



1991


Theory and Practice of Metro Network Design

Vukan R. Vuchic

University of Pennsylvania, vuchic@seas.upenn.edu

Antonio Musso

Follow this and additional works at: http://repository.upenn.edu/ease_papers

 Part of the [Civil Engineering Commons](#), [Systems Engineering Commons](#), and the [Transportation Engineering Commons](#)

Recommended Citation

Vukan R. Vuchic and Antonio Musso, "Theory and Practice of Metro Network Design", *Public Transport International* 3, 298-325. January 1991.

This paper is posted at ScholarlyCommons. http://repository.upenn.edu/ease_papers/747
For more information, please contact repository@pobox.upenn.edu.

Theory and Practice of Metro Network Design

Abstract

Most transit networks are designed empirically. For bus networks this process is often satisfactory because bus routes and networks are very dependent on local conditions, and they can be easily modified, allowing easy corrections of problems which line design may cause in operations. However, with transit systems which have extensive infrastructure, most typically metro lines and networks, corrections are extremely difficult to make. Development of an optimal network and avoidance of design features which result in operational problems are therefore of great importance. Yet, the experiences from the design and operation of such large older metro systems as London, Moscow, New York, Paris and Tokyo, or from numerous recently built medium-size metro systems, such as Hong Kong, San Francisco, Sao Paulo and Washington, remain largely unknown to the designers of new metro networks.

This paper presents a theoretical analysis of transit lines and networks and its applications. The focus is on network geometry and operational characteristics. The basic design and operational elements, such as geometric forms of lines, headways, schedules, etc., are discussed in general terms, valid for any mode; however, the main focus is on metro systems because of the particular importance of these analyses for fixed, permanent systems.

Disciplines

Civil Engineering | Engineering | Systems Engineering | Transportation Engineering

Theory and practice of metro network design

Vukan R. Vuchic, Ph. D., University of Pennsylvania, and Dr. Antonio Musso, University of Salerno, Italy

Most transit networks are designed empirically. For bus networks this process is often satisfactory because bus routes and networks are very dependent on local conditions, and they can be easily modified, allowing easy corrections of problems which line design may cause in operations. However, with transit systems which have extensive infrastructure, most typically metro lines and networks, corrections are extremely difficult to make. Development of an optimal network and

avoidance of design features which result in operational problems are therefore of great importance. Yet, the experiences from the design and operation of such large older metro systems as London, Moscow, New York, Paris and Tokyo, or from numerous recently built medium-size metro systems, such as Hong Kong, San Francisco, São Paulo and Washington, remain largely unknown to the designers of new metro networks.

This paper presents a theoretical analysis of transit lines and networks and its applications. The focus is on network geometry and operational characteristics. The basic design and operational elements, such as geometric forms of lines, headways, schedules, etc., are discussed in general terms, valid for any mode; however, the main focus is on metro systems because of the particular importance of these analyses for fixed, permanent systems.

1. Geometric characteristics of individual lines.
2. Line spacing and operation.
3. Trunk with branches vs. trunk with feeders.
4. Operational aspects of trunk lines with branches.
5. Types of transit lines.
6. Rail transit network type.

Une décision lourde de conséquences

Théorie et pratique de la conception des réseaux de métro

Vukan R. Vuchic, Ph.D., Université de Pennsylvanie et Dr Antonio Musso, Université de Salerne, Italie

La plupart des réseaux de transport en commun sont conçus de manière empirique. Pour les réseaux d'autobus, on peut s'en contenter parce que les lignes et réseaux d'autobus sont étroitement tributaires du milieu environnant et qu'ils peuvent être aisément modifiés pour remédier aux problèmes constatés au stade de l'exploitation. Mais, pour les systèmes de transport qui nécessitent une infrastructure lourde, comme c'est le cas pour les lignes et réseaux de métro, les modifications sont extrêmement difficiles à

réaliser. Il est par conséquent essentiel de mettre au point un réseau optimal en évitant les caractéristiques de conception de nature à entraîner des problèmes au niveau de l'exploitation. Or, on constate que ceux qui ont la charge de la conception de nouveaux réseaux de métro ignorent presque toujours les enseignements qui ont pu être retirés de la conception et de l'exploitation d'anciens grands réseaux tels que ceux de Londres, Moscou, New-York, Paris et Tokyo ou de réseaux de taille moyenne plus

récents, comme ceux de Hong-Kong, San Francisco, São Paulo et Washington.

Le présent article propose une analyse théorique des lignes et réseaux de transport en commun et des exemples concrets de sa mise en pratique. Il met l'accent sur la configuration et les caractéristiques opérationnelles du réseau. La conception de base et les aspects opérationnels, tels que configuration des lignes, fréquences, horaires, etc., ne sont abordés que superficiellement et dans la mesure où ils s'appliquent indistinctement à tous les modes de transport. Quoiqu'il en soit, l'objet principal de notre étude reste le métro en raison de l'importance particulière de ce type d'analyse pour les systèmes fixes, permanents.

1. Caractéristiques de la configuration des lignes prises individuellement.
2. Eloignement des lignes et exploitations .../...

Theorie und Praxis der Planung von U-Bahn-Netzen

Prof. Dr. **Vukan R. Vuchic**, Universität Pennsylvanien, und Prof. Dr. **Antonio Musso**, Universität Salerno

Die meisten Verkehrsnetze werden empirisch geplant. Bei Autobusnetzen erweist sich diese Vorgehensweise häufig als befriedigend, weil die Busstrecken und -netze stark von den örtlichen Verhältnissen abhängig sind und leicht verändert werden können, so daß ursprünglich bei der Streckenplanung begangene Irrtümer, die sich im Laufe des Betriebs herausstellen, ohne weiteres korrigiert werden können. Bei solchen Verkehrssystemen, die einer aufwendigen Infrastruktur bedürfen - typischerweise U-Bahnen und

U-Bahn-Netze - sind derartige Korrekturen jedoch äußerst schwierig. Die Entwicklung eines optimalen Netzes und die Vermeidung von Planungsmerkmalen, die später zu betrieblichen Problemen führen, ist daher von großer Bedeutung. Dennoch ist festzustellen, daß die Erfahrungen aus der Planung und dem Betrieb der großen, aber älteren U-Bahn-Systeme wie London, Moskau, New York, Paris und Tokio, aber auch der zahlreichen neueren mittelgroßen U-Bahnen wie Hongkong, San Francisco, Sao Paulo und Washing-

ton, den Planern neuer U-Bahn-Systeme großenteils unbekannt sind.

