\min}$  (Wurzel → Endknoten[j]) THEN

$UH_{\min}$  (Wurzel → Endknoten[j]) = Umsteigehäufigkeit (Wurzel → Endknoten[j])

END Einfügen

END Überprüfen aller Teilverbindungen

END Bearbeiten aller offenen Teilverbindungen i

Erhöhe die Tiefe des Baumes +1

END

END Aufbau Verbindungsbaum

---

Abb. 4.24: Algorithmus zum Aufbau des Verbindungsbaumes

#### 4.3.4 Verbindungswahl

Bei der Verbindungswahl werden alle im Verbindungsbaum abgespeicherten Verbindungen jeweils für eine Quelle-Ziel-Beziehung i-j ausgewertet. Für jede Verbindung werden die Kenngrößen ermittelt, die dann die Grundlage für einen Vergleich der Verbindungen bilden. Die Verbindungswahl klassifiziert die Verbindungen entweder in sinnvolle oder unlogische Verbindungen. Dabei wird bestimmt, ob eine bisher in Betracht gezogene Verbindung durch eine andere, günstigere Verbindung ersetzt und daher gelöscht werden kann. Nur die sinnvollen Verbindungen werden beim Verbindungssplit den Fahrgästen zur Auswahl gestellt. Um sinnvolle Verbindungen von unlogischen Verbindungen zu unterscheiden, wählt der Planer Regeln, die nachfolgend erläutert werden.

##### Regel 1:

Alle Verbindungen ohne Umsteigen sind zulässig.

**Wirkung:** Verbindungen ohne Umsteigen werden auch dann nicht gelöscht, wenn es zum gleichen Zeitpunkt schnellere Verbindungen, aber mit Umsteigen gibt.

##### Regel 2:

Alle Verbindungen V2 werden gelöscht, wenn

- Umsteigehäufigkeit  $UH2 > UH1$  und
- Reisezeit  $RZ2 \geq RZ1$  und
- die erste benutzte Linienfahrt der beiden Verbindungen übereinstimmt oder
- die letzte benutzte Linienfahrt der beiden Verbindungen übereinstimmt.

**Wirkung:** Diese Regel löscht Verbindungen, die nur eine Abweichung von einer günstigeren Verbindung darstellen. So können für eine Beziehung z.B. die folgenden zwei Verbindungen gefunden werden, von denen die Verbindung V2 offensichtlich keine wirkliche Verbindung darstellt.

Verbindung V1

HST	ab	Linie	an	HST
HST_A	10.00	Bus 1	10.40	HST_E

Verbindung V2

HST	ab	Linie	an	HST
HST_A	09.50	Bus 2	10.10	HST_U
HST_U	10.20	Bus 1	10.40	HST_E

##### Regel 3:

Alle Verbindungen V2 werden gelöscht, wenn

- Umsteigehäufigkeit  $UH2 \geq UH1$  und
- Abgangszeit AB2 an der Quelle gleichzeitig mit oder früher als Abgangszeit AB1 und

- Ankunftszeit AN2 am Ziel gleichzeitig mit oder später als Ankunftszeit AN1 und
- Gehzeit  $G2 \geq$  Gehzeit  $G1$  und
- Reisezeit  $RZ2 >$  Reisezeit  $RZ1$ ,

oder wenn

- Umsteigehäufigkeit  $UH2 >$  Umsteigehäufigkeit  $UH1$  und
- Abgangszeit AB2 an der Quelle gleichzeitig mit oder früher als Abgangszeit AB1 und
- Ankunftszeit AN2 am Ziel gleichzeitig mit oder später als Ankunftszeit AN1 und
- Gehzeit  $G2 \geq$  Gehzeit  $G1$  und
- Reisezeit  $RZ2 \geq$  Reisezeit  $RZ1$ .

**Wirkung:** Verbindungen, die einen Fahrtbeginn vor einer alternativen Verbindung erfordern und erst später als diese ihr Ziel erreichen, werden nur dann nicht gelöscht, wenn entweder die Umsteigehäufigkeit oder die Gehzeit dieser Verbindung geringer ist.

#### Regel 4:

Alle Verbindungen V2 werden gelöscht, wenn

- Umsteigehäufigkeit  $UH2 \geq$  Umsteigehäufigkeit  $UH1$  und
- Abgangszeit AB2 an der Quelle gleichzeitig mit oder früher als Abgangszeit AB1 und
- Ankunftszeit AN2 am Ziel gleichzeitig mit oder später als Ankunftszeit AN1 und
- Reisezeit  $RZ2 >$  Reisezeit  $RZ1$ .

**Wirkung:** Verbindungen, die einen Fahrtbeginn vor einer alternativen Verbindung erfordern und erst später als diese ihr Ziel erreichen, werden nur dann nicht gelöscht, wenn die Umsteigehäufigkeit dieser Verbindung geringer ist. Im Gegensatz zur 3. Regel werden Fußwege nur indirekt über die Reisezeit berücksichtigt. Es werden also auch Verbindungen gelöscht, die zwar ein zusätzliches Umsteigen erfordern, aber dafür kürzere Fußwege aufweisen. Solche Verbindungen enthalten beispielsweise kurze Zubringerlinien zur Abfahrtshaltestelle der Hauptlinie, die schneller zu Fuß erreichbar ist.

#### Regel 5:

Wenn die Nummern aller Linienfahrten zweier Verbindungen übereinstimmen, dann lösche die Verbindung mit der längeren Reisezeit.

**Wirkung:** Verbindungen, die sich nur durch die Ein- bzw. Ausstiegshaltestelle, nicht jedoch durch die benutzte Linienfolge unterscheiden, werden nur einmal berücksichtigt. Dieser Regel liegt die Annahme zugrunde, daß ein Fahrgast, der zwischen zwei Einstiegshaltstellen in eine Linie wählen kann, die Verbindung mit der kürzeren Reisezeit aussucht. Der Einfluß der Gehzeit wird nur indirekt über die Reisezeit berücksichtigt.

**Regel 6:**

Alle Verbindungen V2 mit einer größeren Umsteigehäufigkeit als eine alternative Verbindung V1 werden gelöscht, wenn sie innerhalb von  $\Delta T$  Minuten vor oder nach der Verbindung V1 beginnen.

**Wirkung:** Eine Verbindung V2 mit  $U_2 = U_1 + 1$  Umsteigevorgängen wird nur dann als alternative Verbindung zu einer Verbindung V1 mit  $U_1$  Umsteigevorgängen akzeptiert, wenn sie mindestens  $\Delta T$  Minuten vor oder nach der Abfahrt von Verbindung V1 abfährt:

Verbindung V1					Verbindung V2				
HST	ab	Linie	an	HST	HST	ab	Linie	an	HST
HST_A	10.00	Bus 1	10.35	HST_E	HST_A	09.00	Bus 2	09.20	HST_U
					HST_U	09.25	Bus 3	09.50	HST_E

Verbindung V2 wird nur akzeptiert, wenn  $\Delta T \leq 60$  Minuten gesetzt wurde.

**Regel 7:**

Vergleiche alle Verbindungen, für die die erste und die letzte Linienfahrt identisch sind.

- Wenn die Umsteigehäufigkeit gleich ist, dann lösche Verbindung mit der längeren Reisezeit.
- Wenn die Reisezeit gleich ist, dann lösche die Verbindung mit der längeren Gehzeit.
- Wenn die Gehzeit gleich ist, dann lösche die Verbindung mit der größeren Länge.
- Wenn die Länge gleich ist, dann lösche die Verbindung mit der größeren Umsteigezeit.

**Wirkung:** Gibt es entlang zweier Linien mehrere Umsteigehaltestellen, dann findet der Algorithmus zur Verbindungssuche mehrere Verbindungen. Die Anwendung der Regel bewirkt, daß nur eine dieser Verbindungen ausgewählt wird. Bei dem in **Abbildung 4.25** dargestellten Beispiel gibt es für die Beziehung von HST\_A nach HST\_E Umsteigemöglichkeiten an den Haltestellen HST\_X und HST\_Y. Bei Anwendung der Regel wird die Verbindung V2, bei der die Haltestelle HST\_Y Umsteigehaltestelle ist, gelöscht, da sie die größere Länge aufweist.

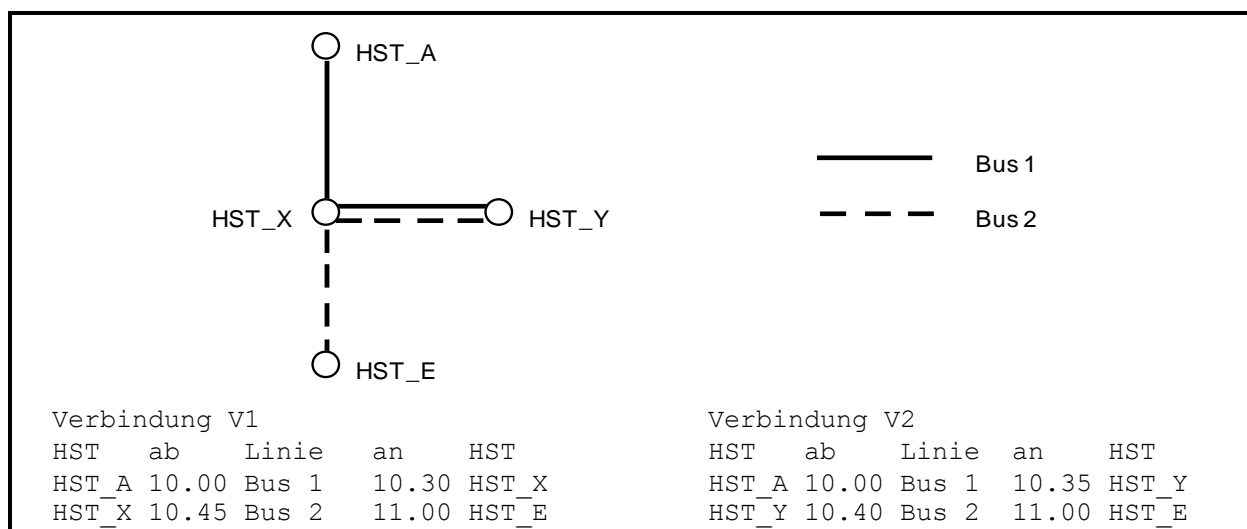


Abb. 4.25: Beispiel zur Regel 7

**Regel 8:**

Alle Verbindungen V2 mit einer längeren Reisezeit als eine Verbindung V1 werden gelöscht.

**Wirkung:** Diese Regel reduziert die Verbindungssuche auf eine Bestwegsuche, wie sie z.B. für die Kategorisierung von ÖPNV-Netzen sinnvoll ist.

**4.3.5 Verbindungssplit**

Beim *Verbindungssplit* wird die Verkehrsnachfrage einer Beziehung den angebotenen ÖPNV-Verbindungen dieser Beziehung zugeordnet. Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, das Entscheidungsverhalten der Fahrgäste abzuschätzen. Um spezifische Verhaltensregeln einzubeziehen, wird beim Verbindungssplit nach Personengruppen bzw. Fahrtzwecken unterschieden. Der Verlauf der Verkehrsnachfrage über den Tag bzw. über den Untersuchungszeitraum wird durch eine Ganglinie angegeben, die die Nachfrage innerhalb eines Zeitintervalls bestimmt. Das Entscheidungsverhalten muß für jede fahrtzweckspezifische Nachfragematrix und für jedes Zeitintervall getrennt abgeschätzt werden. Nach MARTENS (1983), der auf HECHER/JOHNSON (1981) verweist, gliedert sich das Grundmuster des Entscheidungsverhaltens ausgehend von den objektiven Werten der Angebotsqualität in die Schritte (**Abbildung 4.26**)

- Bestimmung des wahrgenommenen Nutzens für jedes Merkmal (Kenngröße) einer Dienstleistung (Verbindung),
- Bestimmung des gesamten Nutzens einer Dienstleistung,
- Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für die Wahl einer Dienstleistung.



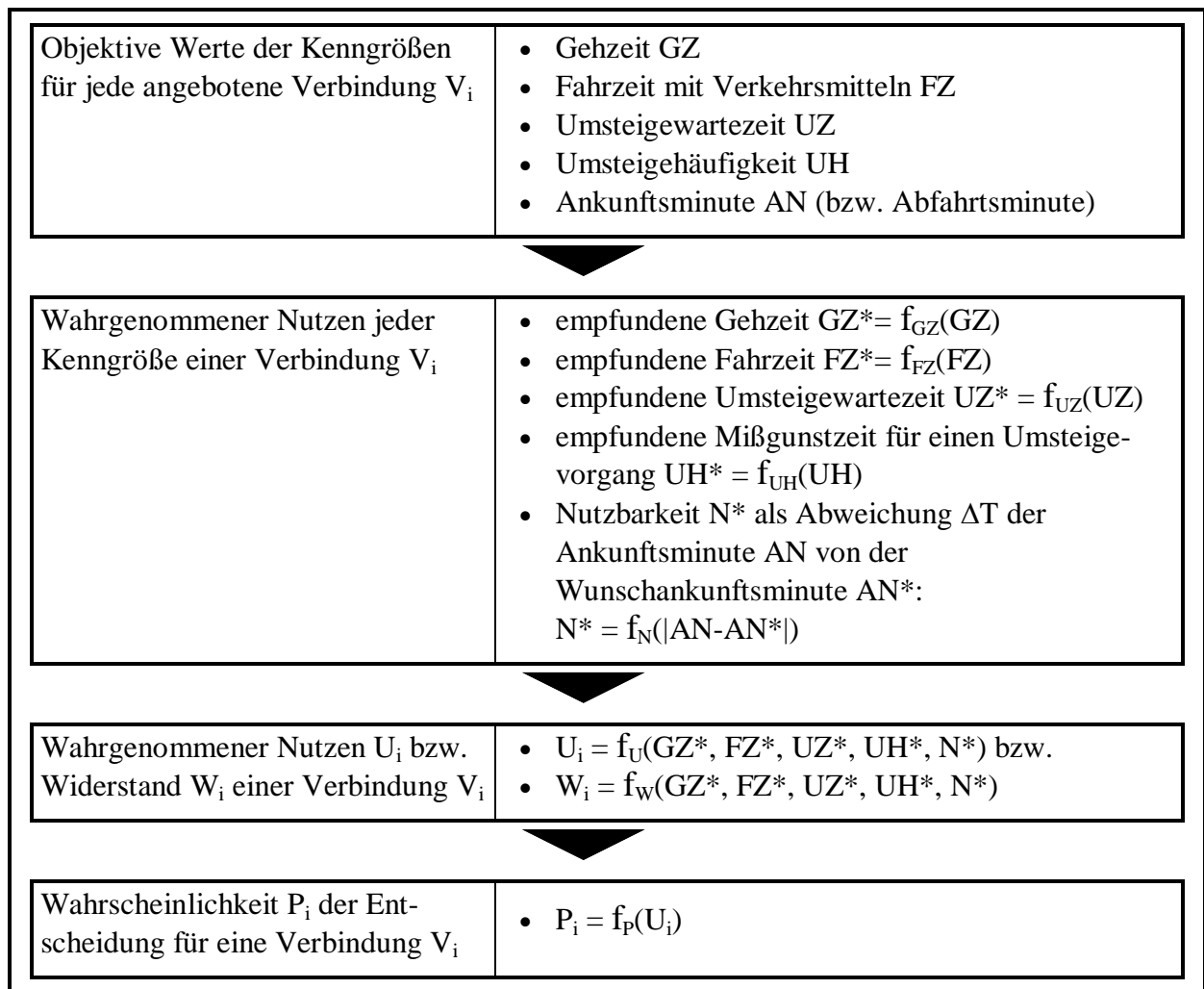


Abb. 4.26: Modell für das Entscheidungsverhalten beim Verbindungssplit

Um das obige Modell für das Entscheidungsverhalten anwenden zu können, müssen die in **Abbildung 4.26** aufgeführten Funktionen  $f_{GZ}$ ,  $f_{FZ}$ ,  $f_{UZ}$ ,  $f_{UH}$ ,  $f_N$ ,  $f_W$  und  $f_P$  bestimmt werden. Die unterschiedlichen Verhaltensweisen verschiedener Personengruppen können dabei durch gruppenspezifische Funktionsverläufe berücksichtigt werden. Für die Bewertungsfunktionen der Gehzeit (Zu- und Abgangszeit)  $f_{GZ}$ , der Fahrzeit  $f_{FZ}$ , der Umsteigewartezeit  $f_{UZ}$  und der Umsteigehäufigkeit  $f_{UH}$  kann auf WALTHER (1975a) und JUNG (1975) verwiesen werden, die den Begriff der empfundenen Reisezeit bzw. der fahrzeitäquivalenten Reisezeit verwenden. Da zur Beurteilung einer ÖPNV-Verbindung nicht nur der Zeitaufwand, sondern auch der Abfahrts- bzw. Ankunftszeitpunkt wichtig ist, muß eine Funktion eingeführt werden, die die zeitliche Nutzbarkeit einer Verbindung beschreibt. Die Nutzbarkeit einer Verbindung hängt ab von

- der Wunschabfahrtszeit bzw. Wunschankunftszeit, die durch die Ganglinie der Verkehrsnachfrage angegeben wird,
- der Zeitdifferenz  $\Delta T$  zwischen angebotener Abfahrtszeit bzw. Ankunftszeit und der Wunschabfahrtszeit bzw. Wunschankunftszeit und
- der Bedeutung der Wunschzeit, d.h. von der Toleranz gegenüber Abweichungen der angebotenen Zeit und der Wunschzeit, die Verfrühungs- bzw. Verspätungsempfindlichkeit genannt werden soll.

**Abbildung 4.27** zeigt qualitativ den Verlauf der Nutzbarkeitsfunktion  $f_N$  für verschiedene Fahrzwecke. Die Nutzbarkeit wird dabei als ein Wert zwischen 0 und 1 ausgedrückt. Der Wert 1 beschreibt eine hohe zeitliche Nutzbarkeit einer Verbindung, d.h. die zeitliche Lage der Verbindung stimmt mit der erwünschten Zeit überein. Der Wert 0 gibt die Unbrauchbarkeit einer Verbindung aufgrund ihrer zeitlichen Lage an. Die zeitlich indisponiblen Fahrten des Schülerverkehrs charakterisiert eine hohe Verspätungsempfindlichkeit auf der Hinfahrt und eine hohe Verfrühungsempfindlichkeit auf der Rückfahrt. Für den Berufsverkehr kann angenommen werden, daß ein Teil der Berufstätigen aufgrund flexibler Arbeitszeitregelungen den Zeitpunkt der Fahrt innerhalb gewisser Grenzen disponieren kann. Im Einkaufs- und Erledigungsverkehr ist der Einfluß der Wunschzeit geringer, so daß ein größerer Teil der Fahrgäste günstigere Verbindungen, die vor oder nach der Wunschzeit liegen, nutzen kann.

Die Wahrscheinlichkeit  $P_i$ , daß eine Verbindung  $V_i$  aus einer Menge von  $n$  Verbindungen gewählt wird, hängt vom gesamten Nutzen  $U_i$  bzw. vom Widerstand  $W_i$  der Verbindung  $V_i$  ab. Über den Widerstand, der umgekehrt proportional zum Nutzen ist, kann der Anteil einer Verbindung  $V_i$  bestimmt werden. Der Widerstand  $W_i$  einer Verbindung ist eine Bewertungszahl, die sich

- aus der empfundenen Reisezeit  $RZ^* = GZ^* + FZ^* + UZ^* + UH^*$  und
- aus der Nutzbarkeit  $N^*$

zusammensetzt. Die Widerstandsfunktion  $f_W$  wird definiert als der Quotient aus empfundener Reisezeit und Nutzbarkeit:

$$W_i = \frac{RZ_i^*}{N_i^*}$$

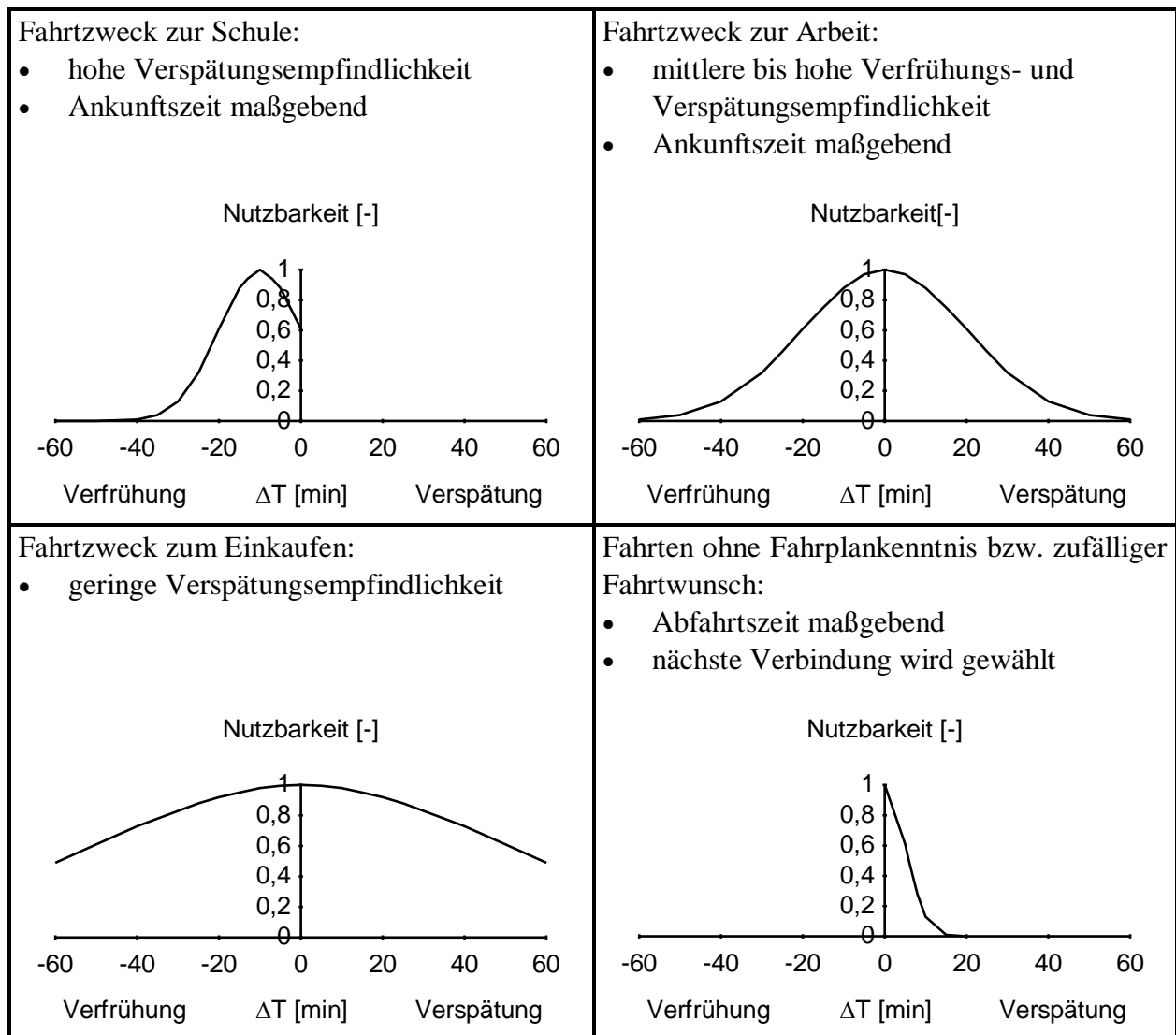


Abb. 4.27: Nutzbarkeit von Verbindungen, die von der Wunschabfahrtszeit bzw. Wunschankunftszeit abweichen.