Diese Ausarbeitung enthält eine theoretische Analyse von Verkehrsstrecken und -netzen und ihres Betriebs. Der Schwerpunkt liegt auf der Netzgeometrie und den betrieblichen Merkmalen. Die grundlegende Planung und die betrieblichen Elemente wie die geometrische Form der Strecken, die Zugfolgezeiten, Fahrpläne usw. werden allgemein erörtert; diese Erörterung gilt für alle Verkehrsrarten. Das Augenmerk wird jedoch in erster Linie auf U-Bahnen gerichtet, weil die vorerwähnten Analysen für feste, permanente Systeme am ehesten zutreffen.

1. Geometrische Merkmale einzelner Strecken.
2. Abstand zwischen den Strecken und ihr Betrieb.
3. Hauptverkehrsstrecken mit Zweigstrecken oder Zubringern. .../...



James

- ▲ ... the experiences to be gained from the design and operation of such large older metro systems as London (here), Moscow, New-York, Paris and Tokyo...
- ... les enseignements à retirer de la conception et de l'exploitation d'anciens grands réseaux tels que ceux de Londres (ici), Moscou, New-York, Paris et Tokyo...
- ... aus die Erfahrungen der Planung und dem Betrieb der großen, aber älteren U-Bahn-Systeme wie London (hier), Moskau, New-York, Paris und Tokio lernen...

1. Geometric characteristics of individual lines

This section presents a systematic review and theoretical analysis of design elements and their impact on transit system operations, illustrated by examples from different cities.

Transit network design processes should consist of two major phases: first, individual lines are designed. Then the lines are considered as elements of the entire network and modified, as appropriate, to achieve an optimal system with respect to its operations, service offered to the entire city, and its relationship to other modes of transportation (pedestrians, suburban feeders including bus and auto, long distance terminals, etc.).

The basic geometric elements of individual lines, their alignment, length and stations, are covered in this section.

1.1 Alignment

Most transit lines must perform two basic functions: first, provide access to/from various points in the corridor they serve; and second, transport passengers over longer distances along that corridor (line-haul service). Alignment should therefore be selected so that the line provides, as much as possible, both types of service: it should follow corridors with a concentration of trip origins/destinations, and it should coincide with the major travel desire lines. This sometimes requires a compromise: alignment should deviate where needed to provide local access, but not so much to make the line too circuitous for longer trips.

The second compromise between the two functions must be achieved in selecting the number and density of stations: the access function requires close stations; the line-haul function requires high speed and therefore long distances between stations.

Rail transit lines provide high-performance service. They should therefore have rather direct alignments along major urban corridors. This is also true for LRT and

express bus lines, while local bus lines often have circuitous routing to provide broader area service, particularly in low-density suburbs.

1.2 Length

Spatial size of the urban area and the type of line are the major factors influencing lengths of transit lines. Long lines have two major advantages. First, they serve directly more trips than short lines: a line with k stations offers direct service for $[k/2]$ station-to-station links; if it is extended by one station, k additional links are served; another station adds $(k + 1)$ links, etc. Thus, the number of direct point-to-point services increases rapidly with extension of a line, and the number of required transfers is reduced. Second, long lines have a smaller proportion of terminal time and thus allow better utilization of personnel and vehicles.

On the negative side, long lines may result in less efficient scheduling of personnel and vehicles because long cycle times are difficult to fit into shifts. Long surface lines may also have a problem of frequent delay propagation.

Le tracé des lignes: un double compromis

...

3. Magistrale avec embranchements ou magistrale avec lignes de rabattement.
4. Caractéristiques opérationnelles des magistrales avec embranchements.
5. Types de lignes de transport en commun.
6. Types de réseaux de transport en commun sur rails.

1. Caractéristiques de la configuration des lignes prises individuellement

Ce chapitre consiste en une analyse théorique et systématique des éléments de conception et de leur impact sur l'exploitation des réseaux de transport en commun. Elle est illustrée par des exemples pris dans différentes villes.

La conception des réseaux de transport en commun doit comporter deux

grandes étapes. Premièrement, la conception des différentes lignes prises individuellement. Ensuite, ces lignes sont étudiées en tant qu'éléments d'un réseau et, le cas échéant, modifiées pour obtenir un système optimal du point de vue de son exploitation, de la desserte offerte à l'ensemble de la ville et de ses correspondances avec les autres modes de transport (piétons, systèmes de rabattement suburbains, en ce compris autobus et automobile, terminaux de transports longue distance, etc.).

Ce chapitre traitera des éléments de base de la configuration des lignes: le tracé, la longueur et les arrêts.

1.1 Tracé

La plupart des lignes de transport en commun doivent remplir deux fonctions principales. Premièrement, elles doivent permettre l'accès aux différents points du couloir qu'elles desservent et, deuxièmement, transporter les voyageurs sur de longues distances le long de ce couloir (fonction d'écoulement). Il faut donc que le tracé permette, dans la mesure du possible, d'assurer ces deux fonctions: il doit

suivre des couloirs à forte concentration de points de départ et d'arrivée de trajets et il doit coïncider avec les principaux axes de déplacement. Ces exigences imposent parfois un compromis, en ce sens que le tracé doit s'adapter aux besoins d'accès local, mais dans certaines limites, pour éviter un parcours trop sinueux pour les trajets de longue distance.

Un second compromis entre ces deux fonctions s'impose au niveau du choix du nombre et de la densité des points d'arrêt. La fonction d'accès demande des arrêts rapprochés tandis que la fonction d'écoulement exige des vitesses élevées et, par conséquent, de longues distances entre les arrêts.

La desserte des lignes de transport en commun sur rail est très performante, ce qui explique que leur tracé doit être relativement direct en suivant les grands couloirs urbains. Il en va de même pour le métro léger et pour les lignes d'autobus express, tandis que les lignes d'autobus locales ont souvent un tracé plus sinueux qui permet de desservir des zones plus larges, notamment dans les banlieues à faible densité de population.



D.S.H.

- ▲ ... at a certain volume of passenger density the upgrading of the trunk section into a rail line is a logical development (metro, regional rail or light rail - here in Portland) (see p. 310).
- ... une fois atteint un certain plafond en termes de voyageurs transportés la transformation de la magistrale en une ligne ferrée est une évolution logique (métro, rail régional ou métro léger - comme ici à Portland) (voir p. 312).
- ... von einem bestimmten Volumen der Fahrgastdichte ab wird die Leistungssteigerung der Hauptverkehrsstrecke durch Umbau in eine Schienenverbindung zu einer logischen Entwicklung (U-Bahn, S-Bahn oder Stadtbahn - wie hier in Portland) (siehe Seite 315).

Streckenführung : ein zweifacher Kompromiß

...

4. Betriebliche Aspekte von Hauptverkehrsstrecken mit Zweigstrecken.
5. Arten der Verkehrsstrecken.
6. Arten von Schienenverkehrsnetzen.

1. Geometrische Merkmale einzelner Strecken

Dieser Abschnitt enthält einen systematischen Überblick und eine theoretische Analyse der einzelnen Planungselemente und ihrer Auswirkungen auf den Verkehrsbetrieb, illustriert durch Beispiele aus verschiedenen Städten.

Der Prozeß der Planung eines Verkehrsnetzes sollte aus zwei Hauptphasen bestehen : Zunächst werden einzelne Strecken geplant. Sodann werden die Strecken als Elemente des Gesamtnetzes betrachtet und entspre-

chend modifiziert, um in betrieblicher Hinsicht, in bezug auf das der ganzen Stadt zur Verfügung stehende Service-Angebot und im Verhältnis zu den übrigen Verkehrsarten (Fußgänger, Vorort-Zubringer einschließlich des Autobusses und des Pkws, Fernbahnhöfe usw.) ein optimales System zu schaffen.

Der folgende Abschnitt befaßt sich mit den grundlegenden geometrischen Elementen der einzelnen Strecken, ihrer Führung, ihrer Länge und der Anordnung der Haltestellen.

1.1 Streckenföhrung

Die meisten Verkehrsstrecken müssen zwei grundlegenden Anforderungen gerecht werden : erstens müssen sie Zugang von und nach bestimmten Punkten innerhalb des von ihnen bedienten Korridors bieten, und zweitens müssen sie Fahrgäste über längere Strecken in diesem Korridor befördern. Die Streckenföhrung sollte daher so gewählt werden, daß die Strecke so weit wie möglich beide Anforderungen erfüllt : sie sollte entlang eines Korridors verlaufen, der eine ho-

he Konzentration von Fahrtausgangs- und Zielpunkten aufweist, und sollte mit den hauptsächlichsten Fahrtwünschen der potentiellen Fahrgäste identisch sein. Dies verlangt manchmal einen Kompromiß : die Streckenföhrung sollte von diesen Erfordernissen abweichen, wo dies zur Gewährleistung des örtlichen Zugangs notwendig ist, aber auch nicht so stark, daß die Streckenföhrung allzu kurvenreich wird.

Ein weiterer Kompromiß zwischen diesen beiden Funktionen ist bei der Auswahl und Dichte der Haltestellen notwendig : die Zugangsfunktion verlangt einen kurzen Haltestellenabstand, während die Langstreckentransportfunktion eine hohe Geschwindigkeit und daher einen größeren Abstand zwischen den Haltestellen erfordert.

Der schienengebundene Verkehr gewährleistet ein hohes Leistungsangebot. Er sollte daher auf den hauptsächlichsten innerstädtischen Verkehrskorridoren eine verhältnismäßig geradlinige Streckenföhrung erhalten. Dies gilt auch für die Stadtbahn und Autobus-Schnellverbindungen, während die örtlichen Buslinien häufig kurvenreiche Strecken befahren, um

Different modes to serve access and linehaul

With the rapid spatial growth of metropolitan areas the question arises of how far a radial metro line should extend into a suburb. Typically, a radial metro line complemented by feeder bus routes and/or park-and-ride (P + R) facilities serves a segment of the metropolitan area's circle. If the line is short, a large portion of its riders must transfer to a number of feeder bus routes, as **Fig. 1a** shows. At the other extreme, the metro line is extended in the alignment with the heaviest transit ridership so far that no feeders are needed in that direction (**Fig. 1b**).

The optimal solution between these two extremes (**Fig. 1c**) should be found by comparing the benefits of constructing a longer line in terms of greater passenger convenience, higher ridership generation and reduction of traffic volume on parallel highways vs. the costs of constructing the additional line segment. In addition, the difference in operating costs for different line lengths should be included: when the line is very short, its extension usually reduces operating costs because metro replaces a large number of labour-heavy bus operations; as the line extends further and ridership density

decreases, this advantage diminishes and may become negative when the line reaches the area with low trip generation.

1.3 Stations

Determination of the number and locations of stations along a metro line is another element affecting its operations. Typically, each line must have stations where it passes major squares, railroad stations, and intersects other transit lines. The selection of the number and locations of stations between these fixed locations depends largely on the character of the line. If it is intended to provide area coverage, i.e. to fully replace street transit in its corridor, station spacings along the line should be 500 to 800 m long (examples: Paris, Hamburg, Philadelphia). Long lines which serve suburbs of very large cities, such as London, Moscow and San Francisco BART, have average spacings between 1,000 and 3,000 m.

Some cities have two different rail modes or types of operations to serve the two functions (access and line-

haul). New York operates local and express services on its numerous 4-track rapid transit lines, Chicago and Philadelphia use skip-stop operations, while Tokyo, Paris, Munich and a number of other cities use a combination of urban metros and regional rail systems to serve central urban areas and regions, respectively.

2. Line spacing and operation

Network geometry of rail transit is influenced by the standards used in determining how many parallel lines should serve a wide corridor, and by the operating concept of transit lines in a network: whether they operate independently, or they integrate different alignments and overlap mutually. These two issues are discussed below.