Als Verteilungsfunktion  $f_p$  wird die Kirchhoff'sche Formel mit einen Potentialfaktor  $\alpha$  gewählt:

$P_i = \frac{W_i^\alpha}{\sum_{j=1}^n W_j^\alpha}$	<p><math>P_i</math> Anteil der Verbindung <math>V_i</math></p> <p><math>W_i</math> Widerstand der Verbindung <math>V_i</math></p> <p><math>\alpha</math> Potentialfaktor</p>
--	--

#### 4.3.6 Beurteilung des Modells

Für das oben vorgestellte Modell sind als Eingangsdaten

- der in einem Netzmodell abgebildete Linienplan und Fahrplan,
- die fahrtzweckspezifische Verkehrsnachfrage,
- die Ganglinie der Verkehrsnachfrage bezogen auf die Abfahrts- oder Ankunftszeit und
- die Parameter des Entscheidungsmodells zum Verbindungssplit

erforderlich. Das Modell gliedert sich in die Teile Auswertung und Bewertung. In der Verbindungssuche werden die *objektiven* Daten des Linienplans und des Fahrplans ausgewertet. Im Gegensatz zu den Kenngrößen, die ein IV-Netz beschreiben, können für ein ÖPNV-Angebot die Kenngrößen der Verbindungen exakt und damit ohne zusätzliche Annahmen des Planers ermittelt werden. Allein die Genauigkeit, mit der die Linienplan- und Fahrplandaten in das Netzmodell übertragen werden, bestimmt die Qualität der Ergebnisse. Beim Verbindungssplit werden die Verbindungen bewertet und somit *subjektive* Annahmen über das Verhalten der Fahrgäste getroffen.

Bislang gibt es keine ausreichenden empirischen Untersuchungen, mit denen das oben vorgestellte Entscheidungsmodell zum Verbindungssplit geprüft bzw. geeicht werden kann. Die bekannten Untersuchungen beziehen sich entweder auf das Routenwahlverhalten der Fahrgäste in städtischen ÖPNV-Netzen (GARBEN et al., 1979) oder dienen zur Berechnung des Modal-Split (WALTHER (1975b)). Die im Tagesverlauf schwankende Angebotsqualität und die zeitliche Nutzbarkeit einer Verbindung, die besonders bei einem geringen Fahrtenangebot ins Gewicht fällt, wird dabei nicht berücksichtigt. Nachdem das Modell eingesetzt wird, um die benutzerbezogenen Kenngrößen eines ÖPNV-Angebotes zu quantifizieren, müssen die möglichen Einflüsse des Entscheidungsmodells auf die Ergebnisse der Wirkungsberechnung betrachtet werden:

- Stimmen alle Verbindungen einer Beziehung in ihrer räumlichen und zeitlichen Ausprägung überein, dann hat der Verbindungssplit keinen Einfluß auf die Kenngrößen der Beziehung, da die Kenngrößen der Verbindungen identisch sind. Die Kenngrößen eines regelmäßigen ÖPNV-Angebotes werden vom Verbindungssplit nicht beeinflusst.
- Existieren zwei oder mehrere Verbindungen mit jeweils gleichen Kenngrößen, die in jedem untersuchten Zeitintervall angeboten werden, dann hat die zeitliche Nutzbarkeit keinen Einfluß auf die Verteilung der Fahrten. Die Nutzbarkeit hat stets den Wert 1, und der Widerstand der Verbindungen wird nur von der empfunden Reisezeit, d.h. von der Bewertung der Gehzeiten, Wartezeiten und Umsteigevorgänge beeinflusst. Die Wahl des Potentialfaktors  $\alpha$  legt die Wirkung unterschiedlicher Widerstände auf die Verteilung fest.
- Bei einer geringen Zahl von Verbindungen wird der Einfluß der zeitlichen Nutzbarkeit wesentlich, wenn die Kenngrößen der Verbindungen unterschiedlich sind. Immer dann, wenn in einem Zeitintervall keine Verbindung angeboten wird, müssen die Fahrten auf zeitlich benachbarte Verbindungen verteilt werden. Die Nutzbarkeitsfunktion und der Zeitabstand einer Verbindung von den Grenzen des betrachteten Zeitintervalls bestimmen in diesem Fall vorrangig den Nutzen einer Verbindung. Dadurch wird z.B. bewirkt, daß auch die Kenngrößen unattraktiver Verbindungen der Nebenverkehrszeit in gewissem Umfang berücksichtigt werden, obgleich in der Hauptverkehrszeit attraktive direkte Verbindungen

angeboten werden. Ebenso wird die positive Wirkung einer einmaligen günstigen Verbindung, die durch zufällige Anschlüsse zustande kommt, relativiert.

- Durch unterschiedliche Verfrühungs- und Verspätungsempfindlichkeiten, d.h. bei einer unsymmetrischen Nutzbarkeitsfunktion, können entweder frühere oder spätere Verbindungen bevorzugt benutzt werden. Auf diese Weise lassen sich Schülerfahrten, die pünktlich zum Schulbeginn am Ziel ankommen müssen, auf Linienfahrten umlegen, die vorrangig für den Schülerverkehr konzipiert sind.

Das Entscheidungsmodell kann wie bei IV-Umlegungsverfahren mit den Ergebnissen einer Fahrgastzählung und -befragung für den heutigen Zustand geeicht werden. Die Eichung der Modellparameter ist vor allem dann erforderlich, wenn Belastungen einzelner Linienfahrten ermittelt werden sollen. Für alle anderen Fälle bzw. wenn eine Fahrgastbefragung aus Kostengründen nicht möglich ist, kann eine Schätzung ausreichen, wobei die in **Tabelle 4.2** angegebenen Werte einen Anhaltspunkt liefern. Die Werte sind nicht das Ergebnis einer gezielten empirischen Untersuchung, sondern stellen Erfahrungswerte aus Sensitivitätsanalysen dar, die für die in Kapitel 5 vorgestellte Untersuchung durchgeführt wurden.

Empfundene Reisezeit $RZ^* = (GZ \times F_{GZ} + UZ \times F_{UZ} + UH \times F_{UH} + FZ \times F_{FZ})$	
Kenngröße	Zeitbewertungsfaktor
GZ Gehzeit [min]	$F_{GZ} = 1.0 \text{ bis } 5.0 [-]$
UZ Umsteigewartezeit [min]	$F_{UZ} = 1.0 \text{ bis } 5.0 [-]$
UH Umsteigehäufigkeit [-]	$F_{UH} = 0 \text{ bis } 20 [\text{min}]$
FZ Fahrzeit [min]	$F_{FZ} = 1.0 [-]$
<p>In Anlehnung an die Normalverteilung könnte die zeitliche Nutzbarkeit <math>N^*</math> durch folgende Funktion dargestellt werden (vergleiche Nutzbarkeitsfunktionen in Abbildung 4.27):</p> $N^* = e^{-(\Delta T \times VF)^2 / 2}$ <p>VF Verfrühungs- bzw. Verspätungsempfindlichkeit, <math>VF = 0 \text{ bis } 1 [-]</math>  <math>\Delta T</math> Zeitdifferenz zwischen erwünschter Ankunftszeitminute <math>AN^*</math> und vorhandener Ankunftszeitminute <math>AN</math>: <math>\Delta T =  AN - AN^*  [\text{min}]</math>  oder  Zeitdifferenz zwischen erwünschter Abfahrtszeitminute <math>AB^*</math> und vorhandener Abfahrtszeitminute <math>AB</math>: <math>\Delta T =  AB - AB^*  [\text{min}]</math></p>	
Potentialfaktor $\alpha = -1 \text{ bis } -8 [-]$	
<p>Ganglinie der Verkehrsnachfrage:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• je nach Fahrtzweck bezogen auf die Abfahrtszeit oder die Ankunftszeit</li> <li>• Länge eines Zeitintervalls 20 Minuten bis 60 Minuten</li> <li>• Länge eines Zeitintervalls <math>\leq</math> kürzeste Fahrzeugfolgezeit einer Linie</li> </ul>	

Tab. 4.2: Anhaltswerte für den Verbindungssplit

### 4.3.7 Beispiel

Der Ablauf einer Verbindungssuche und Verbindungswahl soll mit Hilfe des Beispiels aus **Abbildung 4.15** (Kapitel 4.2.3) erläutert werden. Um den Umfang des Beispiels zu begrenzen, wird dabei bei der Verbindungssuche und bei der Verbindungswahl nur die Verbindung von Verkehrszelle 10 zu Verkehrszelle 40 berücksichtigt. Die Netzaufbereitung umfaßt das gesamte ÖPNV-Angebot des Beispiels.

### Netzaufbereitung

Bei der Netzaufbereitung wird eine Knotenliste, eine Linienliste und eine Nachfolgerliste erzeugt. Die Knotenliste, die aus Verkehrszellen und Haltestellen besteht, und die Linienliste für das Beispiel sind in **Tabelle 4.3** dargestellt.

Knotenliste (Zellen, Haltestellen)		Linienliste	
Knotennummer	Knotenname	Liniennummer	Linienname
1	10	0	zu Fuß
2	20	1	Bus 1
3	30	2	Bus 2
4	40	3	Bus 3
5	Hst_1		
6	Hst_2		
7	Hst_3		
8	Hst_4		

Tab. 4.3: Knotenliste und Linienliste

Die Nachfolgerliste (**Tabelle 4.4**) enthält für jeden Knoten alle Teilverbindungen, die den Knoten als Anfangsknoten haben. Die Liste beginnt mit den vier Teilverbindungen, die die vier Verkehrszellen mit einem Fußweg an eine Haltestelle anschließen. Fußwege haben im Gegensatz zu Linienfahrten keine absolute Abfahrtszeit, da sie jederzeit verfügbar sind. Anschließend enthält die Liste drei Teilverbindungen, die an der Knotennummer 5, das ist die Haltestelle Hst\_1 beginnen. Von der Hst\_1 führt ein Fußweg zurück zur Zelle 10. Zwei Teilverbindungen verknüpfen die Haltestelle Hst\_1 mit der Haltestelle Hst\_2. Die erste Teilverbindung fährt zur Minute 360, d.h. um 6.00 Uhr ab, und kommt zur Minute 390 an. Die zweite Teilverbindung fährt 40 Minuten später. Beide Teilverbindungen benutzen die erste Linie der Linienliste, das ist die Linie Bus 1. Nach diesem Schema werden für alle 8 Knoten des Beispielnetzes die Nachfolge-Teilverbindungen erstellt.

Liste der Teilverbindungen								Erläuterung				
Nr	K1	ab	K2	an	LNr	FNr	Lge	von	ab	nach	an	mit
1	1	0	5	5	0	0	500	Zelle 10		Hst_1	5 min Gehzeit	zu Fuß
2	2	0	6	5	0	0	500	Zelle 20		Hst_2	5 min Gehzeit	zu Fuß
3	3	0	7	5	0	0	500	Zelle 30		Hst_3	5 min Gehzeit	zu Fuß
4	4	0	8	5	0	0	500	Zelle 40		Hst_4	5 min Gehzeit	zu Fuß
5	5	0	1	5	0	0	500	Hst_1		Zelle 10	5 min Gehzeit	zu Fuß
6	5	360	6	390	1	1	20000	Hst_1	ab 6.00	Hst_2	an 6.30	Bus 1
7	5	400	6	430	1	2	20000	Hst_1	ab 6.40	Hst_2	an 7.10	Bus 1
8	6	0	2	5	0	0	500	Hst_2		Zelle 20	5 min Gehzeit	zu Fuß
9	6	360	5	390	1	-1	20000	Hst_2	ab 6.00	Hst_1	an 6.30	Bus 1
10	6	400	5	430	1	-2	20000	Hst_2	ab 6.40	Hst_1	an 7.10	Bus 1
11	6	400	7	410	2	1	5000	Hst_2	ab 6.40	Hst_3	an 6.50	Bus 2
12	6	400	8	435	2	1	25000	Hst_2	ab 6.40	Hst_4	an 7.15	Bus 2
13	6	396	7	406	3	1	5000	Hst_2	ab 6.36	Hst_3	an 6.46	Bus 3
14	6	436	7	446	3	2	5000	Hst_2	ab 7.16	Hst_3	an 7.26	Bus 3
15	6	396	8	436	3	1	25000	Hst_2	ab 6.36	Hst_4	an 7.16	Bus 3
16	6	436	8	476	3	2	25000	Hst_2	ab 7.16	Hst_4	an 7.56	Bus 3
17	7	0	3	5	0	0	500	Hst_3		Zelle 30	5 min Gehzeit	zu Fuß
18	7	410	8	435	2	1	20000	Hst_3	ab 6.50	Hst_4	an 7.15	Bus 2
19	7	385	6	395	2	-1	5000	Hst_3	ab 6.25	Hst_2	an 6.35	Bus 2
20	7	406	8	436	3	1	20000	Hst_3	ab 6.46	Hst_4	an 7.16	Bus 3
21	7	446	8	476	3	2	20000	Hst_3	ab 7.26	Hst_4	an 7.56	Bus 3
22	7	390	6	400	3	-1	5000	Hst_3	ab 6.30	Hst_2	an 6.40	Bus 3
23	7	430	6	440	3	-2	5000	Hst_3	ab 7.10	Hst_2	an 7.20	Bus 3
24	8	0	4	5	0	0	500	Hst_4		Zelle 40	5 min Gehzeit	zu Fuß
25	8	360	7	385	2	-1	20000	Hst_4	ab 6.00	Hst_3	an 6.25	Bus 2
26	8	360	6	395	2	-1	25000	Hst_4	ab 6.00	Hst_2	an 6.35	Bus 2
27	8	360	7	390	3	-1	20000	Hst_4	ab 6.00	Hst_3	an 6.30	Bus 3
28	8	400	7	430	3	-2	20000	Hst_4	ab 6.40	Hst_3	an 7.10	Bus 3
29	8	360	6	400	3	-1	25000	Hst_4	ab 6.00	Hst_2	an 6.40	Bus 3
30	8	400	6	440	3	-2	25000	Hst_4	ab 6.40	Hst_2	an 7.20	Bus 3
Nr = Nummer der Teilverbindung, Datensatznummer K1 = Anfangsknotennummer ab = Abfahrtszeitminute am Knoten K1 K2 = Endknotennummer an = Ankunftszeitminute am Knoten K2 LNr = Liniennummer FNr = Nummer der Linienfahrt (>0 Richtung, <0 Gegenrichtung) Lge = Weglänge in Metern												

Tab. 4.4: Nachfolgerliste mit allen Teilverbindungen

## Verbindung

Eine Verbindung von einer Quellzelle zu einer Zielzelle besteht aus einer Menge von Teilverbindungen. In **Abbildung 4.28** sind die Teilverbindungen für eine Verbindung von der Quellzelle 10 zur Zielzelle 20 zusammengestellt. Die Verbindung beginnt mit einem Fußweg zur Haltestelle Hst\_1. Hier wird in die Linie Bus 1 eingestiegen. Die Linie Bus 1 führt zur Umsteigehaltestelle Hst\_2. Von hier kommt man mit der Linie Bus 2 zur Ausstiegshaltestelle Hst\_4. Ein Fußweg führt schließlich zur Zielzelle 40. Die 0. Teilverbindung stellt eine sogenannten Stutzenstrecke dar, die die Quellzelle als Endknoten enthält und die Wurzel des Verbindungsbaumes bildet. Der Endknoten einer Teilverbindung muß dabei stets mit dem Anfangsknoten der folgenden Teilverbindung übereinstimmen. Bei Teilverbindungen, die keine Fußwege sind, muß außerdem die Bedingung erfüllt sein, daß die Abfahrt der nachfolgenden Teilverbindung nach der Ankunft der vorangegangenen Teilverbindung liegt und innerhalb der vorgegebenen maximalen Umsteigewartezeit erfolgt.

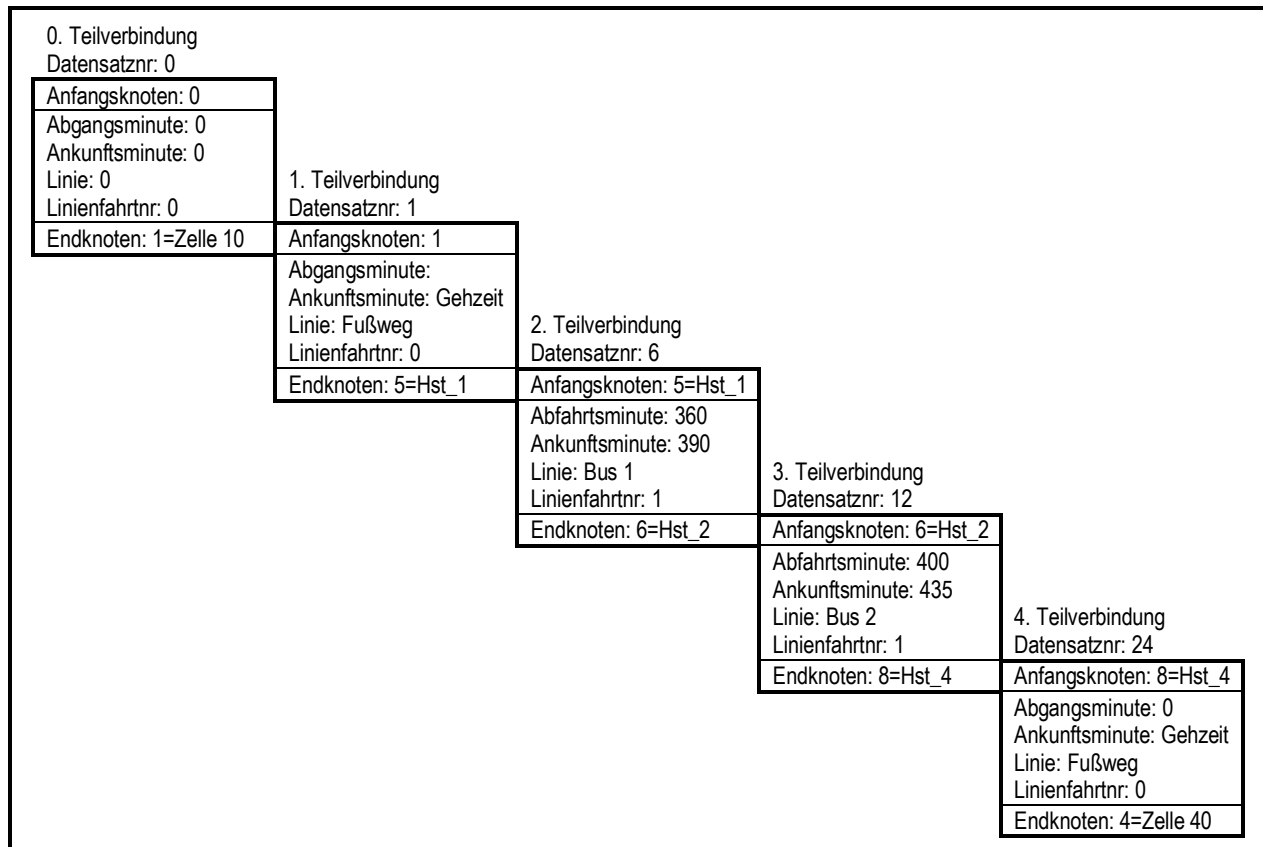
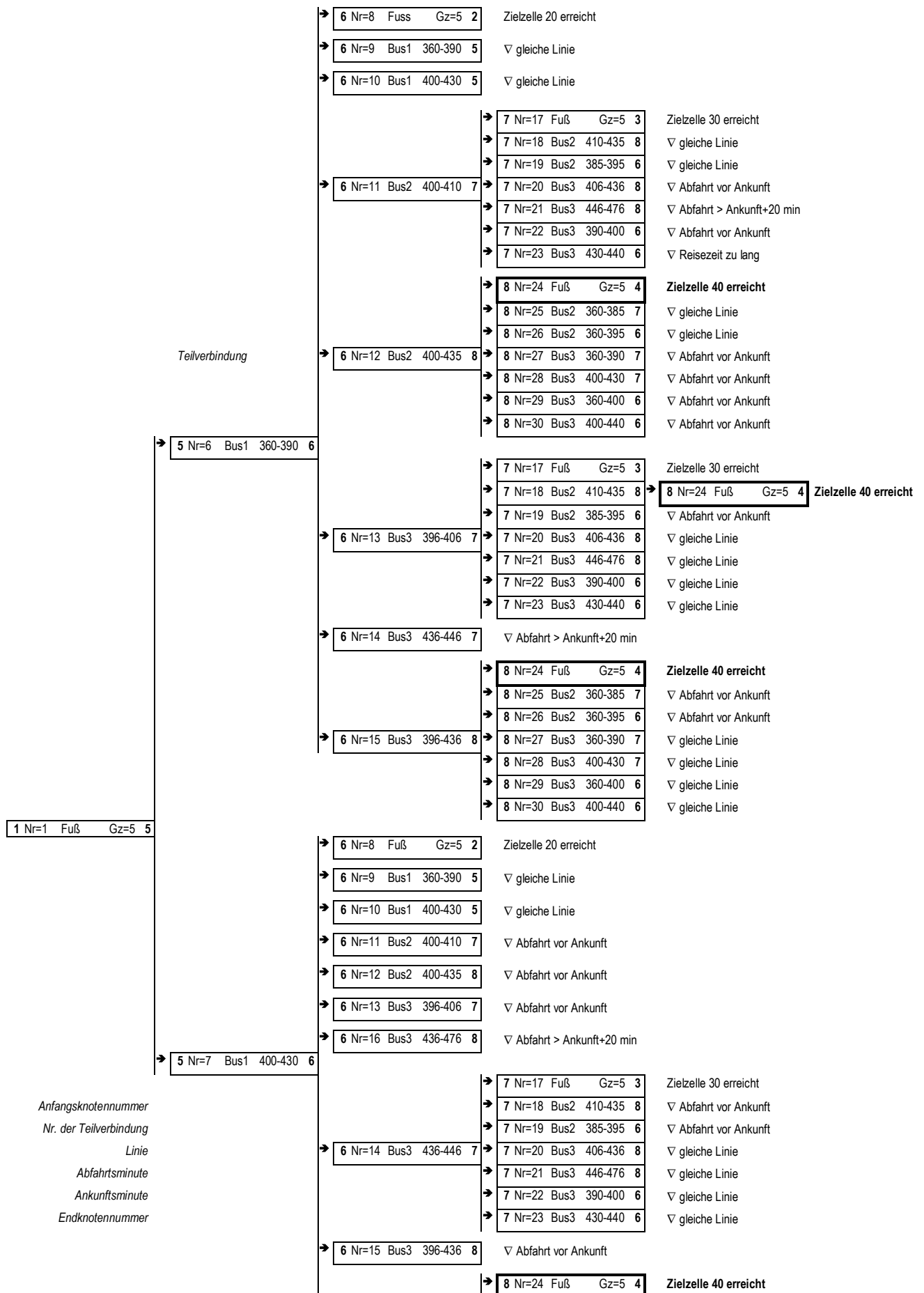


Abb. 4.28: Beispiel für eine Verbindung von Zelle 10 nach Zelle 40

## Verbindungsbaum

Der Verbindungsbaum ist das Ergebnis der Verbindungssuche. Er enthält alle Verbindungen, die von einer Quellzelle zu allen Zielzellen gefunden wurden. **Abbildung 4.29** zeigt den Verbindungsbaum, der die Verkehrszelle 10 als Wurzel hat. Die Astelemente, die die Zielzelle 40 erreichen, sind fett markiert.