▲ **Fig. 1. Alternative radial line lengths in suburbs.**

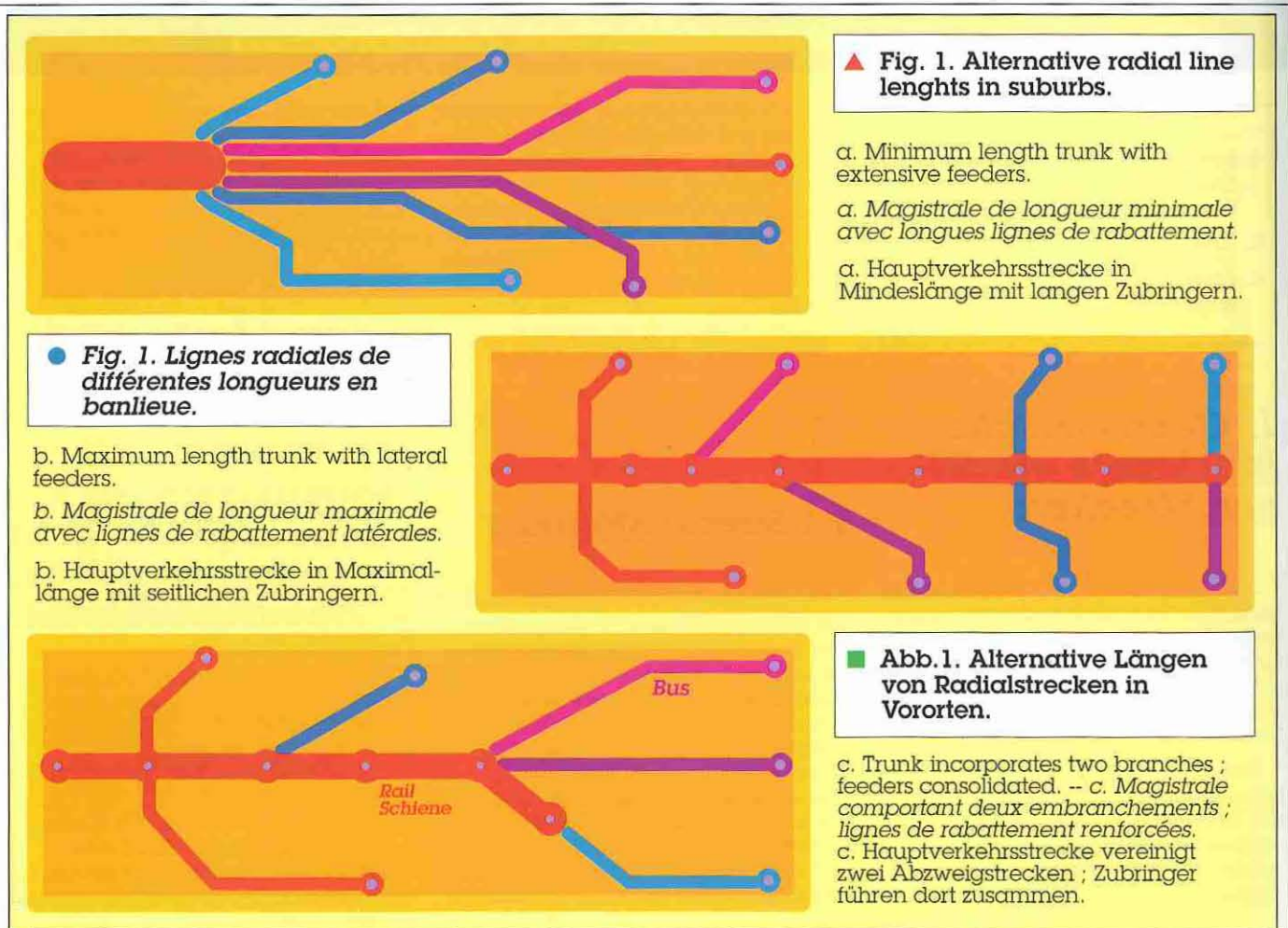
- a. Minimum length trunk with extensive feeders.
- a. *Magistrale de longueur minimale avec longues lignes de rabattement.*
- a. Hauptverkehrsstrecke in Mindestlänge mit langen Zubringern.

● **Fig. 1. Lignes radiales de différentes longueurs en banlieue.**

- b. Maximum length trunk with lateral feeders.
- b. *Magistrale de longueur maximale avec lignes de rabattement latérales.*
- b. Hauptverkehrsstrecke in Maximallänge mit seitlichen Zubringern.

■ **Abb. 1. Alternative Längen von Radialstrecken in Vororten.**

- c. Trunk incorporates two branches; feeders consolidated. -- c. *Magistrale comportant deux embranchements; lignes de rabattement renforcées.*
- c. Hauptverkehrsstrecke vereinigt zwei Abzweigstrecken; Zubringer führen dort zusammen.



Détermination de la longueur idéale de ligne

1.2 Longueur

La taille de la zone urbaine et le type de ligne sont les principaux facteurs influençant la longueur des lignes de transport en commun. Les longues lignes présentent deux avantages. Premièrement, elles desservent directement plus de déplacements que les lignes courtes : une ligne comportant x arrêts dessert directement ($x:2$) connexions entre arrêts; si on la prolonge en y ajoutant un arrêt, elle dessert alors x connexions supplémentaires; la création d'un nouvel arrêt ajoute $(x+1)$ connexions, et ainsi de suite. Ainsi, le nombre des dessertes directes d'un point à un autre augmente rapidement lorsque la ligne est prolongée et le nombre des correspondances nécessaires diminue. Deuxièmement, les longues lignes comportent moins de temps mort en fin de ligne et permettent donc une meilleure utilisation de la main-d'œuvre et des véhicules.

En ce qui concerne les inconvénients, les longues lignes réduisent l'efficacité de la programmation des horaires du personnel et des véhicules en raison de la difficulté de concilier pauses et longs cycles d'explo-

itation. Lorsque la circulation se fait en surface, les longues lignes peuvent aussi présenter un problème de répercussion et d'amplification des retards.

Compte tenu de la rapidité de l'expansion des villes se pose la question du type d'extension d'une ligne de métro radiale dans la banlieue. En règle générale, une ligne de métro radiale complétée par des lignes d'autobus de rabattement et/ou des parkings de dissuasion dessert un segment de la zone urbaine. Si la ligne est courte, une proportion élevée de ses usagers doit recourir à plusieurs lignes d'autobus de rabattement, comme le montre la **Figure 1a**. Par contre, une ligne de métro peut suivre un tracé qui correspond à une fréquentation optimale, à tel point qu'elle ne nécessite plus de services de rabattement parallèles (**Figure 1b**).