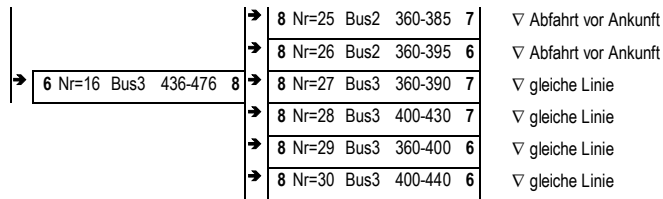


Abb. 4.29: Beispiel für einen Verbindungsbaum mit der Verkehrszelle 10 als Wurzel

### Verbindungswahl

Für die Beziehung von Zelle 10 nach Zelle 40 werden bei der Verbindungssuche im Verbindungsbaum vier Verbindungen gefunden (**Tabelle 4.5**).

Verbindung	RZ	BZ	G1	G2	UZ	HST	ab	Linie	an	HST	
1	85	75	5	5	10	Hst_1	06.00	Bus 1	06.30	Hst_2	RZ = Reisezeit BZ = Beförderungszeit G1 = Zugangszeit G2 = Abgangszeit UZ = Umsteigezeit
						Hst_2	06.40	Bus 2	07.15	Hst_4	
2	86	76	5	5	6	Hst_1	06.00	Bus 1	06.30	Hst_2	
						Hst_2	06.36	Bus 3	07.16	Hst_4	
3	86	76	5	5	6	Hst_1	06.40	Bus 1	07.10	Hst_2	
						Hst_2	07.16	Bus 3	07.56	Hst_4	
4	85	75	5	5	10	Hst_1	06.00	Bus 1	06.30	Hst_2	
						Hst_2	06.36	Bus 3	06.46	Hst_3	
						Hst_3	06.50	Bus 2	07.15	Hst_4	

Tab. 4.5: Verbindungen von Zelle 10 nach Zelle 40 vor der Verbindungswahl

In der Verbindungswahl werden die Verbindungen miteinander verglichen. Die Anwendung der Regel 2 bewirkt, daß die 4. Verbindung wegen der größeren Umsteigehäufigkeit gelöscht wird (**Tabelle 4.6**).

Anwendung von Regel 2											
	Hst_1	06.00	Bus 1	06.30	Hst_2	wird nicht gelöscht					
	Hst_2	06.40	Bus 2	07.15	Hst_4						
Obige Verbindung ist besser als nachfolgende Verbindung											
	Hst_1	06.00	Bus 1	06.30	Hst_2	wird gelöscht					
	Hst_2	06.36	Bus 3	06.46	Hst_3						
	Hst_3	06.50	Bus 2	07.15	Hst_4						

Tab. 4.6: Verbindungswahl: Anwendung von Regel 2

Bei Anwendung von Regel 3 wird auch die 2. Verbindung gelöscht, da sie verglichen mit der 1. Verbindung bei gleichzeitiger Abfahrtszeit eine spätere Ankunftszeit hat (**Tabelle 4.7**).

Anwendung von Regel 3									
	Hst_1	06.00	Bus 1	06.30	Hst_2	wird nicht gelöscht			
	Hst_2	06.40	Bus 2	07.15	Hst_4				
Obige Verbindung ist besser als nachfolgende Verbindung									
	Hst_1	06.00	Bus 1	06.30	Hst_2	wird gelöscht			
	Hst_2	06.36	Bus 3	07.16	Hst_4				

Tab. 4.7: Verbindungswahl: Anwendung von Regel 3

Nach der Verbindungswahl bleiben somit zwei Verbindungen, auf die die Fahrten verteilt werden müssen. (**Tabelle 4.8**)

RZ	BZ	G1	G2	UZ	HST	ab	Linie	an	HST	RZ = Reisezeit
79	85	5	5	10	Hst_1	06.00	Bus 1	06.30	Hst_2	BZ =
					Hst_2	06.40	Bus 2	07.15	Hst_4	Beförderungszeit
80	86	5	5	6	Hst_1	06.40	Bus 1	07.10	Hst_2	G1 = Zugangszeit
					Hst_2	07.16	Bus 3	07.56	Hst_4	G2 = Abgangszeit
										UZ = Umsteigezeit

Tab. 4.8: Verbindungen von Zelle 10 nach Zelle 40 nach der Verbindungswahl

### Verbindungssplit

Je nach Gewichtung der Kenngrößen Fahrzeit, Gehzeit, Umsteigewartezeit und Umsteigehäufigkeit und in Abhängigkeit des Nutzens einer Verbindung werden die Fahrten auf die beiden Verbindungen verteilt. Anschließend werden die Kennwerte der Verbindungen gewichtet mit ihren Verbindungsanteilen zu mittleren Kennwerten zusammengefaßt. Damit sind die benutzerbezogenen Kenngrößen für die Beziehung von Zelle 10 nach Zelle 40 ermittelt (**Tabelle 4.9**).

Von	10			nach		40	Fahrten: 100; LL= 5.1 km							
RZ	BZ	G1	G2	UH	UZ	Lge	UF	MENGE	HST	ab	Linie	an	HST	
79	85	5	5	1	10	35.2	6.9	50.0	Hst_1	06.00	Bus 1	06.30	Hst_2	
									Hst_2	06.40	Bus 2	07.15	Hst_4	
80	86	5	5	1	6	35.2	6.9	50.0	Hst_1	06.40	Bus 1	07.10	Hst_2	
									Hst_2	07.16	Bus 3	07.56	Hst_4	
mRZ= 85.5 mBZ= 75.5 mG1= 5.0 mG2= 5.0 mUH= 1.0 mUZ= 8.0 BH= 2 mLGE= 35.2														

RZ = Reisezeit [min]	mRZ = mittlere Reisezeit [min]
BZ = Beförderungszeit [min]	mBZ = mittlere Beförderungszeit [min]
G1 = Zugangszeit [min]	mG1 = mittlere Zugangszeit [min]
G2 = Abgangszeit [min]	mG2 = mittlere Abgangszeit [min]
UH = Umsteigehäufigkeit [-]	mUH = mittlere Umsteigehäufigkeit [-]
UZ = Umsteigezeit [min]	mUZ = mittlere Umsteigezeit [min]
Lge = Weglänge [km]	mLGE = mittlere Weglänge [km]
LL = Luftlinienentfernung	
UF = Umwegfaktor [-]	Menge = Zahl der Fahrten oder Prozent
BH = Bedienungshäufigkeit	

Tab. 4.9: Verbindungssplit und mittlere Kennwerte für die Beziehung von Zelle 10 nach Zelle 40

#### 4.4 Wirkungsmodell Betreiber

Das Betreibermodell enthält ein Verfahren zur Berechnung der Personal- und Fahrzeugkosten. Dabei werden Personal- und Fahrzeugkosten getrennt berechnet und abschließend addiert.

##### 4.4.1 Personalkosten

Die Personalkosten eines Fahrers ergeben sich aus dem Produkt von Arbeitszeit und Personalkosten pro Zeiteinheit. Die Arbeitszeit setzt sich dabei aus der Lenkzeit, Standzeiten und Zeiten für Vor- und Abschlußarbeiten zusammen. Die Lenkzeit kann weiter in Zeiten für das Einsetzen, Umsetzen und Aussetzen sowie für die Fahrgastbeförderung (Servicezeit) untergliedert werden. Bei der Personalkostenberechnung müssen außerdem eventuelle Zuschläge für die Nachtarbeit berücksichtigt werden. **Tabelle 4.10** zeigt die quantifizierbaren Eingangsdaten einer Personalkostenberechnung. Daneben müssen die rechtlichen Arbeitszeit- und Pausenregelungen berücksichtigt werden, die die Personalkosten beeinflussen (vgl. Kapitel 2.5.4).

Eingangsgröße	Einheit
Personalkosten für den betrachteten Tagestyp (Montag bis Samstag, Sonntag, Feiertag)	DM/Std.
Zuschlag für Nachtarbeit	Prozent
Mittlerer Zeitbedarf für einen Einsatzvorgang	Minuten pro Einsatzvorgang
Mittlerer Zeitbedarf für einen Aussetzvorgang	Minuten pro Aussetzvorgang
Zeitbedarf für Vor- und Abschlußarbeiten	Minuten pro Tag
Minimale Zeit für eine Dienstunterbrechung	Minuten
Abfahrtszeit und Ankunftszeit für jede Linienfahrt (Umsetzfahrten können wie Linienfahrten behandelt werden)	Abfahrtsminute, Ankunftsminute

**Tab. 4.10:** Eingangsdaten der Personalkostenberechnung

Die Berechnung der Personalkosten einer Linie oder einer Liniengruppe wird für jeden Dienst separat durchgeführt. Dabei wird zuerst allen Minuten eines Tages eine Tätigkeit (Freizeit, Einsatzfahrt, Linienfahrt, Dienstunterbrechung, Pause usw.) zugewiesen. In einem zweiten Schritt werden die Minuten zusammengezählt, die zur Arbeitszeit gerechnet und bezahlt werden müssen. Für die täglichen Personalkostenberechnung ergeben sich somit folgende Arbeitsschritte:

1. Alle 1440 Minuten eines Tages werden mit "Freizeit" (F) vorbesetzt.
2. Die Zeiträume, die für Service, d.h. für Linienfahrten, und für das Umsetzen erforderlich sind, werden mit der Kennung "Linienfahrt" (L) bzw. "Versetzen" (V) markiert. In diesem Arbeitsschritt kann kontrolliert werden, ob zwei gleichzeitige Linienfahrten von einem Fahrer bedient werden.
3. Ist der größte Zeitraum zwischen der Ankunft und der Abfahrt zweier aufeinanderfolgender Linienfahrten größer als die Summe aus
  - der minimalen Zeit für eine Dienstunterbrechung und

- dem Zeitbedarf für eine Aussetz- und eine Einsetzfahrt, dann handelt es sich um einen geteilten Dienst. Die Zeit der Dienstunterbrechung wird mit der Kennung "Unterbrechung" (U) markiert.
- 4. Die Zeiträume vor der ersten Linienfahrt bzw. nach der letzten Linienfahrt erhalten die Kennungen "Einsetzen" (E) und "Aussetzen" (A). Das gleiche gilt für die Aus- und Einsetzfahrten für eine Dienstunterbrechung.
- 5. Alle Zeiträume zwischen den Linienfahrten, die noch die Kennung "Freizeit" (F) haben, sind Standzeiten und werden mit der Kennung "bezahlte Pause" (B) versehen.
- 6. Eine Pausenregelung ist zu wählen und die Arbeitszeit- und Pausenregelungen sind zu überprüfen. Die Wahl der Pausenregelung ist abhängig von der Länge und der Verteilung der Standzeiten mit der Markierung "bezahlte Pause" (B). Die Pausenregelung wird wie folgt ausgewählt:
  - Gibt es eine Standzeit mit mindestens 30 Minuten Länge, dann wähle die 30-Minuten-Pausenregelung.
  - Ist die 30-Minuten-Pausenregelung nicht möglich, dann prüfe erst die 20-Minuten-Pause, dann die 15-Minuten-Pause und schließlich die Sechstelregelung.
  - Kann keine Pausenregelung gefunden werden oder ist die Arbeitszeit zu lang, dann ist der zugrunde gelegte Fahrereinsatz unzulässig.
- 7. In Abhängigkeit von der Arbeitszeit und der Pausenregelung werden mit der Kennung "bezahlte Pause" (B) markierte Zeiträume gegebenenfalls in "unbezahlte Pause" (P) umgewandelt.
- 8. Die Personalkosten eines Fahrers ergeben sich aus den mit "Einsetzen", "Aussetzen", "Versetzen", "Linienfahrt" und "bezahlte Pause" markierten Zeiträumen und dem Zeitbedarf für Vor- und Abschlußarbeiten. Zeiträume, die einen Lohnzuschlag erfordern, müssen dabei gesondert addiert werden.

Um die jährlichen Personalkosten einer Linie für den betrachteten Tagestyp zu erhalten, müssen die täglichen Personalkosten mit der jährlichen Anzahl der Tage dieses Tagestyps multipliziert werden.

#### 4.4.2 Fahrzeugkosten

Zur Ermittlung der Fahrzeugkosten wird ein Berechnungsmodell eingesetzt, das von folgenden Annahmen ausgeht:

- Die Nutzungsdauer der Fahrzeuge hängt von der Fahrleistung der Fahrzeuge ab.
- Die Kapitalkosten (Fahrzeugabschreibung und Verzinsung) verteilen sich gleichmäßig über die gesamte Nutzungsdauer der Fahrzeuge.
- Eine Förderung der Fahrzeuganschaffung reduziert die Kosten aus Fahrzeugabschreibung und Verzinsung in gleichem Maße, d.h. für die zukünftige Fahrzeuganschaffung wird der heutige Förderungsumfang unterstellt. Diese Annahme ist für eine Angebotsplanung gerechtfertigt, da hier die Kosten des heutigen Zustandes und des Planungsfalls aus Vergleichsbarkeitsgründen für das gleiche Bezugsjahr ermittelt werden müssen. Eine

veränderte Förderung würde auch die künftigen Betriebskosten bei einem gleichbleibenden ÖPNV-Angebot beeinflussen.

Unter diesen Annahmen setzen sich die Fahrzeugkosten einer Linie oder einer Liniengruppe zusammen aus

- den fixen Kosten (abhängig von der Fahrzeuganzahl),
- den laufleistungsabhängigen Kosten (abhängig von den Fahrzeugkilometern) und
- den Kapitalkosten (abhängig von der Fahrzeuganzahl und den Fahrzeugkilometern).

Bei der Fahrzeugkostenberechnung werden diese drei Kostenarten getrennt ermittelt und dann zusammengerechnet. **Tabelle 4.11** zeigt die für die Ermittlung der Fahrzeugkosten erforderlichen Eingangsdaten. Bei den Fahrzeugkilometern wird dabei unterschieden zwischen den Kilometern für Ein- und Aussetzfahrten und für Fahrgastbeförderung (Servicekilometer).

Eingangsgröße	erforderlich für	Bezeichnung	Einheit
Zahl der Fahrzeuge	Fixkosten, Kapitalkosten	n	Busse
Mittlere Länge einer Einsetzfahrt	Fzgkilometer	$L_{geEin}$	Km pro Einsetzfahrt
Mittlere Länge einer Aussetzfahrt	Fzgkilometer	$L_{geAus}$	Km pro Aussetzfahrt
Zahl der Einsetzfahrten	Fzgkilometer	$m_{Ein}$	Einsetzfahrt
Zahl der Aussetzfahrten	Fzgkilometer	$m_{Aus}$	Aussetzfahrt
Länge jeder Linien- bzw. Umsetzfahrt	Fzgkilometer	$L_{Fahrt(i)}$	Kilometer
Fixe Kosten (Versicherung, Steuern, Reinigung, Betriebshof, Management)	Fixkosten	$k_{Fix}$	DM/Jahr/Fahrzeug
Kraftstoffkosten	laufl.abhängige	$k_{Stoff}$	DM/100 km
Reparatur- und Wartungskosten	Kosten	$k_{Rep}$	DM/100 km
Kaufpreis eines Fahrzeuges	Kapitalkosten	$P_{Kauf}$	DM/Fahrzeug
Restwert (Wiederverkaufswert)	Kapitalkosten	$P_{Rest}$	DM/Fahrzeug
Zinssatz für Kapitalverzinsung	Kapitalkosten	p	Prozent
Förderung der Fahrzeuganschaffung bezogen auf die Anschaffungskosten	Kapitalkosten	f	Prozent
maximale Laufleistung	Kapitalkosten	$LL_{Max}$	Kilometer
maximale Nutzungsdauer eines Fahrzeuges	Kapitalkosten	$ND_{Max}$	Jahre
Erforderliche Fahrzeugreserve	Fixkosten, Kapitalkosten	r	Prozent
Zahl der Tage, an denen das Fahrzeug eingesetzt wird	gesamte Fahrzeugkosten	Tage	Tage/Jahr
Anteil der Fahrzeugkilometer der untersuchten Liniengruppe an den gesamten Kilometern der eingesetzten Fahrzeuge	gesamte Fahrzeugkosten	a	-

Tab. 4.11: Eingangsdaten der Fahrzeugkostenberechnung

Die Berechnung der jährlichen Fahrzeugkosten einer Linie oder Liniengruppe unterteilt sich in folgende Arbeitsschritte:

1. Berechnung der jährlichen *fixen Fahrzeugkosten*. Dabei müssen die Kosten für die Reservefahrzeuge berücksichtigt werden.

$$K_{\text{Fix}} = k_{\text{Fix}} \times n \times (1 + r/100) \quad [\text{DM/Jahr}]$$

2. Berechnung der jährlichen *Fahrzeugkilometer* (Fahrleistung). Sie setzen sich aus den Fahrzeugkilometern für Ein- und Aussetzfahrten und für die Fahrgastbeförderung (Servicekilometer) zusammen. Die täglichen Fahrzeugkilometer werden auf das Jahr hochgerechnet und um den Anteil der Fahrzeugkilometer aus sonstigen Fahrten erhöht.

- Ein- und Aussetzkilometer:

$$\text{Fzgkm}_{\text{Ein,Aus}} = m_{\text{Ein}} \times \text{Lge}_{\text{Ein}} + m_{\text{Aus}} \times \text{Lge}_{\text{Aus}} \quad [\text{km/Tag}]$$

- Servicekilometer:

$$\text{Fzgkm}_{\text{Service}} = \sum \text{L}_{\text{Fahrt}(i)} \quad [\text{km/Tag}]$$

- Fahrzeugkilometer:

$$\text{Fzgkm}_{\text{Ges}} = [\text{Fzgkm}_{\text{Ein,Aus}} + \text{Fzgkm}_{\text{Service}}] \times \text{Tage} \times 1/a \quad [\text{km/Jahr}]$$

3. Die *laufleistungsabhängigen Kosten* ergeben sich aus dem Produkt von Fahrzeugkilometern mit den Kraftstoff- und Reparaturkosten.

$$K_{\text{Lauf}} = [k_{\text{Stoff}} + k_{\text{Rep}}] \times \text{Fzgkm}_{\text{Ges}} / 100 \quad [\text{DM/Jahr}]$$

4. Die *Nutzungsdauer* ND der Fahrzeuge hängt von der maximalen Laufleistung  $\text{LL}_{\text{Max}}$  und der jährlichen Fahrleistung  $\text{Fzgkm}_{\text{Ges}}$  ab. Bei einer niedrigen Fahrleistung müssen die Fahrzeuge, ohne die maximale Laufleistung erreicht zu haben, nach der maximalen Nutzungsdauer  $\text{ND}_{\text{Max}}$  abgeschrieben werden. Die Nutzungsdauer ND entspricht der Abschreibungsdauer der Fahrzeuge. Bei der Ermittlung der Nutzungsdauer wird davon ausgegangen, daß die Fahrzeuge einer Liniengruppe über das Jahr gleichmäßig eingesetzt werden.

$$\text{ND} = \text{MIN} [\text{ND}_{\text{Max}}, \text{LL}_{\text{Max}}/\text{Fzgkm}_{\text{Ges}}] \quad [\text{Jahre}]$$

5. Die erforderliche *Kreditsumme* KS ergibt sich aus dem Kaufpreis für ein Fahrzeug und dem Restwert des alten Fahrzeuges. Die Kreditsumme reduziert sich, wenn die Fahrzeuganschaffung durch Zuschüsse gefördert wird.

$$\text{KS} = [\text{P}_{\text{Kauf}} - \text{P}_{\text{Rest}}] \times [1 - f/100] \quad [\text{DM}]$$



6. Die jährlichen *Kapitalkosten*  $K_{\text{Kapital}}$  sind abhängig von der Kreditsumme  $KS$ , dem Zinssatz  $p$ , der Abschreibungsdauer  $ND$  und der Zahl  $n$  der eingesetzten Fahrzeuge. Die Kapitalkosten müssen um die anteiligen Kapitalkosten für Reservefahrzeuge erhöht werden.

$$K_{\text{Kapital}} = \left( \frac{KS \times q^{ND} \times (q - 1)}{q^{ND} - 1} \right) \times n \times (1 + r/100) \quad [\text{DM}]$$


---

mit  $q = 1 + p/100$

7. Die jährlichen *Gesamtkosten* der Linie/Liniengruppe ergeben sich aus der Addition der fixen Kosten, der laufleistungsabhängigen Kosten und der Kapitalkosten. Die Gesamtkosten werden mit dem Faktor  $a$  abgemindert, wenn die Fahrzeuge für sonstige Fahrten außerhalb der Linie/Liniengruppe eingesetzt werden.

$$K_{\text{FZG}} = [K_{\text{Fix}} + K_{\text{Lauf}} + K_{\text{Kapital}}] \times a \quad [\text{DM/Jahr}]$$

Mit diesem Kostenmodell steht für die weitere Arbeit, d.h. für das nachfolgende Modell zur Fahrereinsatzoptimierung, ein Rechenablauf zur Verfügung, der es ermöglicht, die betrieblichen und finanziellen Wirkungen für einen gegebenen Fahrer- und Fahrzeugeinsatzplan zu ermitteln.