La solution optimale entre ces deux extrêmes (**Figure 1c**) doit se situer à mi-chemin entre, d'une part, les avantages d'une longue ligne en termes de facilité pour l'usager, de taux de fréquentation élevé et de diminution du volume du trafic sur les voies parallèles et, d'autre part, le coût de la construction de tronçons supplé-

mentaires. En outre, il faut tenir compte des différences de coûts d'exploitation selon la longueur de la ligne. Dans le cas d'une ligne très courte, son prolongement a généralement pour effet de réduire les coûts d'exploitation parce que le métro se substitue à un nombre élevé de services d'autobus exigeants en main-d'œuvre. Cet avantage diminue à mesure que la ligne s'allonge et que le taux de fréquentation diminue; il peut même devenir un facteur négatif lorsque la ligne atteint des zones où le nombre d'usagers desservis diminue.

1.3 Points d'arrêt

Le nombre et l'emplacement des arrêts sur une ligne de métro est un autre facteur influençant l'exploitation. En général, chaque ligne doit comporter des points d'arrêt aux places d'une certaine importance, aux gares de chemin de fer et aux intersections avec d'autres lignes de transport en commun. Le choix du nombre et des emplacements des arrêts entre des points obligés est largement fonction des caractéristiques de la ligne. Si la ligne est destinée à mailler un sec-

Feststellung der idealen Streckenlänge

eine breitere räumliche Abdeckung zu erzielen, insbesondere in weniger dicht besiedelten Vororten.

1.2 Streckenlänge

Die räumliche Größe des Stadtgebiets und die Art der Strecke sind die Faktoren, die die Länge der Strecken im wesentlichen beeinflussen. Große Streckenlängen bieten zwei erhebliche Vorteile. Erstens erzielen sie unmittelbar eine größere Zahl von Beförderungsfällen als kurze Strecken : eine Strecke mit k Haltestellen kann eine unmittelbare Verbindung ($1/2 k$) zwischen den einzelnen Haltestellen erbringen; wird dies um eine Haltestelle verlängert, so werden k zusätzliche Verbindungen bedient; eine weitere Haltestelle fügt $(k + 1)$ Verbindungen hinzu, usw. Die Zahl der direkten Punkt-zu-Punkt-Verbindungen nimmt daher mit der Verlängerung einer Strecke rasch zu, und die Zahl der benötigten Umsteigegefälle wird reduziert. Außerdem ermöglichen längere Strecken eine kürzere Wendezeit und führen daher zu einer besseren Nutzung von Mitarbeitern und Fahrzeugen.

Andererseits ist der Personal- und Fahrzeugeinsatz bei langen Strecken schwieriger zu planen, da lange Streckenlaufzeiten nicht so leicht in die Schichtplanung einzubauen sind. An der Oberfläche geführte längere Strecken haben auch zur Folge, daß sich einmal eingetretene Verspätungen häufig auf die nachfolgenden Verbindungen auswirken.

Angesichts der rapiden räumlichen Ausdehnung der städtischen Ballungsgebiete erhebt sich die Frage, wie weit eine radiale U-Bahn-Strecke in einen Vorort hineingeführt werden sollte. Der Normalfall ist, daß eine radiale U-Bahn-Strecke, ergänzt durch Zubringerautobusse und/oder Park-and-Ride-Einrichtungen, ein Segment des Verkehrskreises des Ballungsraums bedient. Ist diese Strecke kurz, so muß ein großer Teil der Fahrgäste in eine Anzahl von Zubringerbussen umsteigen (**Abb. 1a**). Das andere Extrem besteht darin, daß die U-Bahn in einer Streckenführung, auf der das stärkste Fahrgastaufkommen zu erwarten ist, so weit in diese Richtung ausgedehnt wird, daß keine Zubringer erforderlich sind (**Abb. 1b**).

Die optimale Lösung zwischen diesen beiden Extremen (**Abb. 1c**) sollte

darin bestehen, daß der Vorteil des Baus einer längeren U-Bahn-Strecke, gemessen an den größeren Vorzügen für die Fahrgäste, einem höheren Fahrgastaufkommen und der Verringerung des Verkehrsvolumens auf den parallel laufenden Straßen, mit den Kosten des Baus des zusätzlichen Streckenabschnitts verglichen werden. Außerdem sollte der Unterschied in den Betriebskosten zwischen verschiedenen Streckenlängen berechnet werden : ist die Strecke sehr kurz, so verringert ihre Verlängerung meist die Betriebskosten, weil die U-Bahn an die Stelle einer großen Zahl lohnintensiver Autobusfahrten tritt; in dem Maße jedoch, in dem sich die Strecke weiter verlängert und das Fahrgastaufkommen abnimmt, verringert sich dieser Vorteil und kann ins Negative umschlagen, sobald die Strecke eine Gegend mit geringem Fahrgastaufkommen erreicht.

1.3 Haltestellen

Die Festlegung der Zahl und des Standorts der Haltestellen an einer U-Bahn-Strecke ist ein weiteres Element, das den Betrieb beeinflusst. Normalerweise

2.1 Spacing of Parallel Lines

A given transporting capacity in a wide urban corridor can be provided by different combinations of the number of lines and frequency of service on them. The trade-off between the two is shown clearly by a simple theoretical model. Suppose that a corridor with a width W should be served by a total frequency of F transit units (TU = vehicles or trains) per hour; population is evenly distributed and the total number of transit riders in the served area does not depend on the number and positions of lines.

The required service can be provided by n lines, as Fig. 2. shows. For $n = 1, 2$ and 3 each line i should be optimally located at a distance

$$W_i = \frac{W}{2n} (2i - 1)$$

from the left edge of the corridor. Frequency of service on each line is $f = F/n$, while the average and maximum access distances to the lines, \bar{L}_a , and $L_{a \max}$, respectively, are :

Table 1. Relationship between access distances and service frequency

Case	No. of lines n	Headway h (min)	Ave. walk. distance \bar{L}_a (m)	Max. walk. dist. $L_{a \max}$ (m)
a	1	5	300	600
b	2	10	150	300
c	3	15	100	200

$$\bar{L}_a = \frac{W}{4n} \text{ and } L_{a \max} = \frac{W}{2n}$$

Thus if the corridor is $W = 1200$ m wide and the required total service frequency is $F = 12$ TU/h, the alternative line designs, assuming that they could be placed at any lateral location in the corridor, would be as given in Table 1.