## Einnahmen

Einnahmen sind abhängig von der Verkehrsnachfrage (Quelle, Ziel, Menge), von den Fahrpreisen (haltestellenbezogene Fahrkostenmatrix) und dem benutzten Fahrkartentyp. Eine Einnahmeberechnung ist direkt abhängig von der Genauigkeit der Verkehrsnachfragewerte. Sie kann sinnvollerweise nur dann durchgeführt werden, wenn die Nachfrage hinreichend genau bekannt ist. Eine Ableitung der Einnahmen aus den Personenkilometern und einem mittleren Kilometerfahrpreis ergibt keine zuverlässigen Ergebnisse. So würden beispielsweise zusätzliche Personenkilometer durch Umwegfahrten die Einnahmen rechnerisch erhöhen, während eine verbesserte Direktheit zu rechnerischen Einnahmeverlusten führen würde.

## 4.5 Modell zur Fahrereinsatzplanung

### 4.5.1 Optimierungsproblem

Bei der Fahrereinsatzplanung werden Dienste gebildet, d.h. jeder einzelnen Linienfahrt einer vorgegebenen Menge von Linienfahrten wird über eine Dienstnummer ein Fahrer zugeordnet. Die Zuordnung soll so erfolgen, daß sich minimale Personalkosten ergeben.

Zu Beginn der Optimierung ist weder die Zahl der Dienste bzw. Fahrer noch die Zuordnung zu den Linienfahrten bekannt. Die Zahl der Linienfahrt, die jeweils durch die Angabe

- der Anfangshaltestelle,
- der Endhaltestelle,
- der Abfahrtsminute und
- der Ankunftsminute

genau definiert sind, ist dagegen vorgegeben. Ziel der Optimierung ist es, aus einer Lösungsmenge die Lösung zu finden, die eine zulässige Lösung darstellt und die minimalen Kosten verursacht. **Tabelle 4.12** zeigt für ein Beispiel vier mögliche Lösungen L1 bis L4 für die Zuordnung von Fahrern zu einem vorgegebenen Fahrtenangebot. Lösung L1 setzt für jede Linienfahrt einen eigenen Fahrer ein. Weil jeder Fahrer Einsatz- und Aussetzzeiten braucht, verursacht diese Lösung hohe Personalkosten. Rechentechnisch ergeben sich die höchsten Kosten jedoch bei der Lösung L4, da diese Lösung nicht zulässig ist. Bei der Fahrereinsatzplanung können zwei Gründe für die Unzulässigkeit einer Lösung unterschieden werden:

1. Ein Fahrer müßte zwei Linienfahrten bedienen, die sich zeitlich überschneiden.
2. Die gesetzlichen Regelungen zur Arbeitszeit und Lenkzeit werden nicht eingehalten.

Linien- fahrtnr.	Anfangs- haltestelle	Abfahrtsminute	Endhaltestelle	Ankunftsminute	Dienstnummer			
					L1	L2	L3	L4
1	HST1	6.00 = 360 min	HST2	6.50 = 410 min	1	1	1	1
2	HST1	7.00 = 420 min	HST2	7.50 = 470 min	2	2	2	1
3	HST1	8.00 = 480 min	HST2	8.50 = 530 min	3	3	1	1
4	HST1	9.00 = 540 min	HST2	9.50 = 590 min	4	1	2	1
5	HST2	6.00 = 360 min	HST1	6.50 = 410 min	5	2	2	1
6	HST2	7.00 = 420 min	HST1	7.50 = 470 min	6	3	1	1
7	HST2	8.00 = 480 min	HST1	8.50 = 530 min	7	1	2	1
Personalkosten:					460	400	330	unzul.

Tab. 4.12: mögliche Lösungen L1 bis L4 einer Einsatzplanung und ihre Kosten

### 4.5.2 Entscheidungsbaum

Die vollständige Lösungsmenge für das Problem der Fahrereinsatzplanung kann wie in **Abbildung 4.30** als Baum dargestellt werden. Jeder Weg des Baumes von der Wurzel stellt eine mögliche Lösung dar, für die die Zulässigkeit jedoch erst überprüft werden muß. Ist die Zahl  $F$  der Fahrer bekannt, dann führt die vollständige Zerlegung bei  $n$  Linienfahrten zu  $F^n$  Lösungen. Der Entscheidungsbaum visualisiert die Struktur des Problems.

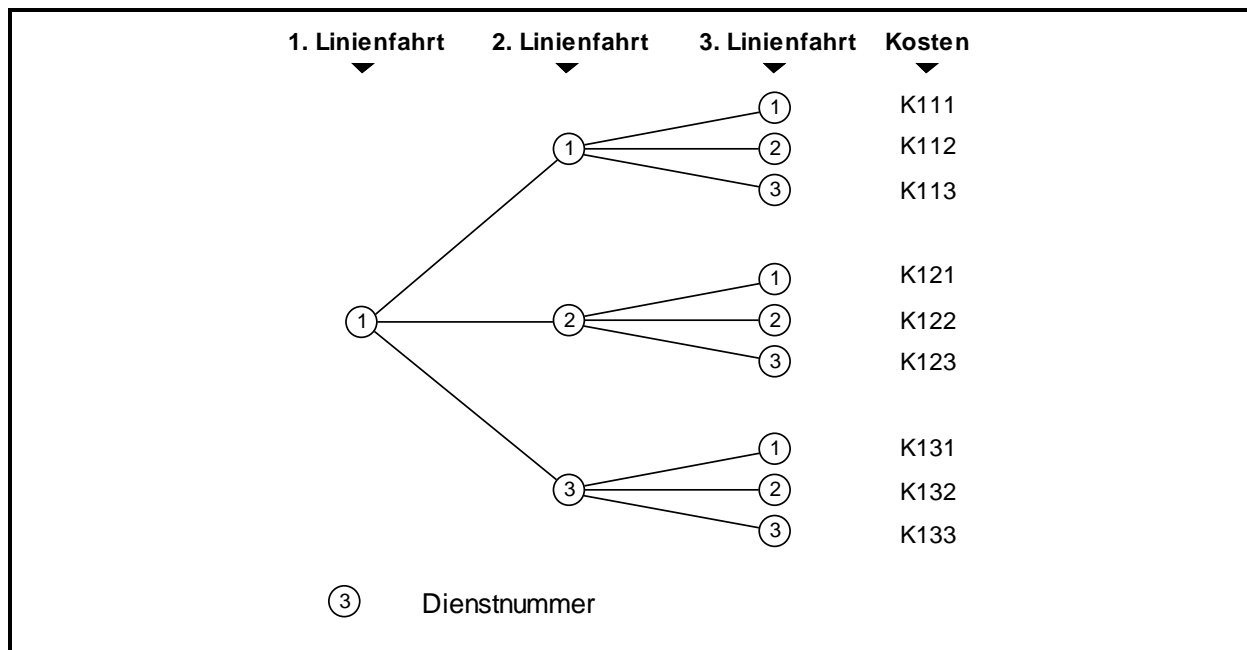


Abb. 4.30: Entscheidungsbaum

Prinzipiell wäre es möglich, die Zulässigkeit und die Kosten für jede mögliche Lösung zu ermitteln und so den Pfad mit der optimalen Lösung zu bestimmen (vollständige Enumeration). Dieser aufwendige Prozeß kann durch Entscheidungsbaumverfahren abgekürzt werden. Ziel der Verfahren ist es, durch Absuchen eines möglichst kleinen Teiles des Entscheidungsbaumes, die optimale Lösung zu finden (ZIMMERMANN, 1992). Dabei werden jeweils diejenigen Äste des Entscheidungsbaumes von der weiteren Berechnung ausgeschlossen, die Randbedingungen verletzen und deren Bearbeitung nur zu unzulässigen Lösungen führen würde. Werden bei dem Suchverfahren zur Reduktion des Aufwandes jedoch Bereiche, die potentiellen Lösungen enthalten, ausgeschlossen, dann entfällt die Garantie, daß die Optimallösung gefunden wird. In diesem Fall wird das Verfahren heuristisch genannt.

#### 4.5.3 Nachfolgerliste

Um einen Entscheidungsbaum aufbauen zu können, werden in einem ersten Schritt die Linienfahrten nach der Abfahrtszeit sortiert, eine Knotenliste und eine Nachfolgerliste erstellt. Beim Aufbau der Knotenliste wird jedem Linienfahrtojekt ein Anfangsknoten und ein Endknoten zugewiesen. Jeder Knoten hat dabei die Merkmale Haltestelle und Minute der Abfahrt bzw. Ankunft. Zusätzlich wird ein Startknoten 0.00 Uhr und ein Zielknoten 24.00 Uhr erzeugt. Anschließend wird eine Nachfolgerliste aufgebaut, die als Nachfolger für jeden Endknoten die Anfangsknoten aller zulässigen Linienfahrten enthält (**Abbildung 4.31**). Eine Linienfahrt bzw. ihr Anfangsknoten ist dann ein zulässiger Nachfolger, wenn

- die Haltestelle des betrachteten Endknotens mit der Haltestelle des Anfangsknotens der Linienfahrt übereinstimmt und
- die Ankunftszeit am betrachteten Endknoten vor der Abfahrtszeit am Anfangsknoten der Linienfahrt liegt.

Außerdem hat jeder Endknoten den Zielknoten zum Nachfolger.

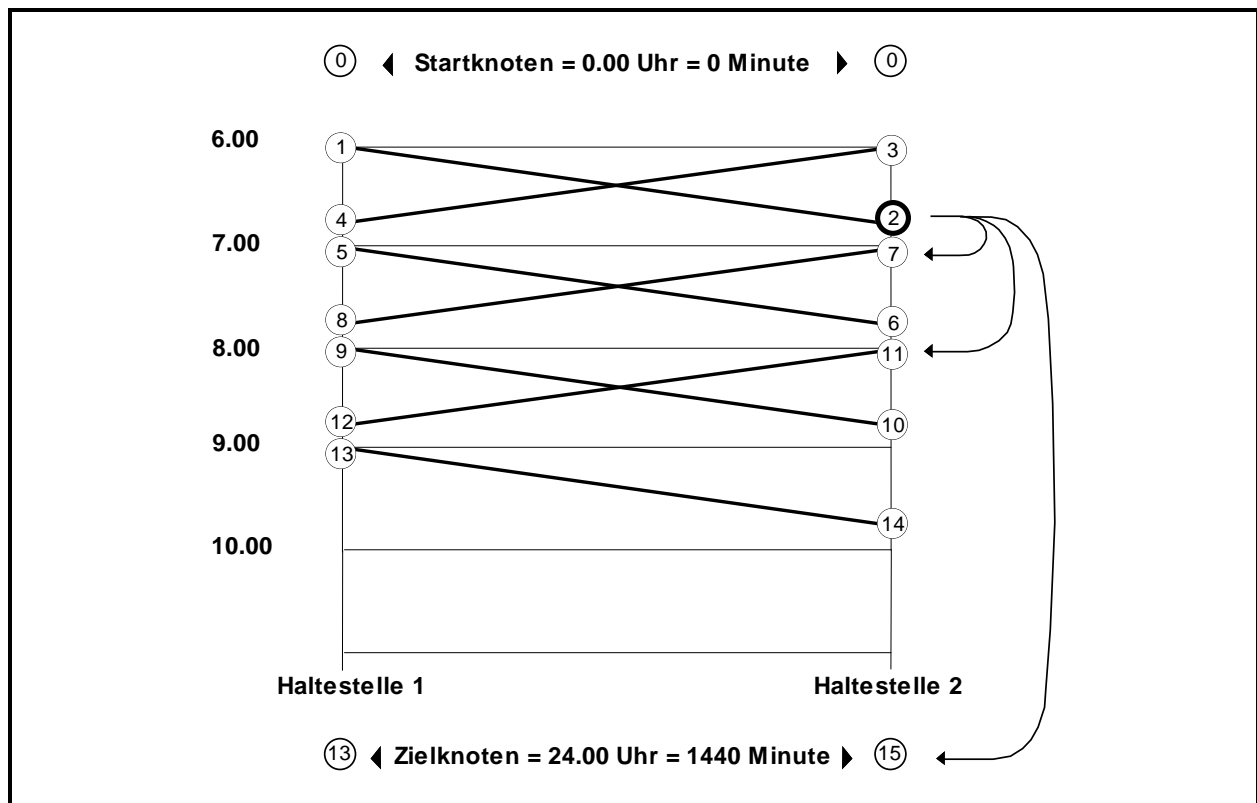


Abb. 4.31: Linienfahrten, ihre Knoten, und zulässige Nachfolger des 2. Knotens

Mit dieser Vorgehensweise wird die Randbedingung, daß ein Fahrer nicht gleichzeitig zwei Linienfahrten bedienen kann, bereits beim Aufbau der Nachfolgerliste berücksichtigt. **Abbildung 4.32** zeigt den Ablauf zur Erstellung einer Knoten- und Nachfolgerliste. Mit einem modifizierten Algorithmus können beim Aufbau der Nachfolgerliste weitere Randbedingungen beachtet werden. Um z.B. Umsetzvorgänge zwischen zwei Haltestellen zu ermöglichen, können die Anfangsknoten der Linienfahrten als Nachfolger zugelassen werden, deren Abfahrtsstation und Abfahrtszeit innerhalb einer vorgegebenen Umsetzzeit erreichbar sind. Das ist dann gegeben, wenn gilt:

$$M_A \geq M_E + U$$

mit

$M_A$  Abfahrtsminute am Anfangsknoten der nächsten Linienfahrt

$M_E$  Ankunftsminute am betrachteten Endknoten

$U$  Umsetzzeit von der Haltestelle des Endknotens zur Haltestelle des Anfangsknotens

---

**Erstellen einer Knoten- und Nachfolgerliste**

---

Sortiere Linienfahrtsobjekte nach der Abfahrtszeit

BEGIN Erstellen einer Knotenliste

Erzeuge 0. Startknoten (Minute := 0.00 Uhr, Haltestelle := "Betriebshof")

Erzeuge für jedes Linienfahrtsobjekt

- einen Anfangsknoten (Minute := Abfahrtsminute, Haltestelle := Anfangshaltestelle)
- einen Endknoten (Minute := Ankunftsminute und Haltestelle := Endhaltestelle)

Erzeuge einen Zielknoten (Minute := 24.00 Uhr und Haltestelle := "Betriebshof")

END Erstellen einer Knotenliste

BEGIN Erstellen einer Nachfolgerliste

BEGIN Suchen aller Nachfolger für den Startknoten und die Endknoten aller Linienfahrten

BEGIN Bearbeite alle Anfangsknoten j

IF Knoten[i]Haltestelle = Knoten[j]Haltestelle

AND Knoten[i]Minute  $\geq$  Knoten[j]Minute

THEN Einfügen in Nachfolgerliste

END Bearbeiten alle Anfangsknoten

END Suchen aller Nachfolger

END Erstellen einer Nachfolgerliste

---

Abb. 4.32: Algorithmus zum Aufbau einer Knoten- und Nachfolgerliste

#### 4.5.4 Optimierungsalgorithmus

Um die optimale Lösung für eine Einsatzplanung zu finden, wird die Zahl der Fahrer schrittweise erhöht. Für den ersten Fahrer werden alle Kombinationen der Linienfahrten ermittelt, die von diesem Fahrer ohne gleichzeitige Bedienung zweier Linienfahrten gefahren werden können. In **Abbildung 4.33** sind alle möglichen Kombinationen dargestellt, die der erste Fahrer bedienen kann. Jede Kombination entspricht einer Route vom Start- zum Zielknoten durch einen Graphen, der durch die Linienfahrten vorgeben ist. Um alle Routen eines Fahrers zu ermitteln, wird ausgehend vom Startknoten ein Routenbaum aufgebaut. Jeder Ast des Routenbaumes endet am Zielknoten, d.h. um 24.00 Uhr.

Nach dem Aufbau des Routenbaumes für den ersten Fahrer werden alle Routen überprüft. Wird bei einer Route die zulässige Arbeitszeit eingehalten, dann können die Personalkosten der Route bzw. des Fahrerdienstes bestimmt werden. Anschließend wird jede zulässige Route wie folgt bearbeitet:

- Die von der Route bereits bedienten Linienfahrten werden als bedient markiert.
- Mit den verbleibenden Linienfahrten werden solange weitere Routenbäume aufgebaut, d.h. zusätzliche Fahrer eingesetzt, bis schließlich jeder Linienfahrt genau ein Fahrer bzw. eine Dienstnummer zugeordnet ist.
- Die Summe der Personalkosten aller eingesetzten Fahrer ergibt dann die Kosten der gefundenen Lösung, die mit den bisherigen Kosten verglichen werden kann. Ergeben sich geringere Kosten, stellt diese Lösung die bislang beste Lösung dar.

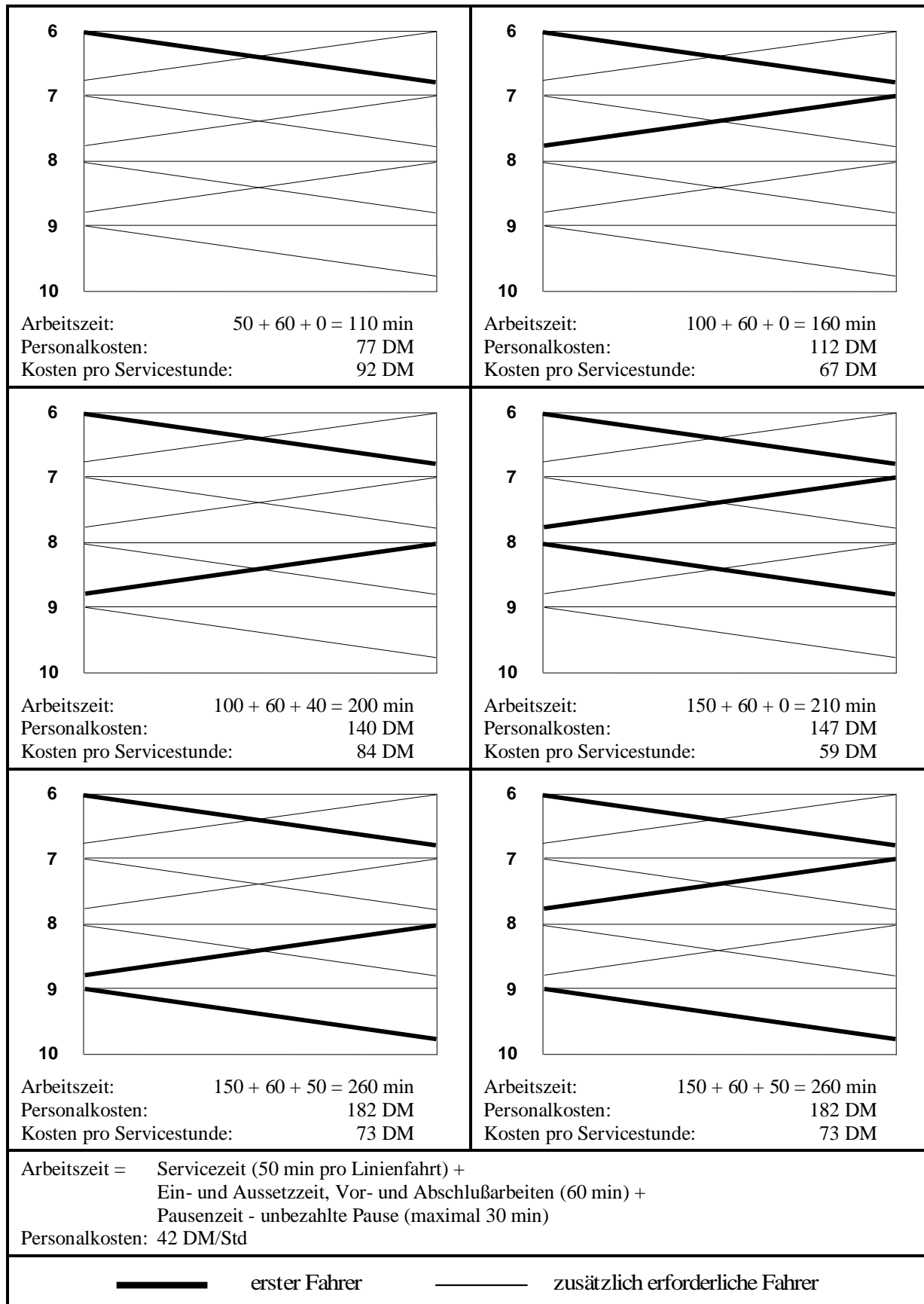


Abb. 4.33: Alle möglichen Kombinationen von Linienfahrten für ein vorgegebenes Fahrtenangebot, die der erste Fahrer bedienen kann

Die schrittweise Erhöhung der Fahrerzahl zur Erzeugung einer Lösung wird abgebrochen, wenn die aktuelle Zahl der Fahrer den minimalen Fahrerbedarf der bisher besten Lösung überschreitet oder wenn die aktuellen Personalkosten die minimalen Personalkosten der bisher besten Lösung übersteigen, obgleich noch unbediente Linienfahrten existieren. Dadurch können mögliche, aber nicht optimale Lösungen ausgeschlossen werden. **Abbildung 4.34** zeigt den Ablauf des rekursiven Suchverfahrens zur Bestimmung der optimalen Lösung.

Der Aufwand zur Lösungsfindung verringert sich deutlich, wenn das Suchverfahren die Zahl der Routen nach dem Aufbau jedes Routenbaumes reduziert. Das ist durch eine vergleichende Bewertung der einzelnen Routen möglich. Als Bewertungskriterium eignen sich dabei die auf eine Servicestunde bezogenen Personalkosten. Außerdem können bereits beim Aufbau einzelner Routenbäume nur solche Äste berücksichtigt werden, die einen befriedigenden Fahrereinsatz erwarten lassen. Diese Vorgehensweise schließt allerdings potentielle Lösungen aus, und das Suchverfahren wird heuristisch.

Das hier vorgestellten Verfahren eignet sich für die rechnergestützte Einsatzplanung innerhalb des Entwurfsprozesses, wenn nur wenige Fahrer erforderlich sind und sich somit eine kurze Rechenzeit ergibt. Das ist für eine Linie oder eine Liniengruppe im ländlichen Raum i.d.R. gewährleistet. Im Gegensatz zur üblichen Vorgehensweise wird erst der Fahrereinsatzplan und dann der Fahrzeugeinsatzplan erstellt. Diese andere Vorgehensweise begründet sich aus der Tatsache, daß die Betriebskosten vorrangig von den Personalkosten bestimmt werden. Im Anschluß an die Fahrereinsatzplanung müssen jedem Fahrer dann ein oder mehrere Fahrzeug zugeordnet werden. Unter der Annahme, daß ein Fahrer nur bei einem geteilten Dienst oder an fest definierten Haltestellen zwischen zwei Fahrzeugen wechseln kann, läßt sich diese Aufgabe verglichen mit der Fahrereinsatzplanung einfach lösen.

---

**Optimierung der Fahrereinsatzplanung**

---

```
Setze Fahrer F := 1
Setze minimale Fahrerzahl  $F_{\min}$  := sehr große Zahl
Setze Personalkosten  $K_{\min}$  := sehr große Zahl
Setze das Merkmal Fahrer (= Dienstnummer) aller Linienfahrtoobjekte := 0 (= kein Fahrer)
BEGIN ROUTINE Einfügen Fahrer F
  BEGIN Aufbau Routenbaum für Fahrer F
    Erzeuge einen Ast, dessen Astendeknoten der Startknoten (Wurzel) ist
    WHILE mindestens ein Astendeknoten des Routenbaumes  $\neq$  Zielknoten
      BEGIN Bearbeiten aller Nachfolgerfahrten des Astendeknoten
        IF Nachfolgerfahrt = nicht bedient THEN
          Einfügen des Nachfolgerfahrt in den Routenbaum
        END Bearbeiten aller Nachfolgerfahrten
      END
    END Aufbau Routenbaum für Fahrer F
  BEGIN Bearbeite alle Routen i des Routenbaumes für Fahrer F
    BEGIN Bearbeite alle Linienfahrten j
      IF Linienfahrt[j]  $\in$  Route[i] THEN Linienfahrt[j]Fahrer := F
    END Bearbeiten alle Linienfahrten
    IF  $F \geq F_{\min}$  AND Unbediente_Linienfahrten = Vorhanden THEN Abbruch Route[i]
    IF Arbeitszeit = unzulässig THEN Abbruch Route[i]
    Ermittle Personalkosten für Fahrer F
    IF Unbediente_Linienfahrten = Vorhanden THEN
      BEGIN ROUTINE Einfügen Fahrer  $F:=F+1$ 
    ELSE
      Zulässige Lösung gefunden
      IF Summe der Personalkosten  $K < \text{minimale Personalkosten } K_{\min}$  THEN
        Neue optimale Lösung gefunden
         $K_{\min} := K$ 
         $F_{\min} := F$ 
      ENDIF
    ENDIF
    Setze das Merkmal Fahrer aller Linienfahrten, die von F bedient werden := 0 (= kein Fahrer)
  END Bearbeiten aller Routen
END ROUTINE Einfügen Fahrer F
```

---

Abb. 4.34: Algorithmus zur Ermittlung der minimalen Personalkosten bei der Fahrereinsatzplanung



## 5 Anwendungsbeispiel

Für den oberbayerischen Landkreis Erding, der 40 km nordöstlich von München liegt, wird nachfolgend die Anwendung des Systemkonzeptes beispielhaft gezeigt. Der Landkreis Erding ist ländlich strukturiert und weist ausgeprägte Pendlerbeziehungen nach München auf. Am westlichen Rand des Landkreises befindet sich der 1992 eröffnete Münchner Flughafen.

### 5.1 Ausgangssituation

Ausgangsgrößen der Planung waren die räumliche Struktur des Landkreises, die Verkehrsnachfrage für die wichtigsten Fahrtzwecke, das Bahnangebot und das heutige Busangebot.

Die *räumliche Struktur des Landkreises* wird durch die Siedlungsstruktur und das Straßen- und Schienennetz beschrieben. Der Landkreis hat bei einer Fläche von 870 qkm etwa 90.000 Einwohner, die sich auf insgesamt 26 Gemeinden verteilen. Etwa die Hälfte der Einwohner wohnt in der Kreisstadt Erding und in den zentralen Orten Dorfen, Isen, Moosinning, Taufkirchen und Wartenberg. In **Abbildung 5.1** sind diese zentralen Orte des Landkreises, wichtige zentrale Orte in den Nachbarlandkreisen, die Hauptorte der Gemeinden und das Schienennetz dargestellt.

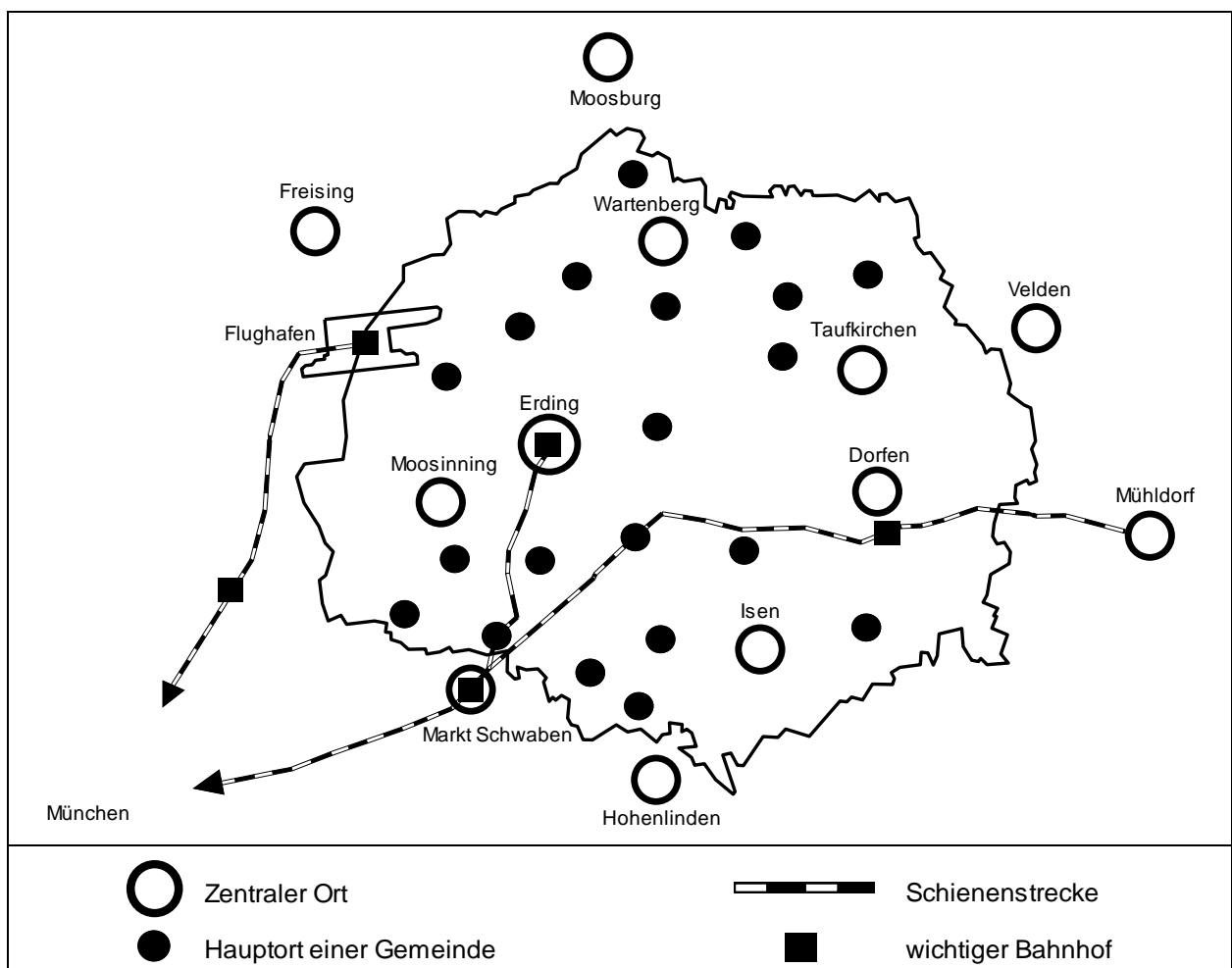


Abb. 5.1: räumliche Struktur des Landkreises Erding

Neben den Hauptorten der Gemeinden gibt es 50 weitere Orte mit mehr als 200 Einwohnern und etwa 400 Orte mit 20 bis 200 Einwohnern. Sie sind in **Abbildung 5.2** gemeinsam mit dem von Bussen befahrbaren Straßennetz dargestellt.

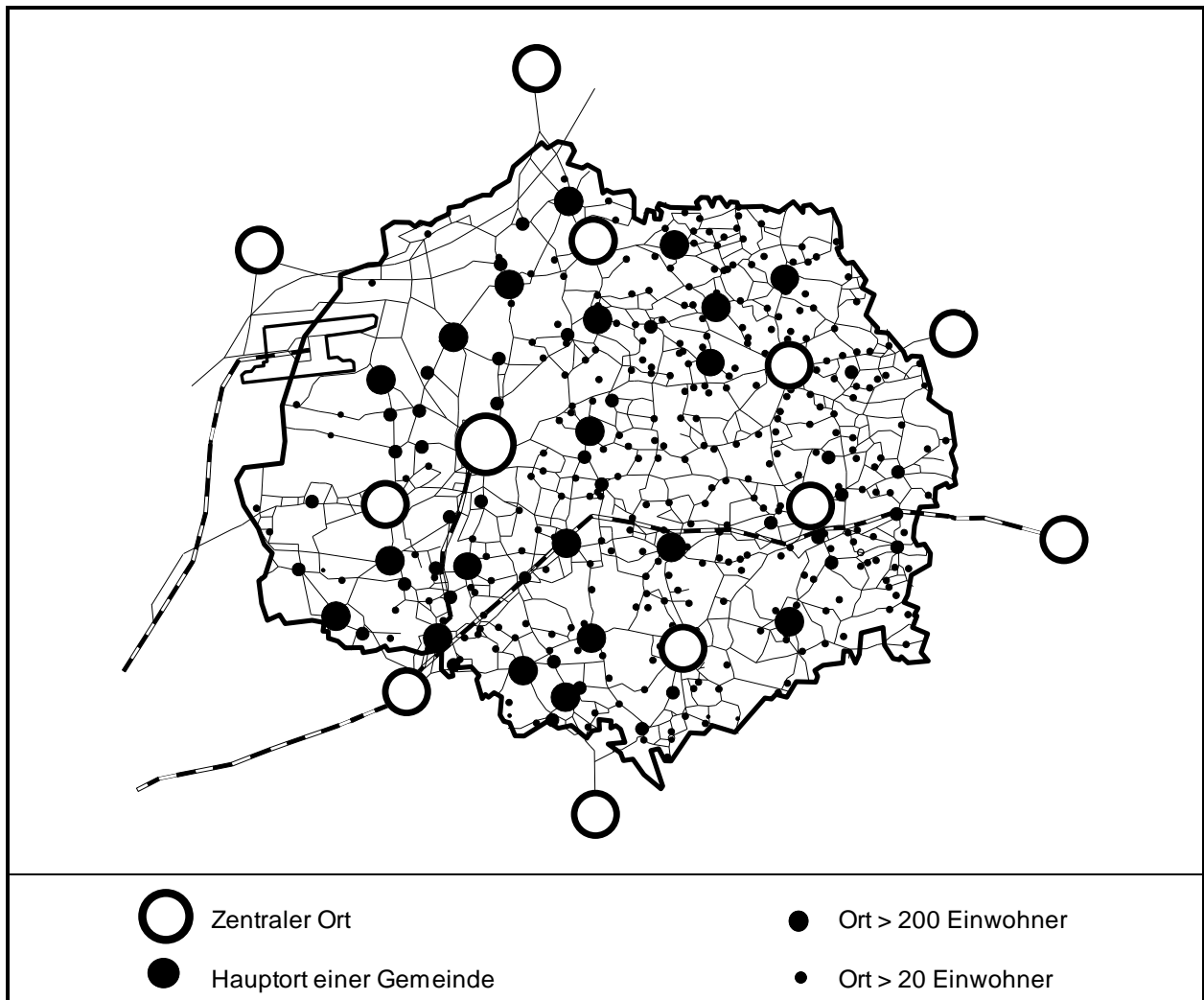


Abb. 5.2: Einwohnerschwerpunkte und Straßennetz

Die *Verkehrsnachfrage* im Berufs- und Ausbildungsverkehr ist aufgrund der Volkszählung bekannt. Die Verkehrsnachfrage im Einkaufs- und Erledigungsverkehr wurde anhand von Modellrechnungen größenordnungsmäßig abgeschätzt. Für die Verkehrsnachfrage der Fluggäste und der Flughafenbeschäftigten konnte auf vorhandene Untersuchungen zurückgegriffen werden. Auf eine Prognose der künftigen Verkehrsmittelanteile wurde verzichtet, weil die in städtischen Bereichen angewendeten Modal-Split-Modelle für den ländlichen Raum ungeeignet sind: Hier ist nicht absehbar, wie die Einwohner auf ein verbessertes, getaktetes Angebot reagieren. Außerdem ist die ÖPNV-Angebotsplanung für den ländlichen Raum mit Ausnahme des Schülerverkehrs kein Dimensionierungsproblem, sondern eine Aufgabe der Realisierung politisch vorgegebener Angebotsstandards.

Im Landkreis Erding besteht das *Bahnangebot* aus einer S-Bahnlinie und Regionalzügen. Die S-Bahn verbindet die Kreisstadt Erding mit München. Sie bietet in der Hauptverkehrszeit einen 20-Minutentakt und außerhalb der Hauptverkehrszeit einen 40-Minutentakt. Die Regionalzüge auf

der Bahnstrecke München - Dorfen - Mühldorf verkehren im 60-Minutentakt, der durch Verstärkerzüge in der Hauptverkehrszeit verdichtet wird. Die Züge beider Richtungen begegnen sich in Dorfen. Die Flughafen-S-Bahn, die den Landkreis im Westen tangiert, bietet einen ganztägigen 20-Minutentakt zum Flughafen und nach München.

Der heutige Zustand des *Busangebotes* weist folgende Mängel auf:

- Im Landkreis Erding gibt es 28 Buslinien, die von Montag bis Freitag rund 280 Fahrten pro Tag anbieten. Bei der Mehrzahl der Buslinien variieren die Linienverläufe der einzelnen Fahrten, d.h. die Fahrten befahren entweder nur Teilabschnitte der Linie oder weichen vom Linienverlauf ab. Um das Busangebot in einem Netzmodell abzubilden, mußten die 28 Linien in ca. 100 Teillinien zerlegt werden. Eine Teillinie umfaßt dabei alle Fahrten einer "Vater"-Linie (vgl. Abbildung 4.6), die die gleiche Haltestellenfolge bei etwa gleicher Fahrzeit bedienen. Auf eine Teillinie entfallen damit im Landkreis Erding durchschnittlich 2,8 Fahrten pro Tag bzw. 1,4 Fahrten pro Tag und Richtung. Das weist auf eine sehr geringe Regelmäßigkeit hin.
- Das Angebot bietet keine regelmäßigen Bedienungen an und ist i.d.R. auf die Zeiten des Berufs- und Schülerverkehrs beschränkt. Die Abfahrtszeiten sind nicht getaktet, sondern werden vom Umlauf der Fahrzeuge bestimmt.
- Die unregelmäßige Linienführung führt zu einem unübersichtlichen Fahrplan und Linienplan, da die einzelnen Fahrten einer Linie immer wieder unterschiedliche Linienwege benutzen oder nur einen Teilabschnitt bedienen.
- Umsteigemöglichkeiten zwischen zwei Buslinien sind für den Fahrgast häufig kaum erkennbar. Informationen über mögliche Anschlüsse erfordern mühsame Fahrplanstudien, so daß im Alltag nur die "erlernten" Umsteigeverbindungen, die täglich benutzt werden, zur Verfügung stehen.
- Das Busliniennetz ist nicht funktional gegliedert, d.h. es wird nicht zwischen der Erschließungsfunktion und der Verbindungsfunktion unterschieden. Folglich ergibt sich für viele Buslinien keine aus der Funktion abgeleitete Linienführung. Die Fahrzeuge müssen vom direkten Fahrweg abweichen und umwegig fahren, um die Linienhaltestellen zu erschließen.

## 5.2 Entwurf eines verbesserten Angebotes

Das für den Landkreis Erding entworfene ÖPNV-Angebot baut auf einem Systemtakt von 120-Minuten auf. Dieser Takt korrespondiert sowohl mit dem 40-Minutentakt der S-Bahn als auch mit dem 60-Minutentakt der Regionalzüge. Der im folgenden vorgestellte Planfall ist das Ergebnis eines Planungsprozesses mit einem "inneren" und einem "äußeren" Entwurfsprozeß. Im inneren Entwurfsprozeß wurden mit dem vorgestellten Entwurfsverfahren mehrere Planfälle erarbeitet. Die Wirkungen jedes Planfalls, d.h. die Angebotsqualität und die Kosten, waren dann die Entscheidungsgrundlage für den äußeren Entwurfsprozeß, in dem die politische Instanz den Planfall beurteilte. Ausgehend von einer Anfangslösung, die unter dem Vorbehalt der Finanzierbarkeit als erstrebenswertes Fernziel akzeptiert wurde, entschied sich der Erdinger Kreistag

schließlich für eine modulare Lösung. Das ÖPNV-Angebot dieses Planfalls ist so aufgebaut, daß es schrittweise verwirklicht werden kann.

### 5.2.1 Liniennetz und Bedienungshäufigkeit

**Abbildung 5.3** zeigt den Linienplan für den Landkreis Erding, das sich in zwei Teilnetze aufgliedert und an 7 Zeitknoten innerhalb und außerhalb des Landkreises ausgerichtet ist:

- Das *Verkehrsnetz 1. Grades* – im Linienplan als schwarze Linien dargestellt – besteht aus radialen Buslinien in die Kreisstadt Erding und aus tangentialen Buslinien. Die Linien verbinden die zentralen Orte des Landkreises und der Nachbarlandkreise in einem 120-Minuten Grundtakt, der in der Hauptverkehrszeit auf einen 60-Minutentakt bzw. auf die heutige Bedienungshäufigkeit verdichtet wird. Zusätzliche Linien, die nur zeitweise, d.h. in der Hauptverkehrszeit und nach Schulschluß, verkehren, sind im Linienplan gestrichelt dargestellt. Diese Linien sind entweder eigenständige Linien mit eigenen Fahrzeugen oder Linienverlängerungen, die mit den großen Fahrzeugen aus dem Netz 1. Grades früh, mittags und abends Orte "in der Fläche" bedienen. Sie werden eingesetzt, um Nachfragespitzen im Schüler- und Berufsverkehr abzudecken.
- Das *Verkehrsnetz 2. Grades* – im Linienplan als schraffierte Flächen dargestellt – erschließt das Umland der zentralen Orte mit Richtungsbändern. Während die Richtungsbänder größere Orte fest bedienen, werden kleinere Orte nur bei Bedarf angefahren. Insgesamt wohnen rund 5 % der Einwohner des Landkreises im Einzugsbereich von Bedarfshaltestellen und müssen ihre Fahrtwünsche telefonisch anmelden. Die Richtungsbänder verkehren ganztägig im 120-Minutentakt. Verstärkerfahrzeuge sind nicht erforderlich, da die Verlängerung der Linien 1. Grades das Angebot im Schüler- und Berufsverkehr verdichtet.

Die Teilnetze 1. und 2. Grades sind betrieblich so gestaltet, daß ein Betrieb allein mit dem Verkehrsnetz 1. Grades möglich ist und das Verkehrsnetz 2. Grades später ergänzt werden kann. Bei dieser Lösung werden die kleineren Orte außerhalb der Hauptverkehrsachsen nur durch die in Kapitel 2.3.4 angesprochene Verlängerung der Linien des Verkehrsnetzes 1. Grades in die Fläche angebunden. Eine Bedienung findet dabei - wie heute - nur im Schüler- und Berufsverkehr statt. Dadurch werden die Kosten für das Verkehrsnetz 2. Grades zunächst eingespart. Die Richtungsbänder des Verkehrsnetzes 2. Grades werden gemeinsam mit dem Netz 3. Grades in die Kompetenz der Gemeinden gegeben. Anstelle einer sonst notwendigen Erhöhung der Kreisumlage müssen die Gemeinden die Kosten in diesem Fall direkt tragen.