In real world situations this theoretical model must be enhanced to take into account several additional elements. First, passenger preferences between access distance and frequency of service, which represent a major factor in selection among the above options, depend on such local factors as passenger trip

lengths, conditions for walking and service quality. Second, the concentration of the passenger volume on fewer and, ultimately, on one line, increases the feasibility of upgrading that line to improve operating conditions or the introduction of a higher-performance mode. Such a change, in turn, attracts passengers from a greater distance. Thus, the discussed real-world factors which are not included in the above model tend to favour the solution of fewer higher-quality lines instead of many lines with short average access, but low-quality service. This situation often results in justification of construction of a rail line which, often with some feeders, serves a wide urban corridor.

Les fonctions accès et écoulement par modes distincts

teur, c'est-à-dire à se substituer entièrement à la circulation en voirie dans son couloir, l'écartement des arrêts doit être de 500 à 800 mètres (comme à Paris, Hambourg ou Philadelphie). Pour les longues lignes desservant les banlieues des très grandes villes, comme à Londres et à Moscou ou comme le BART à San Francisco, l'écartement est en moyenne de 1.000 à 3.000 mètres.

Dans certaines villes, les deux fonctions (accès et écoulement) sont assurées par deux types ou modes différents de transport sur rail. New-York fait circuler des dessertes locales et express sur un réseau dense de lignes de métro à quatre voies, Chicago et Philadelphie utilisent le système des arrêts alternés tandis que Tokyo, Paris, Munich et plusieurs autres villes combinent métros urbains et chemin de fer régional pour desservir la zone urbaine et les régions environnantes.

2. Eloignement des lignes et exploitations

La configuration des réseaux de métro doit tenir compte des normes utilisées pour calculer combien de lignes parallèles doivent desservir un couloir d'une certaine largeur et par le concept opérationnel de ces lignes dans un réseau : doivent-elles fonctionner indépendamment ou faut-il intégrer différents tracés qui se recoupent mutuellement ? Nous allons examiner ces deux questions dans les pages qui suivent.

2.1 Eloignement des lignes parallèles

On peut obtenir une capacité donnée dans un large couloir urbain en combinant de plusieurs manières le nombre de lignes et la fréquence de la desserte. Le compromis à atteindre se détermine en utilisant un modèle théorique relativement simple. Suppo-

sons un couloir d'une largeur W à desservir par une fréquence totale de F véhicules (TU = voitures ou rames) à l'heure; la population est uniformément répartie et le nombre total d'usagers de la zone desservie ne varie pas en fonction du nombre et de la situation des lignes.

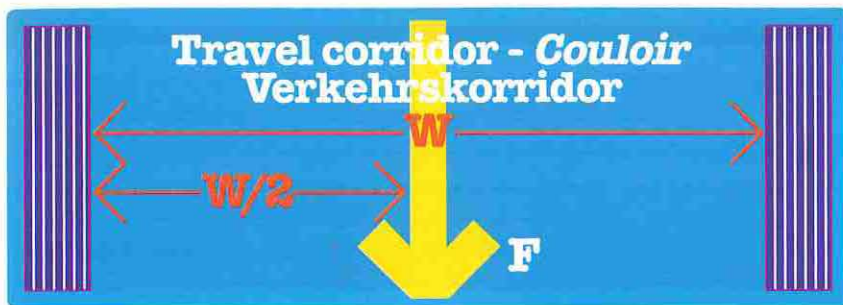
La desserte requise peut être assurée par n lignes, comme indiqué à la Figure 2. Pour $n = 1, 2$ et 3 , l'implantation de chaque ligne i doit, pour être optimale, se trouver à une distance

$$W_i = \frac{W}{2n} (2i - 1)$$

de la limite de gauche du couloir. La fréquence sur chaque ligne est $f = F/n$, tandis que les distances moyenne et maximum d'accès aux lignes, \bar{L}_a et $L_{a \max}$, sont respectivement :

$$\bar{L}_a = \frac{W}{4n} \text{ and } L_{a \max} = \frac{W}{2n}$$

De ce fait, si la largeur du couloir est $W = 1.200$ m et que la fréquence totale de la desserte requise est $F = 12$ TU/h, les différentes possibilités, à supposer que les lignes puissent être librement implantées en tout point du couloir, se présenteraient comme indiqué au Tableau 1 (voir page 306).

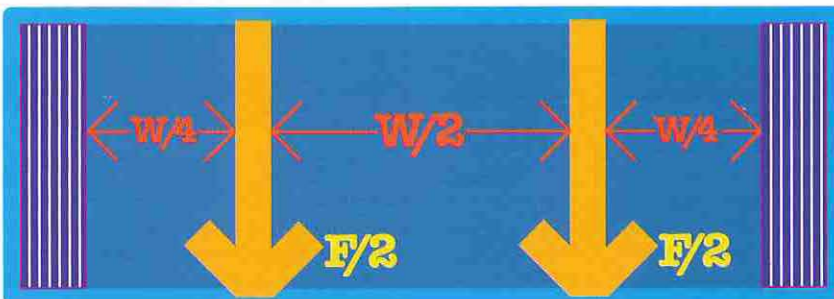


▲ Fig. 2. Relationship between line spacing and frequency of service for constant corridor capacity.

Case A : one transit line.
 Cas A : une seule ligne.
 Fall A : eine Strecke.

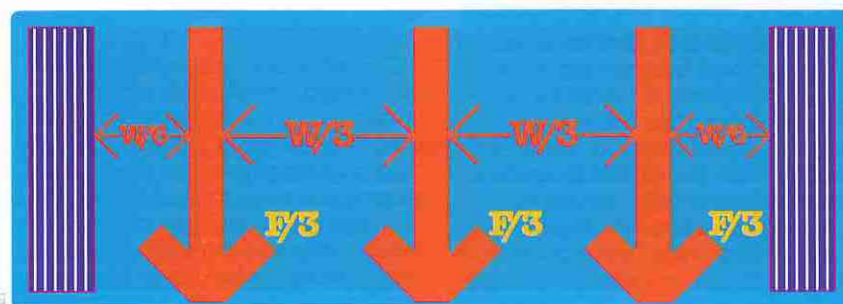
● Fig.2. Rapport entre l'éloignement des lignes et la fréquence de la desserte pour une capacité constante d'un même couloir.

Case B : two transit lines.
 Cas B : deux lignes.
 Fall B : zwei Strecken.



■ Abb.2. Verhältnis zwischen dem Streckenabstand und der Bedienungshäufigkeit zur Erzielung einer konstanten Kapazität des Verkehrskorridors.

Case C : three transit lines.
 Cas C : trois lignes.
 Fall C : drei Strecken.



Zugang und Fahrgastbeförderung durch unterschiedliche Verkehrsmittel

weise benötigt eine U-Bahn-Strecke eine Haltestelle jedesmal dann, wenn sie größere Plätze, Bahnhöfe und Kreuzungen mit anderen Verkehrsmitteln unterfährt. Die Auswahl der Zahl und des Standorts der übrigen Haltestellen ist großenteils vom Charakter der Strecke abhängig. Soll sie ein großes Gebiet abdecken, d.h. auf ihrem Korridor an die Stelle aller übrigen - oberirdischen - Verkehrsmittel treten, so sollte der Haltestellenabstand 500 bis 800 m betragen (Beispiele : Paris, Hamburg, Philadelphia). Lange Strecken, die die Vororte sehr großer Städte bedienen, wie London, Moskau und die BART in San Francisco, weisen einen Haltestellenabstand von 1.000 bis 3.000 m auf.

Manche Städte verfügen über unterschiedliche Schienenverkehrsmittel oder Betriebsformen, um die beiden Funktionen (Zugang und Fahrgastbeförderung auf der Strecke) zu gewährleisten. New York betreibt auf seinen zahlreichen vierspurigen Stadtbahnstrecken sowohl örtliche als auch Expresverbindungen; Chicago und Philadelphia benutzen ein System, bei dem bestimmte Haltestellen übersprungen werden, während Tokio, Paris, München und eine Anzahl anderer

Städte eine Kombination aus innerstädtischen U-Bahnen und regionalen Schienenverkehrssystemen eingeführt haben, um die städtischen bzw. die regionalen Gebiete zu bedienen.

2. Abstand zwischen den Strecken und ihr Betrieb

Die Netzgeometrie schienengebundener Verkehrsmittel wird von den Normen beeinflusst, die der Entscheidung zugrundegelegt werden, wie viele parallel verlaufende Strecken einen breiten Korridor bedienen sollten, sowie von dem Betriebskonzept der einzelnen Linien innerhalb dieses Korridors : ob sie unabhängig voneinander betrieben werden oder ob sie verschiedene Streckenführungen miteinander vereinen und sich gegenseitig überlappen. Diese beiden Fragen werden weiter unten erörtert.

2.1 Abstände zwischen parallel verlaufenden Strecken

Eine bestimmte Transportkapazität in einem breiten städtischen Verkehrskorridor kann durch verschiedene Kombinationen aus Streckenzahl und Service-Frequenz dargestellt werden. Die jeweiligen Vor- und Nachteile lassen sich an einem einfachen theoretischen Modell leicht illustrieren. Nehmen wir an, daß ein Korridor mit einer Breite W durch eine Gesamtfrequenz von F Transporteinheiten ($TU =$ Fahrzeuge oder Züge) je Stunde bedient werden soll, daß die Bevölkerung gleich verteilt ist und daß die Gesamtzahl der öffentlichen Verkehrsteilnehmer in dem zu bedienenden Gebiet nicht von der Zahl und der Anordnung der Strecken abhängt.

Das benötigte Leistungsangebot kann sodann von n Strecken erbracht werden, wie **Abb. 2** zeigt. Bezeichnet man die n Strecken mit 1, 2 und 3, so sollte jede Strecke i optimal in der Entfernung

$$W_i = \frac{W}{2n} (2i - 1)$$

Direct lines with 2.5 times waiting periods

2.2 Independents vs. Integrated Line Operations

Independent operation of lines in a network is simple, but it requires that all passengers who travel between stations on different lines transfer at line junctions. Alternatively, lines in a network can be integrated so that TUs from one line travel to several other lines, i.e., lines consist of overlapping routings in the network. With this operation a more diversified and flexible service is offered and the number of passenger transfers is reduced; however, operational complexity is greater, so that it is more difficult to offer reliable service. Moreover, operation of a large number of overlapping lines results in decreased frequency of service on each line. This is illustrated by a simple model of a metro network, resembling metro networks in Leningrad, Montreal and Tashkent.

Suppose that a network connects six outlying terminal points via three lines, as shown in Fig. 3. If these lines are operated independently (sketch (a)), as is done in the cities mentioned,

Table 2. Networks with independent and with integrated lines

Characteristic	Independent Operation		Integrated Operation	
	General	Example	General	Example
Number of lines/routes	$n/2$	3	$n(n-1)/2$	15
Frequency on each route	f	15	$f/(n-1)$	3
Transfers	Many		None	
Network operation	Simple		Complex	

with a frequency on each line of f , for example, 15 TU/h, or 4 min. headway, passengers can travel between any two stations with one transfer and have a total average waiting time of 4 min.: half of the headway, or 2 min., at their origin, and 2 min. at their transfer. If integrated service is provided with direct lines among all six terminals, as shown in sketch (b), no passenger has to transfer, but frequency of service on each line is $15/5 = 3$ TU/h. With the 20 min. headway, average waiting time increases to 10 min.; thus it becomes 2.5 times greater than with independent line operation.

Expressed in parametric form, a network of single lines connecting n outlying points with passenger volumes requiring service frequency f , would have the characteristics under the two types of operation as shown in Table 2.

Consequently, the benefit of eliminating one transfer for some passengers by interconnecting the lines is obtained at the expense of longer waiting times for most passengers and greater complexity of network operation. How significant these losses are depends on the network extensiveness, its configuration and type of operation. For 3 to 4 line

Lignes de haute qualité ou proximité des arrêts

Tableau 1. Rapport entre distance d'accès et fréquence du service

Cas	Nombres de lignes	Fréquence h (min)	Distance moyenne L_a (m)	Distance maximum $L_{a \max}$ (m)
a	1	5	300	600
b	2	10	150	300
c	3	15	100	200

En situation réelle, ce modèle théorique doit être adapté pour tenir compte de plusieurs autres éléments. Premièrement, la préférence que marquent les usagers pour la distance d'accès ou pour la fréquence de la desserte. Celle-ci influence sensiblement le choix entre les modes existants et est fonction de facteurs particuliers tels que la longueur des trajets, la condition physique de l'utilisateur et la qualité du service. Deuxièmement, la concentration des usagers sur un nombre réduit de lignes, voire sur une seule ligne offre plus de possibilités d'améliorer cette ligne en rehaussant la qualité du service ou par la mise en service d'un mode de transport plus performant. Par la suite,

ce changement attirera des usagers dans un périmètre plus étendu. Comme on le voit, ces éléments pratiques, dont le modèle théorique ne tient pas compte, tendent à favoriser la formule consistant en un nombre réduit de lignes de haute qualité plutôt que celle offrant un nombre plus élevé de lignes avec des distances d'accès plus courtes mais un niveau de desserte inférieur. Dans ces conditions, on voit que se justifie la construction d'une ligne ferrée qui, avec quelques lignes de rabattement, dessert un large couloir urbain.