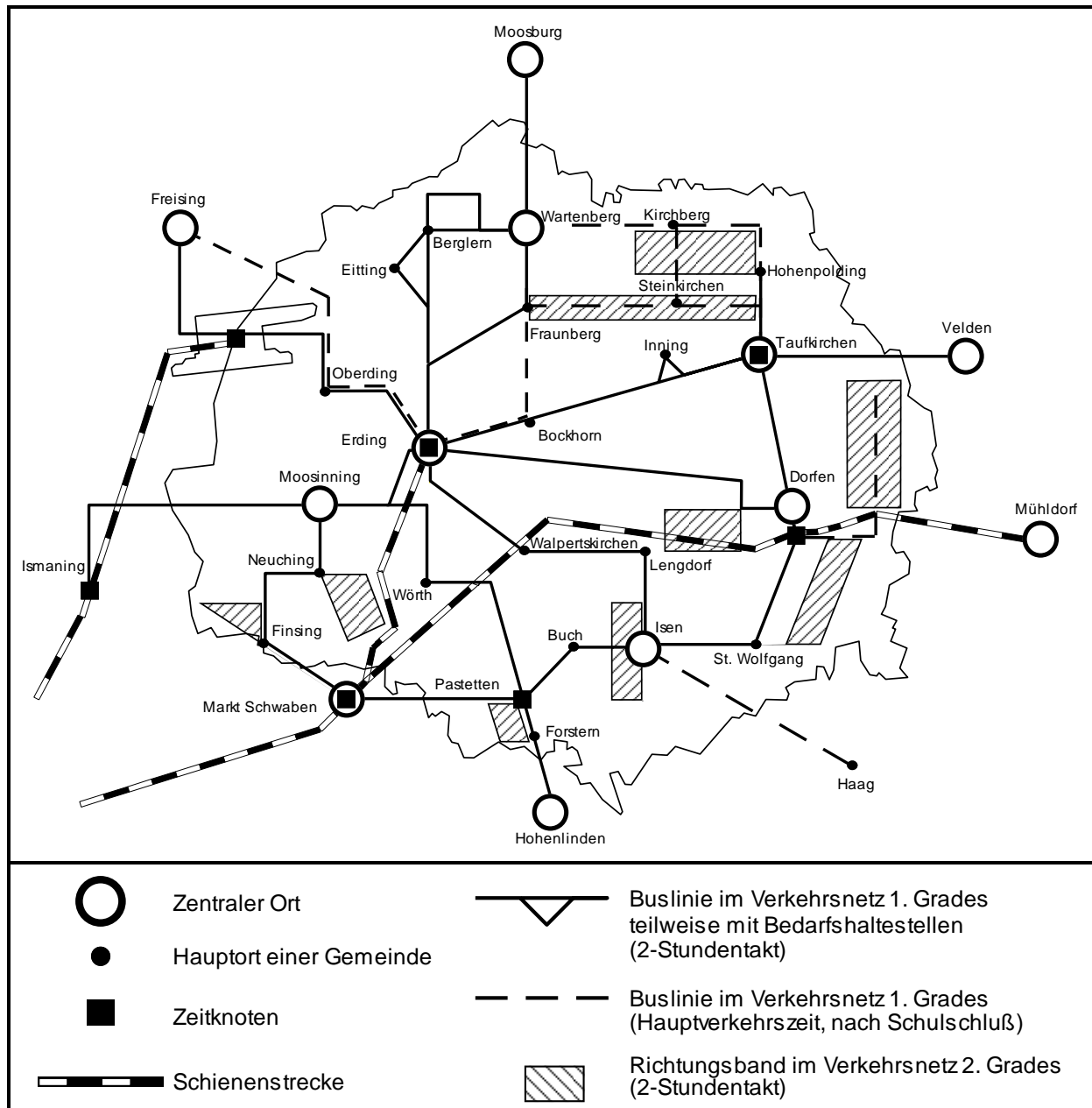


Abb. 5.3: Schematisches Liniennetz für den Landkreis Erding

### 5.2.2 Fahrplan

**Abbildung 5.4** zeigt beispielhaft einen Teil des ÖPNV-Netzes mit der Ausrichtung der Linien an den drei Zeitknoten Erding, Dorfen und Taufkirchen. Bei der Fahrplanerstellung für das geplante ÖPNV-Angebot wird neben der Anschlußsicherung an den Zeitknoten besonders darauf geachtet, daß für ausgewählte Beziehungen zu bestimmten Zeitpunkten ein Fahrtenangebot besteht. Wichtige zeitlich gebundene Verbindungen sind unter anderem:

- Busverbindungen nach Erding, die zu den Öffnungszeiten der Einzelhandelsgeschäfte in Erding ankommen.
- Busverbindungen, die in Erding nach Geschäftsschluß abfahren.
- Busverbindungen von Erding im Anschluß an die Ankunft der S-Bahn, die in München nach Geschäftsschluß abfährt.
- Busverbindungen für den integrierten Schülerverkehr nach Schulschluß.

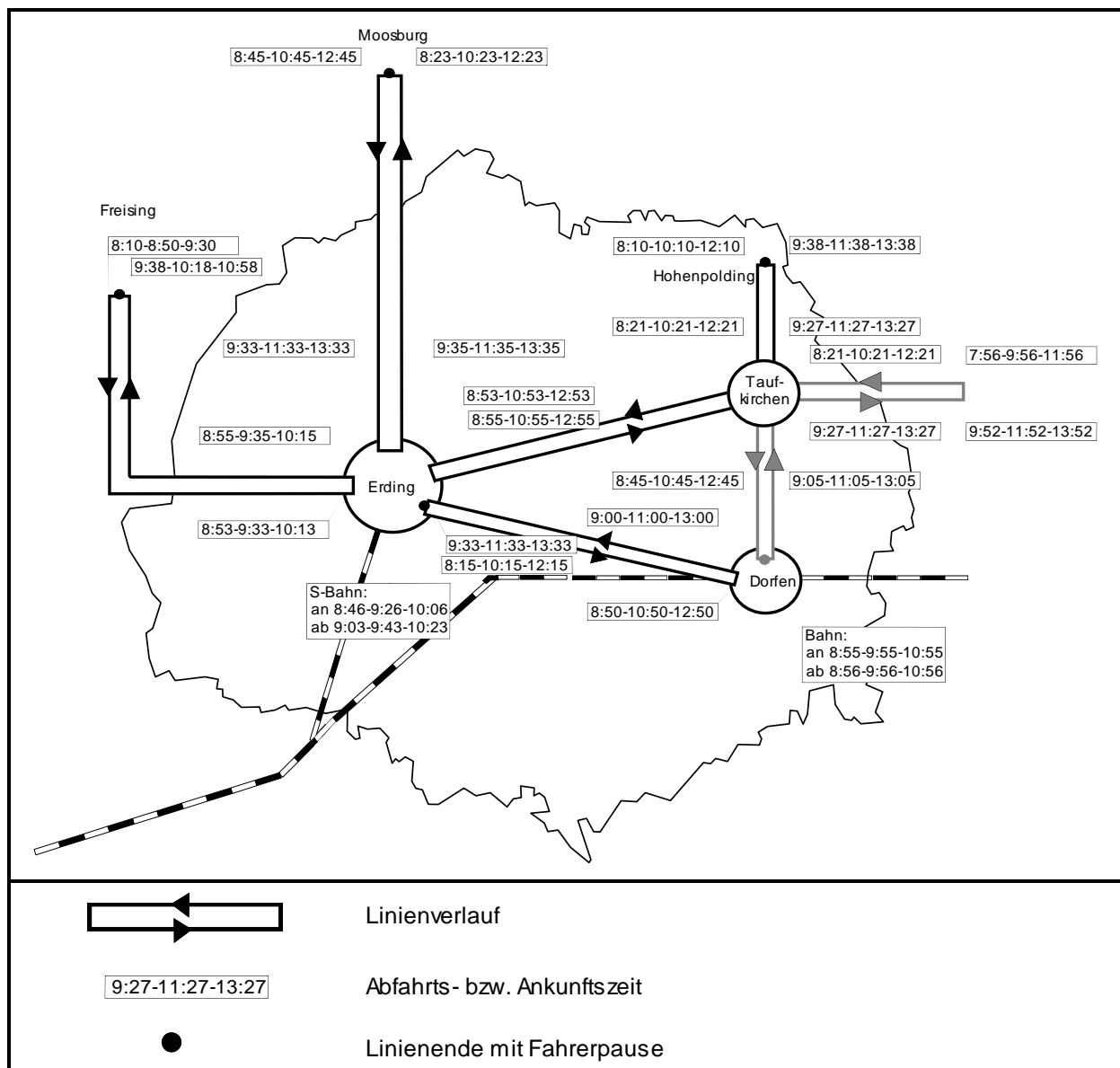


Abb. 5.4: Verknüpfung von Linien an Zeitknoten

### 5.2.3 Angebotsqualität

Die ÖPNV-Angebotsqualität wird mit Hilfe folgender Kriterien und Kenngrößen beurteilt:

- Zugänglichkeit der Haltestellen: Länge des Fußweges.
- Zeitaufwand: Luftliniengeschwindigkeit.
- Direktheit: Umsteigehäufigkeit.
- Zeitliche Verfügbarkeit: Bedienungshäufigkeit.

Die Kenngrößen jedes Kriterium werden in der Wirkungsermittlung für die Beziehungen von allen Orten und

- dem Mittelzentrum Erding,
- dem nächsten zentralen Ort und
- weiteren wichtigen Zielen (Flughafen, München, etc.)

berechnet. Dabei werden beim Grobentwurf nur die zentralen Orte berücksichtigt. Der Feinentwurf umfaßt dann alle Hauptorte der Gemeinden und der abschließende Detailentwurf überprüft alle Ortschaften mit mehr als 20 Einwohnern. Die benutzerbezogenen Kenngrößen des ÖPNV-Angebotes werden für den heutigen Zustand und den geplanten Zustand mit dem in Kapitel 4.3 beschriebenen Benutzermodell ermittelt. Einen Auszug aus der Wirkungsermittlung für eine Beziehung zeigt **Abbildung 5.5** für den heutigen Zustand und **Abbildung 5.6** für den geplanten Zustand.

Fahrplan Bus 562 Taufkirchen - Erding (heute)											
Taufkirchen	6.00	<b>6.23</b>	7.01	<b>7.24</b>	9.05	13.45	17.06				
Erding	6.32	<b>6.56</b>	7.33	<b>7.53</b>	9.34	14.14	17.38				
Fahrplan Bus 512 Erding - Flughafen (heute)											
Erding	6.14	<b>6.58</b>	<b>7.57</b>	8.57	10.14	11.34	12.51	14.52	16.09	17.09	18.09
Flughafen	6.35	<b>7.23</b>	<b>8.22</b>	9.20	10.37	11.57	13.14	15.15	16.15	17.15	18.15

Verbindungen von Taufkirchen nach Flughafen:

Taufkirchen ab	06.23	07.24
Erding an	06.56	07.53
Erding ab	06.58	07.57
Flughafen an	07.23	08.22
Reisezeit [min]	72	70
Beförderungszeit [min]	60	58
Gehzeit [min]	12	12
Umsteigehäufigkeit [-]	1	1
Umsteigewartezeit [min]	2	4
Weglänge [km]	34	32
Anteil der Personenfahrten [%]	60	40
mittlere Reisezeit [min]		71
mittlere Beförderungszeit [min]		59
mittlere Gehzeit [min]		12
mittlere Umsteigehäufigkeit [-]		1.0
mittlere Umsteigewartezeit [min]		3
mittlere Weglänge [km]		33
Bedienungshäufigkeit		2

Abb. 5.5: Fahrplan und Kenngrößen des heutigen Zustands für eine Beziehung



Fahrplan Bus 562 Taufkirchen - Erding (geplant)											
Taufkirchen	6.01	6.21	7.01	7.21	8.21	10.21	12.21	14.21	16.21	17.21	18.21
Erding	6.33	6.53	7.33	7.53	8.53	10.53	12.53	14.53	16.53	17.53	18.53
Fahrplan Bus 512 Erding - Flughafen (geplant)											
Erding	6.15	6.55	7.35	8.15	alle 40 Minuten			16.55	17.35	18.15	18.55
Flughafen	6.45	7.25	8.05	8.45				17.25	18.05	18.45	19.25

Verbindungen von Taufkirchen nach Flughafen:											
Taufkirchen ab			06.21	07.01	08.21	10.21	12.21	14.21	16.21	18.21	
Erding an			06.53	07.33	08.53	10.53	12.53	14.53	16.53	18.53	
Erding ab			06.55	07.35	08.55	10.55	12.55	14.55	16.55	18.55	
Flughafen an			07.25	08.05	09.25	10.25	12.25	14.25	16.25	18.25	
Reisezeit [min]			76	76	76	76	76	76	76	76	
Beförderungszeit [min]			64	64	64	64	64	64	64	64	
Gehzeit [min]			12	12	12	12	12	12	12	12	
Umsteigehäufigkeit [-]			1	1	1	1	1	1	1	1	
Umsteigewartezeit [min]			2	2	2	2	2	2	2	2	
Weglänge [km]			34	34	34	34	34	34	34	34	
Anteil der Personenfahrten [%]			40	30	15	5	8	2	0	0	
mittlere Reisezeit [min]			76								
mittlere Beförderungszeit [min]			64								
mittlere Gehzeit [min]			12								
mittlere Umsteigehäufigkeit [-]			1.0								
mittlere Umsteigewartezeit [min]			2								
mittlere Weglänge [km]			34								
Bedienungshäufigkeit			8								

Abb. 5.6: Kenngrößen des geplanten Zustandes für eine Beziehung

Die Verbindungen des heutigen Angebotes weisen für die Einwohner, die nicht im Einzugsbereich eines Bahnhofes wohnen, i.d.R. Mängel bei der Bedienungshäufigkeit und bei der Regelmäßigkeit auf. Durch die Einführung des 120-Minuten-Grundtaktes verbessert sich die Bedienungshäufigkeit für mehr als die Hälfte der Einwohner deutlich (**Tabelle 5.1**). Von den etwa 20.000 Einwohnern des Landkreises, die abseits der Hauptverkehrsachsen in der Fläche wohnen, wird heute die Hälfte nicht bedient. Im geplanten Zustand reduziert sich diese Zahl durch die Einführung der Richtungsbänder auf 6.000 Einwohner. Solange das Verkehrsnetz 2. Grades nicht realisiert ist, werden jedoch 2000 Einwohner mehr als heute nicht bedient. Die Kenngrößen der Kriterien Zeitaufwand und Direktheit unterscheiden sich im Gegensatz zur Bedienungshäufigkeit im heutigen und im geplanten Zustand nur geringfügig. Auf Beziehungen,

die nur im Verkehrsnetz 1. Grades verlaufen, verringert sich die durchschnittliche Reisezeit wegen der etwas direkteren Linienführung. Gleichzeitig erhöht sich die Reisezeit für Beziehungen, die von und zu Haltestellen des Verkehrsnetzes 2. Grades führen, da hier in der Normalverkehrszeit ein Zeitverlust beim Umsteigen auftritt. In der Hauptverkehrszeit und nach Schulschluß werden durch die Verlängerung der Linien 1. Grades i.d.R. direkte Verbindungen angeboten.

Fahrtenpaare	Haltestellentyp	heutiges Angebot		Planungsfall		Planungsfall	
				(Netz 1. & 2. Grades)		(nur Netz 1. Grades)	
> 10	Bahnhaltestelle	24.000 Ew	26 %	24.000 Ew	26 %	24.000 Ew	26 %
6 bis 10	Bushaltestelle (2- Stunden Grundtakt)	6.000 Ew	7 %	61.000 Ew	66 %	50.000 Ew	54 %
< 6	Bushaltestelle (früh, mittags, abends)	52.000 Ew	56 %	1.000 Ew	1 %	6.000 Ew	7 %
nicht bedient	Haltestellenentfernung > 1000 m	10.000 Ew	11 %	6.000 Ew	7 %	12.000 Ew	13 %
Summe		92.000 Ew	100 %	92.000 Ew	100 %	92.000 Ew	100 %

Tab. 5.1: Fahrtenpaare bezogen auf die Einwohnerzahl im heutigen und im geplanten Zustand

#### 5.2.4 Betrieblicher Aufwand, Kosten und Zuschußbedarf

Grundlage der Ermittlung des betrieblichen Aufwandes und der Kosten sind die Einsatzpläne, die jeweils für eine Linie oder eine Liniengruppe erstellt wurden. Werden beide Verkehrsnetze realisiert, steigen die jährlichen Fahrzeugkilometer um 50 %, was auch die Verbesserung des Angebotes ausdrückt. Die Zahl der eingesetzten Fahrzeuge bleibt dagegen insgesamt weitgehend gleich, da das Angebot vor allem in der Normalverkehrszeit verstärkt wird, sich die Zahl der Busse jedoch nach dem Bedarf in der Hauptverkehrszeit richtet. Der Steigerung der Fahrzeugkilometer steht trotz Einführung eines Taktes keine proportionale Steigerung der Kosten gegenüber. Teilweise durch den Einsatz kleinerer Fahrzeuge, teilweise durch die optimierte Fahrzeug- und Fahrereinsatzplanung und den ganztägigen Fahrzeugeinsatz wachsen die Kosten im Landkreis Erding um 35 %, während sich die Fahrzeugkilometer um 50 % erhöhen.

Der betriebliche Aufwand, die Kosten und die Einnahmen sind in der **Tabelle 5.2** zusammengestellt. Die Kosten und Einnahmen beziehen sich auf den Werktagsverkehr (Montag bis Freitag) und den Wochenendverkehr. Während der Planfall im Werktagsverkehr gegenüber dem heutigen Zustand ein verbessertes Angebot aufweist, wird unterstellt, daß das Angebot im Wochenendverkehr gleich bleibt. Die Differenz zwischen Kosten und Einnahmen ist der Zuschußbedarf, der sowohl absolut als auch in Bezug auf die Einwohner angegeben ist. Eine genaue Ermittlung der Einnahmen ist nicht möglich, weil nicht bekannt ist, wie weit ein verbessertes Angebot von der Bevölkerung angenommen wird. Um keine falschen Hoffnungen zu wecken, wird eine vorsichtige Einnahmenschätzung zugrunde gelegt.

	heutiges Angebot	Planungsfall (Netz 1. & 2. Grades)	Planungsfall (nur Netz 1. Grades)
Kilometer	1.650.000 100 %	2.500.000 150 %	2.100.000 125 %
Kosten Netz 1. Grades <sup>1)</sup>	–	6.500.000 DM	6.500.000 DM
Netz 2. Grades	–	800.000 DM	–
gesamt <sup>1)</sup>	5.400.000 DM 100%	7.300.000 DM 135 %	6.500.000 DM 120 %
Einnahmen <sup>2)</sup>	2.400.000 DM	2.700.000 DM	2.600.000 DM
Zuschußbedarf pro Einwohner	3.000.000 DM 33 DM 100 %	4.600.000 DM 51 DM 155 %	3.900.000 DM 43 DM 130 %
<sup>1)</sup> = einschließlich der Kosten von 400.000 DM für den Wochenendverkehr			
<sup>2)</sup> = Tarife, Ausgleichszahlungen für Schülerverkehr im ÖPNV, Schwerbehindertenerstattung			

Tab. 5.2: Betrieblicher Aufwand, Kosten und Einnahmen (Stand 1992)

## 6 Literatur

Ahrens, G.-A.:

Planung städtischer Verkehrsnetze - Interaktives Verfahren zur Straßennetzgestaltung  
TU Braunschweig, Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen, Heft 37, 1984

Bayerisches Gesetz- und Verordnungsblatt Nr. 33, 1993

Gesetz über den öffentlichen Personennahverkehr in Bayern (Bay ÖPNVG)

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Verkehr (Hrsg.)

Richtlinie zur Nahverkehrsplanung  
München, 1977

Blais, J.-Y.; Lamont, J.; Rousseau, J.-M.:

The HASTUS Vehicle and Manpower Scheduling System at the Societe de transport de la  
Communaute urbaine de Montreal  
Interfaces 20, Heft 1, 1990

Blennemann, F.; Brandenburg W.:

Zeit-Weg-Zusammenhänge bei der Benutzung öffentlicher Verkehrsmittel und deren  
Beurteilung durch die Fahrgäste  
Verkehr und Technik, Heft 5+6, 1977

Braun, J.:

Adaptive Ermittlung kürzester Routen in Verkehrswegenetzen  
TU München, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Verkehrswesen, Heft 15,  
1980

Braun, J.:

Information über Wegewahlverfahren und -programme  
Vortrag vor der Konferenz Leitender Kommunalen Verkehrsplaner im Deutschen Städtetag,  
1983

Burmeister, J.:

Das System Bus: Ein Multitalent  
Internationales Verkehrswesen, Heft 7+8, 1993

Daduna, J.; Göbel, H.-J.; Mojsilovic, M.:

Minimierung des Fahrzeugbedarfs durch dialog-gesteuerte Optimierung  
Der Nahverkehr, Heft 3, 1985

Dial, R. B.:

Transit Pathfinder Algorithm  
Highway Research Board, Highway Research Record 205, 1967

Fahrpersonalverordnung FPersV in der Fassung vom 22. August 1969

in: Straßenverkehrsrecht, Beck'sche Textausgaben, Stand 1993

Faust, M.:

Verhaltensorientierte Fahrplanauskunft mit dem System NADOLL  
Der Nahverkehr, Heft 6, 1993

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):

Leitfaden für Verkehrsplanungen  
Köln, 1985

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):

Richtlinien für die Anlage von Straßen, Leitfaden für die funktionale Gliederung des  
Straßennetzes  
Köln, 1988

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):

Empfehlungen zur Verbesserung der Akzeptanz des ÖPNV  
Köln, 1990

Franz, H.-D.:

Untersuchungen zur Planung von Verkehrsnetzen unter besonderer Berücksichtigung des  
öffentlichen Personennahverkehr  
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 182, Bonn 1975

Fritsche, H.; Mott, P.:

Dialogorientierte Dienstplanung und Dienstreihenfolgeplanung  
Der Nahverkehr, Heft 4, 1986

Garben, M.; Lühring, P.-D.; Theis, H.:

Empirische Untersuchungen zum Routenwahlverhalten von Fahrgästen im West-Berliner U-Bahn-Netz

Verkehr und Technik, Heft 2, 1979

Gezgin, A.; Tolle, B.:

Modul "Dienstreihenfolgenbildung" im Programmsystem HOT

Der Nahverkehr, Heft 1, 1986

Girnau, G.:

Die Perspektiven des regionalisierten ÖPNV

Der Nahverkehr, Heft 1-2, 1994

Greschner, G.:

Bedarfsgesteuerte Bussysteme

Innovative Informatikanwendungen in Transport-, Verkehrs- und Leitsystemen GmbH (INIT), Schriftenreihe, Heft 1, Karlsruhe, 1984

Günther, R.:

Untersuchung planerischer und betrieblicher Maßnahmen zur Verbesserung der Anschlußsicherung in städtischen Busnetzen

TU Berlin, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Verkehrswegebau, Heft 15, 1985

Hamburg Consult, Prognos:

Planungs- und Entscheidungshilfen zur Effizienzkontrolle der Angebotsgestaltung im ÖPNV  
Basel, Hamburg, 1986

Hamburg-Consult; IABG; Dornier; MBB; IKA; ITV:

Grundlagenuntersuchung zu flexiblen Betriebsweisen von Bussystemen  
Hamburg, 1981

Hamburg-Consult:

FABIAN - Rechnergestützte Fahrzeitbildung und Anschlußplanung im straßengebundenen ÖPNV

Firmenprospekt, ohne Jahresangabe

Heinze, G. W.; Herbst D.; Schühle, U.:

Verkehrsverhalten und verkehrsspezifische Ausstattungsniveaus in ländlichen Räumen  
Veröffentlichungen der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Abhandlungen,  
Band 78, Hannover 1980

Heinze, G. W.; Herbst D.; Schühle, U.:

Verkehr im ländlichen Raum  
Veröffentlichungen der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Abhandlungen,  
Band 82, Hannover 1982

Hensher, D.; Johnson, L.:

Applied Discrete Choice Modelling  
Croom Helm, London, 1981

Herz, R., Schlichter, H. G., Siegener, W.:

Angewandte Statistik für Verkehrs- und Regionalplaner  
Werner Verlag, 1976

Hoffmann, J.; Langenhan, A.:

MICROBUS-die komplette DV-gestützte Betriebseinsatzplanung für Verkehrsbetriebe  
Verkehr und Technik, Heft 3, 1993

Hoffmann, P.:

Flexible Bedienungsformen im ÖPNV  
Schriftenreihe für Verkehr und Technik, Band 80, Erich Schmidt Verlag, 1992

Holz S.; Hüttmann R.:

Optimierung von Anschlußzeiten  
Der Nahverkehr, Heft 4, 1987

Hüttmann, R.:

Planungsmodell zur Entwicklung von Nahverkehrsnetzen liniengebundener Verkehrsmittel  
Universität Hannover, Veröffentlichungen des Instituts für Verkehrswirtschaft,  
Straßenwesen und Städtebau, Heft 1, 1979

Institut für Verkehrswesen Karlsruhe:

Linienplanung im öffentlichen Personennahverkehr  
Institut für Verkehrswesen, Uni Karlsruhe, 1981

IVV Ingenieurgesellschaft für Verkehrsplanung und Verkehrssicherheit GmbH Braunschweig  
Firmenprospekt

Jung, V.:

Beitrag zum Modal-Split auf der Grundlage fahrzeitäquivalenter Reisezeiten im ÖPNV;  
Stellungnahme des Autors  
Verkehr und Technik, Heft 5, 1975

Keudel, W.; Kirchhoff, P.:

Rechnergestützte Liniennetzbildung und Angebotsbemessung durch DIANA  
Der Nahverkehr, Heft 1, 1985

Kirchhoff, P.:

Ausweitung des Omnibus-Linien-Betriebs durch flexible Betriebsweisen  
Der Nahverkehr, Heft 2, 1983

Kirchhoff, P.:

Verbesserungen des ÖPNV im ländlichen Raum durch planerische und technische  
Maßnahmen  
Der Nahverkehr, Heft 6, 1987

Kirchhoff, P; Holz S.:

Optimierung der Fahrzeitvorgaben für Busse und Straßenbahnen  
Der Nahverkehr, Heft 3, 1987

Kirchhoff, P.; Leutzbach, W. et al.:

Aufbereitung der Ergebnisse von Forschungsarbeiten aus dem Forschungsprogramm Stadt-  
verkehr für die Verkehrsplanung in den Gemeinden, Teil 8: Verkehr und Umwelt  
Forschungsauftrag des Bundesministers für Verkehr, 1993

Klemt, W.-D.; Sonntag, H.:

Nachfrageorientierte Netzberechnung für den öffentlichen Personennahverkehr  
RWTH Aachen, Schriftenreihe des Instituts für Stadtbauwesen, Heft 51, 1980

Klemt, W.-D.:

Untersuchungen zur Nachfrageorientierten Netzerzeugung für den öffentlichen Personen-  
nahverkehr auf der Grundlage eines Planungsinformationssystems  
TU Berlin, Fachbereich 20 (Informatik), 1978



Kloas, J; Kuhfeld, H.:

Verkehrsverhalten im Vergleich

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Heft 96, 1987

Krug, S.:

Ein interaktives Programmsystem zur Angebotsplanung für den liniengebundenen öffentlichen Personennahverkehr

TU Braunschweig, Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen, Heft 44, 1987

Lemberg, S; Schmaderer G.:

In die neue Welt - Objektorientiert programmieren mit C++, Teil 1

iX Multiuser-Multitasking-Magazin, Heft 9, Verlag Heinz Heise, Hannover, 1991

Landesverband bayerischer Omnibusunternehmer e.V.:

Manteltarifvertrag Nr. 5 für die gewerblichen Arbeitnehmer des privaten Omnibusgewerbes in Bayern, München, 1991

Lehner, F.:

Der maximale Wirkungsgrad des Personaleinsatzes

Handbuch der Verkehrswirtschaft, Alba Buchverlag GmbH+Co KG, Düsseldorf, 1978

Leuthardt, H.; Günther, B.:

Mit dem PC auf der Spur von Schwachstellen im Verkehrsbetrieb

Der Nahverkehr, Heft 3, 1989

Leuthardt, H.:

Die optimale Nutzungsdauer von Omnibussen im ÖPNV

Der Nahverkehr, Heft 3, 1991

Leuthardt, H.; Ritchel, R.:

Städtische Verkehrsbetriebe im Ost-West-Vergleich

Der Nahverkehr, Heft 7, 1992

Leuthardt, H.:

Kommunale und private Verkehrsunternehmen

Der Nahverkehr, Heft 3, 1994

Leutzbach, W.; Pampel, E.; Holz, S.; Mott, P.; Sahling B.-M.:

Verkehrs- und Betriebsplanung

Forschung Stadtverkehr, Reihe Auswertungen, Heft A3, 1987

Leutzbach, W.; Haupt, T.; Mott, P.:

Ermittlung der Verkehrsnachfrage

Forschung Stadtverkehr, Reihe Auswertungen, Heft A4, 1988

Martens, G.:

Verkehrsmittelbenutzung und Bedienungsqualitäten

TU Berlin, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Verkehrswegebau, Heft 9, 1983

Müller-Merbach, H.:

Operations Research, Methoden und Modelle der Optimalplanung

Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, 2. Auflage, 1971

Moore, E. F.:

The Shortest Path Through a Maze

The Annals of the Computation Laboratory of Harvard University 30, Harvard University Press, 1959

Mott, P.; Sparmann, U.:

Interaktive Liniennetzplanung im praktischen Einsatz

Der Nahverkehr, Heft 6, 1983

Nickel, E.:

Citybus, Quartierbus, Ortsbus

Der Nahverkehr, Heft 6, 1993

Nutzfahrzeug Katalog 93/94

Heinrich Vogel Fachzeitschriften GmbH München. 1993

Personenbeförderungsgesetz PBefG

Fassung vom 8. August 1990 in: Straßenverkehrsrecht, Beck'sche Textausgaben, Stand 1993

Neufassung ab 1. Januar 1996 in: Sonderausgabe der Neufassung des Personenbeförderungsgesetzes, Bundesverband Deutscher Omnibusunternehmer e.V., 1994

Prusa, W.:

Attraktivität des Umsteigeverkehrs

Verkehr und Technik, Heft 7, 1984

Rapp, M. H.; Mattenberger, P.; Piguet, S.; Robert-Grandpierre, A.:

Interactive Graphics System for Transit Route Optimization

Transportation Research Board, Transportation Research Record 559, 1976

Rumbaugh, J.; Blaha, M.; Premerlani, W.; Eddy, F.; Lorensen, W.:

Object-Oriented Modeling and Design

Prentice-Hall International, New Jersey, 1991

Sack, D.; Bonsack, R.:

Wie alt darf ein Omnibus werden?

Der Nahverkehr, Heft 3, 1993

Schuster, B.:

Flexible Betriebsweisen des ÖPNV im ländlichen Raum

TU München, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrs- und Stadtplanung, Heft 2, 1992

Simonis, C.:

Optimierung von Omnibuslinien

RWTH Aachen, Berichte des Instituts für Stadtbauwesen, B 26, 1981

SNV Studiengesellschaft Nahverkehr mbH:

Vergleichende Untersuchungen über bestehende und künftige Nahverkehrstechniken

Hamburg, 1974

Sonntag, H.:

Linienplanung im öffentlichen Personennahverkehr

TU Berlin, Fachbereich 20 (Informatik), 1977

Sonntag, H.:

Verkehrsnetzanalyse und Verkehrsumlegung für Transportsysteme des öffentlichen Verkehrs

Internationales Verkehrswesen, Heft 4, 1981

Spiess, H.; Florian, M.:

Optimal strategies: A new assignment model for transit networks

Transportation Research, Part B: Methodological, Vol. 23B, Nr. 2, 1989

Theis, H.:

Ein Verfahren zur Berechnung betrieblicher Kenngrößen für die wirtschaftliche Beurteilung von geplanten Autobusnetzen

Verkehr und Technik, Heft 8, 1981

Transport und Technologie Consult Hannover GmbH (Transtec)

EPON-Rechnergestützte Erstellung von Fahr- und Dienstplänen  
Firmenprospekt

Verband öffentlicher Verkehrsunternehmen (VÖV):

Empfehlungen für einen Bedienungsstandard im öffentlichen Personennahverkehr  
VÖV-Schriften 1.41.1 Reihe Technik, Köln 1981

Vuchic, V., Clarke, R., Molinero, A.:

Timed Transfer System Planning, Design and Operation  
University of Pennsylvania, Philadelphia, 1981

Walther, K.:

Die Fußweglänge zur Haltestelle als Attraktivitätskriterium im ÖPNV  
Verkehr und Technik, Heft 10+11, 1973

Walther, K.:

Beitrag zum Modal-Split auf der Grundlage fahrzeitäquivalenter Reisezeiten im ÖPNV  
Verkehr und Technik, Heft 5, 1975

Walther, K.:

Die fahrzeitäquivalente Reisezeiten im öffentlichen Personennahverkehr  
Verkehr und Technik, Heft 7, 1975

Zeitvogel, M.:

Erfahrungen mit dem R-Bus-System  
Der Nahverkehr, Heft 2, 1989

Zimmermann, H.-J.:

Operations Research, Methoden und Modelle  
Vieweg-Verlag, 2. Auflage, Aachen 1992

Zoellmer, J.:

Ein Planungsverfahren für den ÖPNV in der Fläche  
TH Karlsruhe, Institut für Verkehrswesen, Schriftenreihe Heft 44, 1991

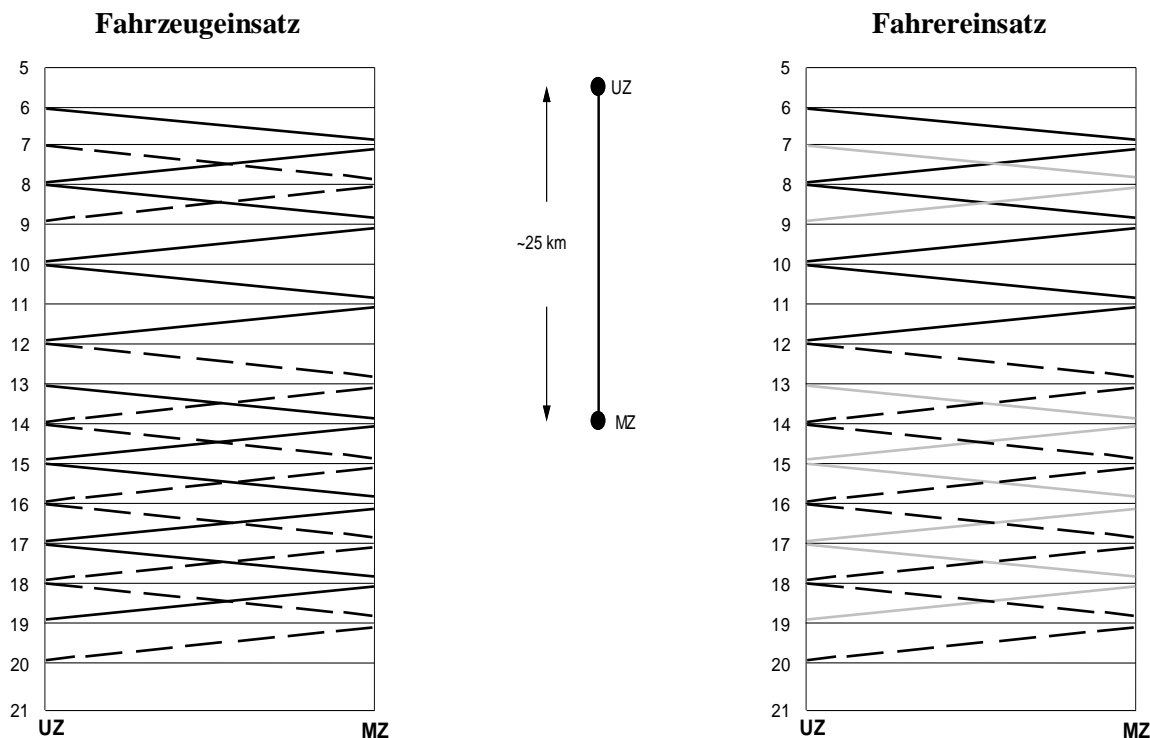
## 7 Anhang

Der Anhang enthält fünf Umlaufschema-Bausteine (vgl. Kapitel 2.3.4) für die Angebotsplanung im ländlichen Raum. Für jedes Umlaufschema werden der Fahrplan, der Fahrer- und Fahrzeugeinsatzplan, betriebliche Kenngrößen und die Kosten angegeben. Bei der Ermittlung des betrieblichen und finanziellen Aufwandes wird ein Betrieb an 250 Werktagen (Montag bis Freitag) unterstellt. Außerdem wird angenommen, daß die Fahrzeuge zusätzlich für sonstige Fahrten, z.B. an Wochenenden eingesetzt werden, so daß die Kapitalkosten und die fixen Fahrzeugkosten für den Linienbetrieb an Werktagen entsprechend abgemindert werden können. Zur Ermittlung der Arbeitszeit, insbesondere der bezahlten Pausen, wird der bayerische Manteltarifvertrag für das private Omnibusgewerbe (LANDESVBAND BAYERISCHER OMNIBUSUNTERNEHMER, 1991, vgl. Kapitel 2.5.4) zugrunde niedergelegt. Danach gelten für die Bezahlung der Pausen folgende Regelungen:

- Die Dauer der unbezahlten Pausen richtet sich nach der Dauer der Arbeitsschicht. Bei einer Arbeitsschicht bis zu 8 Stunden können 30 Minuten als unbezahlte Pause berechnet werden. Bei einer längeren Arbeitsschicht sind 60 Minuten als unbezahlte Pause zulässig. Bei geteilten Diensten oder bei Anwendung der Sechstelregelung müssen alle Pausen bezahlt werden.

### Grundlagen der Berechnung:

- Standard-Linienbus Neupreis: 430.000 DM
- Wiederverkaufswert: 30.000 DM
- GVFG-Förderung: 50 %
- Zinssatz: 8 %
- Laufleistung: 800.000 km oder 10 Jahre
- Verbrauch: 30 Liter/100 km
- Kraftstoffkosten: 1.00 DM/Liter
- Reparaturkosten: 25 DM/100 km
- Stundenlohn des Fahrers bis 20 Uhr: 42 DM
- Stundenlohn des Fahrers ab 20 Uhr: 50 DM
- (einschließlich Lohnnebenkosten)
- Betriebstage: 250 Werktage/Jahr
- Dauer einer Ein-, Aussetzfahrt: 30 Minuten
- (einschließlich Vor- und Abschlußarbeiten)
- Länge einer Ein-, Aussetzfahrt: 7 km
- Fahrzeugreserve: 10 %
- Fixe Zusatzkosten: 25.000 DM/Jahr/Fzg
- (Reinigungskosten, Versicherung, Steuern, Management, Gebäudeabschreibung)
- Anteil sonstiger Fahrten: 
$$\underline{\underline{\text{Fz gkm}_{\text{Sonstige}} = 0.15 \times \text{Fz gkm}_{\text{Linie}}}}$$

**Fahrplan:** 60-, 120-Minutentakt

Unterzentrum (UZ)	6.00	7.00	8.00	10.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Mittelzentrum (MZ)	6.50	7.50	8.50	10.50	12.50	13.50	14.50	15.50	16.50	17.50	18.50
Mittelzentrum (MZ)	7.05	8.05	9.05	11.05	13.05	14.05	15.05	16.05	17.05	18.05	19.05
Unterzentrum (UZ)	7.55	8.55	9.55	11.55	13.55	14.55	15.55	16.55	17.55	18.55	19.55

<b>Dienst 1</b> <span style="display: inline-block; width: 50px; height: 10px; background-color: black;"></span>	<b>Dienst 2</b> <span style="display: inline-block; width: 50px; height: 10px; background-color: black;"></span>	<b>Dienst 3</b> <span style="display: inline-block; width: 50px; height: 10px; background-color: gray;"></span>
270 DM/Tag 15-Min-Pause im MZ	340 DM/Tag 15-Min-Pause im MZ	410 DM/Tag 15-Min-Pause im MZ geteilter Dienst
5.30 bis 6.00: Einsetzen 6.00 bis 11.55: Fahrgastb. 11.55 bis 12.25: Aussetzen	11.30 bis 12.00: Einsetzen 12.00 bis 19.55: Fahrgastb. 19.55 bis 20.25: Aussetzen	6.30 bis 7.00: Einsetzen 7.00 bis 8.55: Fahrgastb. 8.55 bis 9.25: Aussetzen 12.30 bis 13.00: Einsetzen 13.00 bis 18.55: Fahrgastb. 18.55 bis 19.25: Aussetzen

**Kosten des Fahrbetriebs pro Jahr (Mo bis Fr)**

<b>Gesamtkosten:</b>	<b>447.000 DM</b>
• Personalkosten:	255.000 DM
• Kapitalkosten Fahrzeug: (Abschreibung über 9 Jahre)	56.000 DM
• Fixe Zusatzkosten:	43.000 DM
• Kraftstoffkosten:	45.000 DM
• Reparaturkosten:	38.000 DM
• Fahrzeugreserve:	10.000 DM
• <b>Kilometerpreis:</b>	<b>3.25 DM/km</b>

**Kenngrößen des Fahrer- und Fahrzeugeinsatzes**

• erf. Dienste/ Fahrzeuge:	3/2
• Fahrzeugkilometer:	152.000 km/Jahr
• Fahrgastbeförderung:	138.000 km/Jahr
• Ein- und Aussetzfahrten:	14.000 km/Jahr
• Arbeitszeit:	1450 min/Tag
• Lenkzeit:	1340 min/Tag
• Fahrgastbeförderung:	1100 min/Tag
• Ein-, Aussetzzeit:	240 min/Tag
• bezahlte Pause:	110 min/Tag
• unbezahlte Pause:	90 min/Tag
• $\eta_F \times \eta_D$	<b>71 %</b>

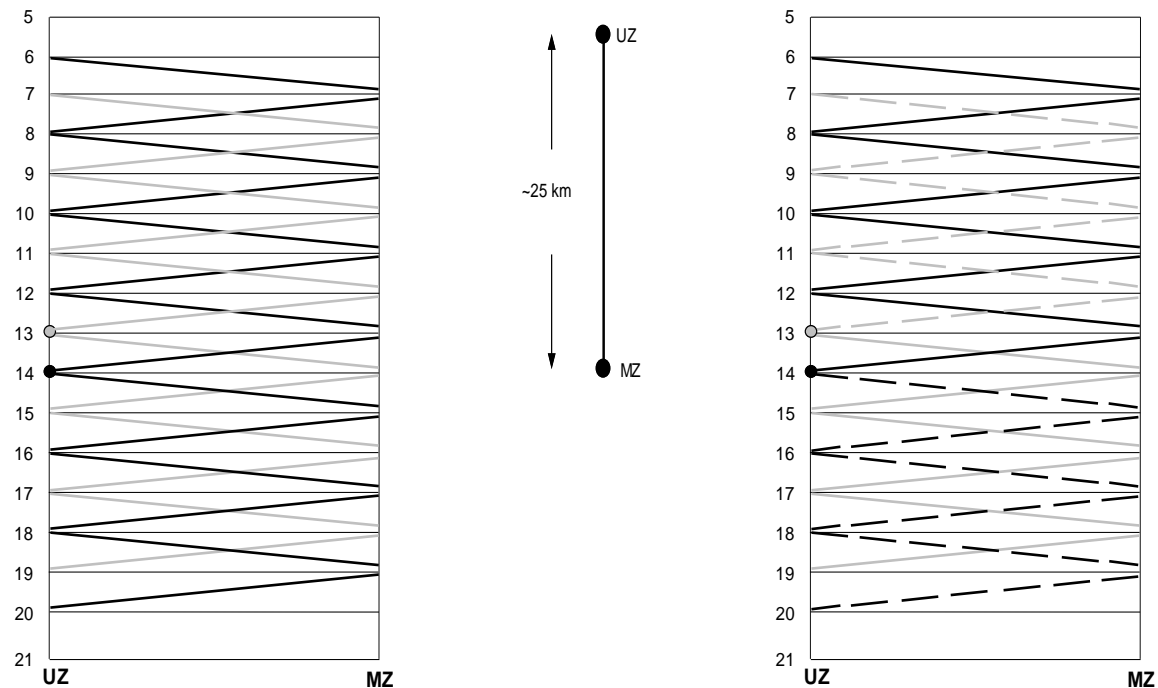
Abb. 7.1: Einsatzplanung für eine Linie mit 25 km Länge, 50 min Fahrzeit, 22 Fahrten

Berechnungsschritte mit Zwischenergebnissen zu Abbildung 7.1:

Dienstnummer	1	2	3	Summe
Fahrgastbeförderung	300 min	400 min	400 min	1100 min
Ein- und Aussetzen	60 min	60 min	120 min	240 min
Wendezeiten	55 min	75 min	70 min	200 min
Arbeitsschicht	415 min	535 min	590 min	1540 min
bezahlte Pause	25 min	15 min	70 min	110 min
unbezahlte Pause	30 min	60 min	0 min	90 min
Arbeitszeit vor 20 Uhr	385 min	450 min	590 min	1425 min
Arbeitszeit nach 20 Uhr	0 min	25 min	0 min	25 min
tägliche Personalkosten vor 20 Uhr	270 DM	315 DM	413 DM	998 DM
tägliche Personalkosten nach 20 Uhr	0 DM	21 DM	0 DM	21 DM
tägliche Personalkosten gesamt	270 DM	336 DM	413 DM	1019 DM
jährliche Personalkosten gesamt	67.500 DM	84.000 DM	103.250 DM	<b>254.750 DM</b>
$\text{Fahrplanwirkungsgrad } \eta_F \times \text{Dienstplanwirkungsgrad } \eta_D = \frac{1100}{1100 + 200 + 240} = 0.714$				
Fzgekilometer zur Fahrgastbeförderung:	$22 \times 25 \text{ km/Tag} \times 250 \text{ Tage/Jahr} =$			137.500 km/Jahr
Fzgekilometer für Ein- und Aussetzen:	$8 \times 7 \text{ km/Tag} \times 250 \text{ Tage/Jahr} =$			14.000 km/Jahr
Fzgekilometer der Linie:				151.500 km/Jahr
Fzgekilometer für sonstige Fahrten	$151.500 \text{ km/Jahr} \times 0.15 =$			22.700 km/Jahr
Summe der Fzgekilometer				174.200 km/Jahr
Fzgekilometer pro Fahrzeug				87.100 km/Jahr
Nutzungsdauer der Fahrzeuge:	$\frac{800.000 \text{ km}}{87.100 \text{ km/Jahr}} =$			9 Jahre
Kreditsumme pro Fahrzeug	$(430.000 \text{ DM} - 30.000 \text{ DM}) \times 0.50 =$			200.000 DM
jährliche Kapitalkosten pro Fahrzeug	$\frac{200.000 \text{ DM} \times 1.08^9 \times (1.08 - 1)}{1.08^9 - 1} =$			32.016 DM
jährliche Kapitalkosten der Linie	$\frac{32.016 \text{ DM} \times 2}{1.15} =$			55.680 DM
jährliche fixe Zusatzkosten der Linie	$\frac{25.000 \text{ DM} \times 2}{1.15} =$			43.478 DM
jährliche Kraftstoffkosten	$\frac{151.500 \text{ km}}{100 \text{ km}} \times 30 \text{ DM} =$			45.450 DM
jährliche Reparaturkosten	$\frac{151.500 \text{ km}}{100 \text{ km}} \times 25 \text{ DM} =$			37.875 DM
jährliche Kosten der Fahrzeugreserve	$(55.680 \text{ DM} + 43.478 \text{ DM}) \times 0.10 =$			9.916 DM
jährliche Fahrzeugkosten der Linie	$55.680 \text{ DM} + 43.478 \text{ DM} + 45.450 \text{ DM} + 37.875 \text{ DM} + 9.916 \text{ DM} =$			<b>192.399 DM</b>
jährliche Gesamtkosten der Linie	$254.750 \text{ DM} + 192.399 \text{ DM} =$			<b>447.149 DM</b>
Kilometerpreis	$447.149 \text{ DM} / 137.500 \text{ km} =$			3.25 DM/km

Fahrzeugeinsatz

Fahrereinsatz

**Fahrplan: 60-Minutentakt**

Unterzentrum (UZ)	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Mittelzentrum (MZ)	6.50	7.50	8.50	9.50	10.50	11.50	12.50	13.50	14.50	15.50	16.50	17.50	18.50
Mittelzentrum (MZ)	7.05	8.05	9.05	10.05	11.05	12.05	13.05	14.05	15.05	16.05	17.05	18.05	19.05
Unterzentrum (UZ)	7.55	8.55	9.55	10.55	11.55	12.55	13.55	14.55	15.55	16.55	17.55	18.55	19.55

Dienst 1	Dienst 2	Dienst 3	Dienst 4
330 DM/Tag 15-Min-Pause im MZ	270 DM/Tag 15-Min-Pause im MZ	270 DM/Tag 15-Min-Pause im MZ	270 DM/Tag 15-Min-Pause im MZ
5.30 bis 6.00: Einsetzen 6.00 bis 13.55: Fahrgastb. 13.55 bis 14.25: Aussetzen	6.30 bis 7.00: Einsetzen 7.00 bis 12.55: Fahrgastb. 12.55 bis 13.25: Aussetzen	13.30 bis 14.00: Einsetzen 14.00 bis 19.55: Fahrgastb. 19.55 bis 20.25: Aussetzen	12.30 bis 13.00: Einsetzen 13.00 bis 18.55: Fahrgastb. 18.55 bis 19.25: Aussetzen

**Kosten des Fahrbetriebs pro Jahr (Mo bis Fr)**

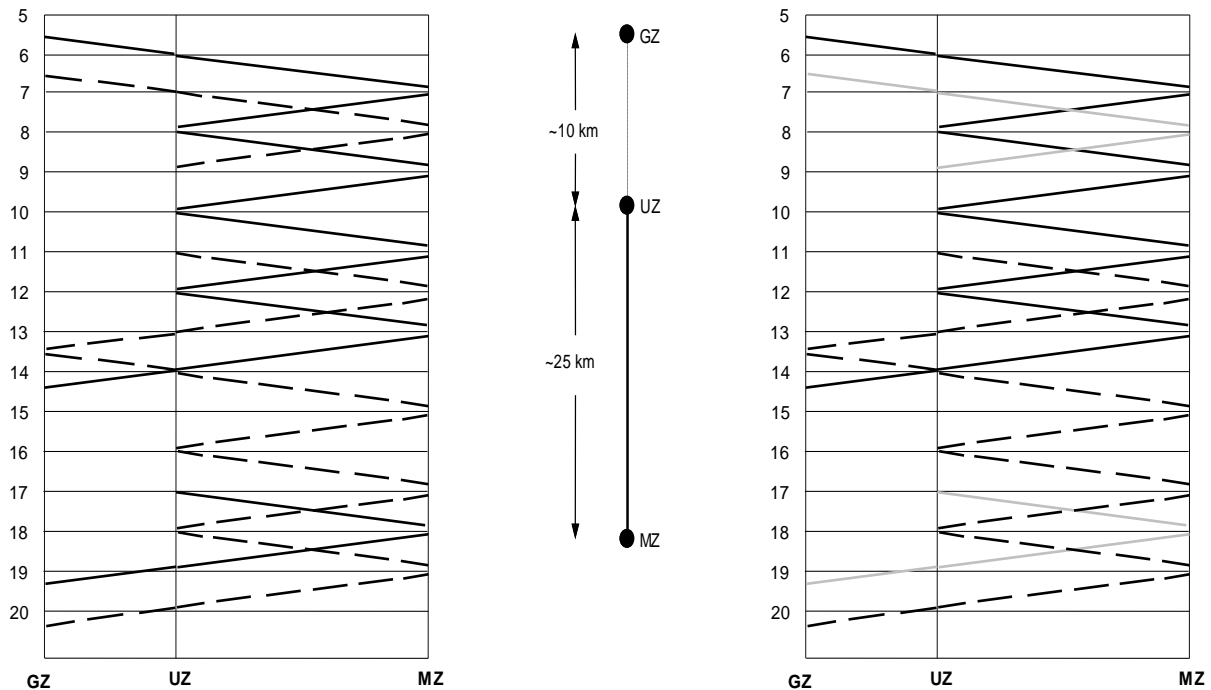
<b>Gesamtkosten:</b>	<b>504.000 DM</b>
• Personalkosten:	286.000 DM
• Kapitalkosten Fahrzeug: (Abschreibung über 7 Jahre)	67.000 DM
• Fixe Zusatzkosten:	43.000 DM
• Kraftstoffkosten:	53.000 DM
• Reparaturkosten:	44.000 DM
• Fahrzeugreserve:	11.000 DM
• <b>Kilometerpreis:</b>	<b>3.10 DM/km</b>

**Kenngrößen des Fahrer- und Fahrzeugeinsatzes**

• erf. Dienste/ Fahrzeuge:	4/2
• Fahrzeugkilometer:	177.000 km/Jahr
• Fahrgastbeförderung:	163.000 km/Jahr
• Ein- und Aussetzfahrten:	14.000 km/Jahr
• Arbeitszeit:	1630 min/Tag
• Lenkzeit:	1540 min/Tag
• Fahrgastbeförderung:	1300 min/Tag
• Ein-, Aussetzzeit:	240 min/Tag
• bezahlte Pause:	90 min/Tag
• unbezahlte Pause:	150 min/Tag
• $\eta_F \times \eta_D$	<b>73 %</b>

**Abb. 7.2:** Einsatzplanung für eine Linie mit 25 km Länge, 50 min Fahrzeit, 26 Fahrten. Der Fahrereinsatzplan unterstellt, daß an der Haltestelle Unterzentrum (●○) ein Fahrerwechsel ohne Einrücken möglich ist. Ist das nicht möglich, ist ein zusätzliches Fahrzeug erforderlich.




**Fahrplan:** 60-, 120-Minutentakt zwischen UZ und MZ

Gemeinde (GZ)	5.40	6.40	–	–	–	–	13.40	–	–	–
Unterzentrum (UZ)	6.00	7.00	8.00	10.00	11.00	12.00	14.00	16.00	17.00	18.00
Mittelzentrum (MZ)	6.50	7.50	8.50	10.50	11.50	12.50	14.50	16.50	17.50	18.50
Mittelzentrum (MZ)	7.05	8.05	9.05	11.05	12.05	13.05	15.05	17.05	18.05	19.05
Unterzentrum (UZ)	7.55	8.55	9.55	11.55	12.55	13.55	15.55	17.55	18.55	19.55
Gemeinde (GZ)	–	–	–	–	13.15	14.15	–	–	19.15	20.15

Dienst 1	Dienst 2	Dienst 3
360 DM/Tag 15-Min-Pause im MZ	400 DM/Tag 15-Min-Pause im MZ	270 DM/Tag 15-Min-Pause im MZ, geteilter Dienst
5.10 bis 5.40: Einsetzen 5.40 bis 14.15: Fahrgastb. 14.15 bis 14.45: Aussetzen	10.30 bis 11.00: Einsetzen 11.00 bis 20.15: Fahrgastb. 20.15 bis 20.45: Aussetzen	6.10 bis 6.40: Einsetzen 6.40 bis 8.55: Fahrgastb. 8.55 bis 9.25: Aussetzen 16.30 bis 17.00: Einsetzen 17.00 bis 19.15: Fahrgastb. 19.15 bis 19.45: Aussetzen

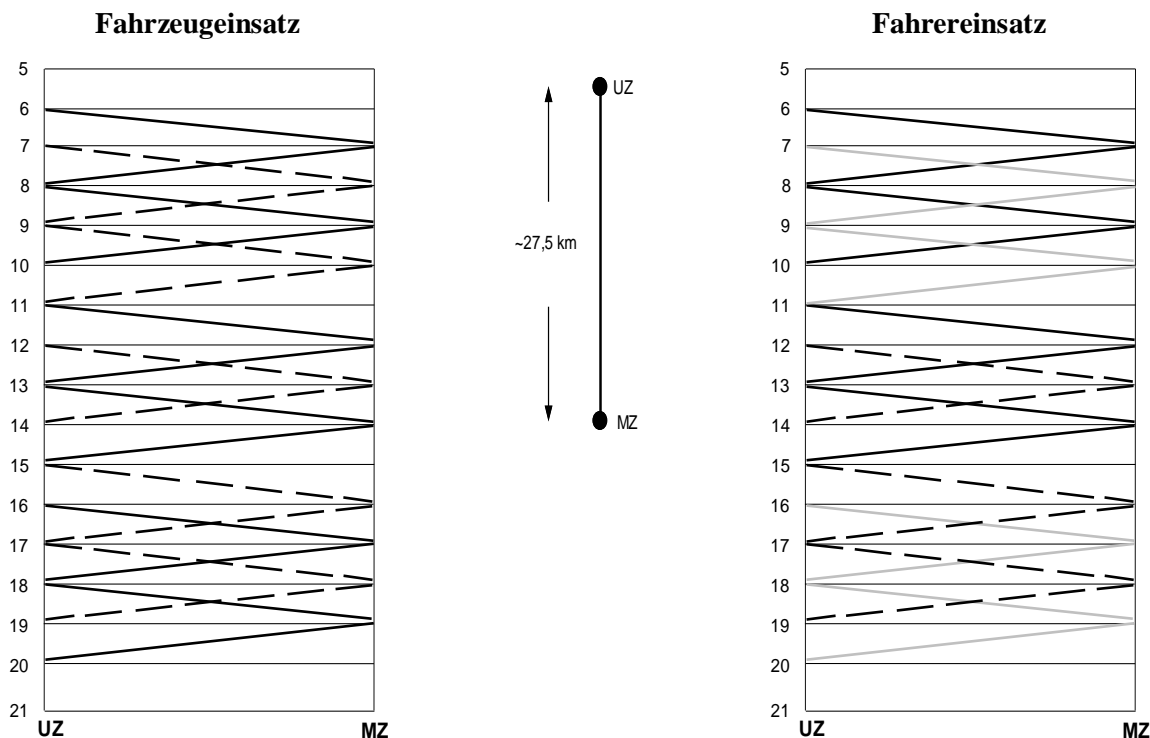
**Kosten des Fahrbetriebs pro Jahr (Mo bis Fr)**

<b>Gesamtkosten:</b>	<b>457.000 DM</b>
• Personalkosten:	257.000 DM
• Kapitalkosten Fahrzeug: (Abschreibung über 8 Jahre)	61.000 DM
• Fixe Zusatzkosten:	43.000 DM
• Kraftstoffkosten:	47.000 DM
• Reparaturkosten:	39.000 DM
• Fahrzeugreserve:	10.000 DM
• <b>Kilometerpreis:</b>	<b>3.20 DM/km</b>

**Kenngrößen des Fahrer- und Fahrzeugeinsatzes**

• erf. Dienste/ Fahrzeuge:	3/2
• Fahrzeugkilometer:	157.000 km/Jahr
• Fahrgastbeförderung:	143.000 km/Jahr
• Ein- und Aussetzfahrten:	14.000 km/Jahr
• Arbeitszeit:	1460 min/Tag
• Lenkzeit:	1380 min/Tag
• Fahrgastbeförderung:	1140 min/Tag
• Ein-, Aussetzzeit:	240 min/Tag
• bezahlte Pause:	80 min/Tag
• unbezahlte Pause:	120 min/Tag
• $\eta_F \times \eta_D$	<b>72 %</b>

**Abb. 7.3:** Einsatzplanung für eine Linie mit 25 km Länge, 50 min Fahrzeit, 20 Fahrten und 10 km Linienerweiterung früh, mittags und abends

**Fahrplan:** 60-, 120-Minutentakt

Unterzentrum (UZ)	6.00	7.00	8.00	9.00	11.00	12.00	13.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Mittelzentrum (MZ)	6.55	7.55	8.55	9.55	11.55	12.55	13.55	15.55	16.55	17.55	18.55
Mittelzentrum (MZ)	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	13.00	14.00	16.00	17.00	18.00	19.00
Unterzentrum (UZ)	7.55	8.55	9.55	10.55	12.55	13.55	14.55	16.55	17.55	18.55	19.55

<b>Dienst 1</b> <span style="display: inline-block; width: 50px; height: 10px; background-color: black;"></span>	<b>Dienst 2</b> <span style="display: inline-block; width: 50px; height: 10px; background-color: black;"></span>	<b>Dienst 3</b> <span style="display: inline-block; width: 50px; height: 10px; background-color: gray;"></span>
370 DM/Tag Blockpause im UZ, 10 bis 11 Uhr	310 DM/Tag Blockpause im UZ, 14 bis 15 Uhr	420 DM/Tag ohne Pause geteilter Dienst
5.30 bis 6.00: Einsetzen 6.00 bis 9.55: Fahrgastb. 9.55 bis 11.00: Pause. 11.00 bis 14.55: Fahrgastb. 14.55 bis 15.25: Aussetzen	11.30 bis 12.00: Einsetzen 12.00 bis 13.55: Fahrgastb. 13.55 bis 15.00: Pause. 15.00 bis 18.55: Fahrgastb. 18.55 bis 19.25: Aussetzen	6.30 bis 7.00: Einsetzen 7.00 bis 10.55: Fahrgastb. 10.55 bis 11.25: Aussetzen 15.30 bis 16.00: Einsetzen 16.00 bis 19.55: Fahrgastb. 19.55 bis 20.25: Aussetzen

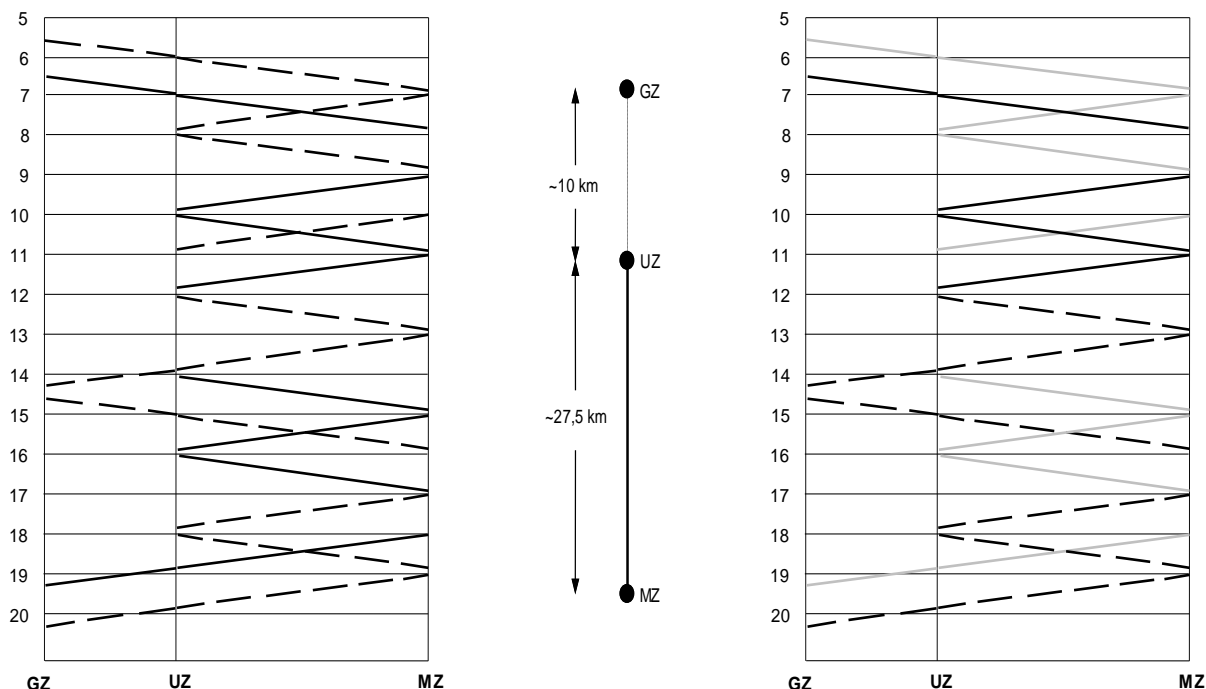
**Kosten des Fahrbetriebs pro Jahr (Mo bis Fr)**

<b>Gesamtkosten:</b>	<b>480.000 DM</b>
• Personalkosten:	275.000 DM
• Kapitalkosten Fahrzeug: (Abschreibung über 8 Jahre)	61.000 DM
• Fixe Zusatzkosten:	43.000 DM
• Kraftstoffkosten:	50.000 DM
• Reparaturkosten:	41.000 DM
• Fahrzeugreserve:	10.000 DM
• <b>Kilometerpreis:</b>	<b>3.20 DM/km</b>

**Kenngrößen des Fahrer- und Fahrzeugeinsatzes**

• erf. Dienste/ Fahrzeuge:	3/2
• Fahrzeugkilometer:	165.000 km/Jahr
• Fahrgastbeförderung:	151.000 km/Jahr
• Ein- und Aussetzfahrten:	14.000 km/Jahr
• Arbeitszeit:	1570 min/Tag
• Lenkzeit:	1450 min/Tag
• Fahrgastbeförderung:	1210 min/Tag
• Ein-, Aussetzzeit:	240 min/Tag
• bezahlte Pause:	120 min/Tag
• unbezahlte Pause:	90 min/Tag
• $\eta_F \times \eta_D$	<b>73 %</b>

Abb. 7.4: Einsatzplanung für eine Linie mit 27,5 km Länge, 55 min Fahrzeit, 22 Fahrten


**Fahrplan:** 60-, 120-Minutentakt zwischen UZ und MZ

Gemeinde (GZ)	5.40	6.40	–	–	–	–	14.40	–	–
Unterzentrum (UZ)	6.00	7.00	8.00	10.00	12.00	14.00	15.00	16.00	18.00
Mittelzentrum (MZ)	6.55	7.55	8.55	10.55	12.55	14.55	15.55	16.55	18.55
Mittelzentrum (MZ)	7.00	9.00	10.00	11.00	13.00	15.00	17.00	18.00	19.00
Unterzentrum (UZ)	7.55	9.55	10.55	11.55	13.55	15.55	17.55	18.55	19.55
Gemeinde (GZ)	–	–	–	–	14.15	–	–	19.15	20.15

**Dienst 1**   
240 DM/Tag  
Blockpause im MZ, 8 bis 9 Uhr

6.10 bis 6.40: Einsetzen  
6.40 bis 7.55: Fahrgastb.  
7.55 bis 9.00: Pause.  
9.00 bis 11.55: Fahrgastb.  
11.55 bis 12.25: Aussetzen

**Dienst 2**   
350 DM/Tag  
Blockpause im MZ, 16 bis 17 Uhr

11.30 bis 12.00: Einsetzen  
12.00 bis 15.55: Fahrgastb.  
15.55 bis 17.00: Pause  
17.00 bis 20.15: Fahrgastb.  
20.15 bis 20.45: Aussetzen

**Dienst 3**   
530 DM/Tag  
Blockpause im MZ, 9 bis 10 Uhr  
Blockpause im MZ, 17 bis 18 Uhr  
geteilter Dienst

5.10 bis 5.40: Einsetzen  
5.40 bis 10.55: Fahrgastb.+Pause  
10.55 bis 11.25: Aussetzen  
13.30 bis 14.00: Einsetzen  
14.00 bis 19.15: Fahrgastb.+Pause  
19.15 bis 19.45: Aussetzen

**Kosten des Fahrbetriebs pro Jahr (Mo bis Fr)**

<b>Gesamtkosten:</b>	<b>472.000 DM</b>
• Personalkosten:	279.000 DM
• Kapitalkosten Fahrzeug: (Abschreibung über 9 Jahre)	56.000 DM
• Fixe Zusatzkosten:	43.000 DM
• Kraftstoffkosten:	46.000 DM
• Reparaturkosten:	38.000 DM
• Fahrzeugreserve:	10.000 DM
• <b>Kilometerpreis:</b>	<b>3.40 DM/km</b>

**Kenngrößen des Fahrer- und Fahrzeugeinsatzes**

• erf. Dienste/ Fahrzeuge:	3/2
• Fahrzeugkilometer:	153.000 km/Jahr
• Fahrgastbeförderung:	139.000 km/Jahr
• Ein- und Aussetzfahrten:	14.000 km/Jahr
• Arbeitszeit:	1590 min/Tag
• Lenkzeit:	1350 min/Tag
• Fahrgastbeförderung:	1110 min/Tag
• Ein-, Aussetzzeit:	240 min/Tag
• bezahlte Pause:	240 min/Tag
• unbezahlte Pause:	90 min/Tag
• $\eta_F \times \eta_D$	<b>66 %</b>

Abb. 7.5: Einsatzplanung für eine Linie mit 27,5 km Länge, 55 min Fahrzeit, 18 Fahrten und 10 km Linienverlängerung früh, mittags und abends