2.2 Exploitation indépendante ou intégrée

Exploiter indépendamment les différentes lignes constituant un réseau est une solution simple, mais elle ne permet de correspondances qu'aux points d'intersection entre les lignes. Par contre, il est possible d'intégrer les lignes d'un réseau de telle sorte que les véhicules d'une ligne puissent circuler sur d'autres lignes, c'est-à-dire que les tracés se recoupent dans de mêmes lignes. Dans ce cas, le service offert est plus diversifié et souple et le nombre des correspondances est réduit. Cependant, la gestion opérationnelle est plus complexe et la fiabilité de la desserte plus aléatoire. De plus, exploiter un grand nombre de lignes qui se chevauchent implique une diminution de la fréquence sur chaque ligne. Cette situation peut s'illustrer par un modèle simple de réseau de métro ressemblant à ceux de Leningrad, Montréal et Tachkent.

Supposons un réseau qui relie six terminus périphériques au moyen de trois lignes, comme illustré à la Figure 3. Si ces lignes sont exploitées indépendamment (schéma a), comme c'est

Zugangsentfernung und Betriebsqualität

Tabelle 1.
Verhältnis zwischen Zugangsentfernung und Bedienungshäufigkeit

Fall	Nr. der Strecke	Zugfolgezeit h (min)	Mittlere Gehentfernung \bar{L}_a (m)	Maximale Gehentfernung $L_{a,max}$ (m)
a	1	5	300	600
b	2	10	150	300
c	3	15	100	200

vom linken Rand des Korridors aus angeordnet werden. Die Bedienungshäufigkeit auf jeder Strecke beträgt $f = F/n$, während die durchschnittlichen und maximalen Zugangsentfernungen zu den Strecken, \bar{L}_a bzw. $L_{a,max}$, wie folgt lauten:

$$\bar{L}_a = \frac{W}{4n} \quad \text{und} \quad L_{a,max} = \frac{W}{2n}$$

Wenn der Korridor also $W = 1\,200$ m breit ist und sich die erforderliche Bedienungshäufigkeit auf $F = 12$ TU/h beläuft, dann wäre die alternative Streckenplanung - unter der Voraussetzung, daß die Strecken an irgendeinem seitlichen Standort innerhalb

des Korridors angeordnet werden - wie in **Tabelle 1** dargestellt.

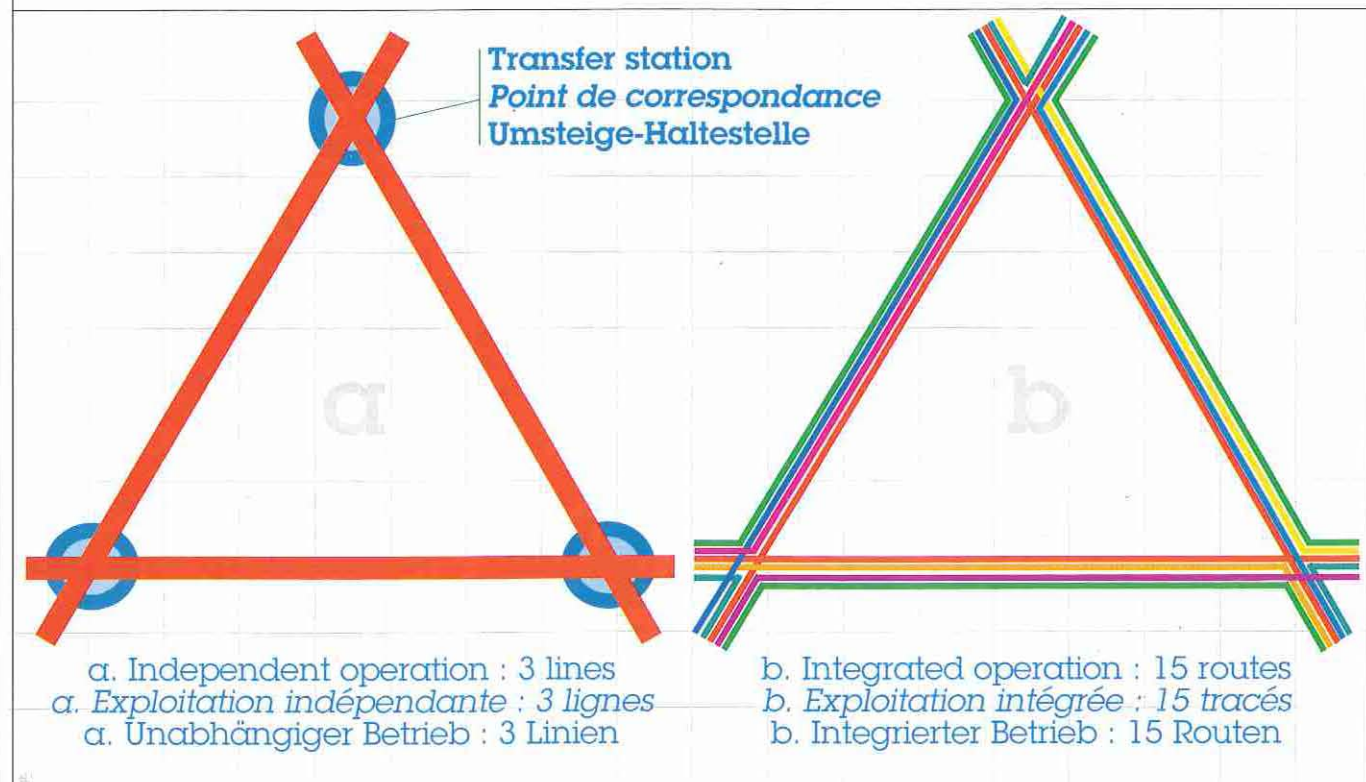
Zur realistischen Widerspiegelung der tatsächlichen Verhältnisse muß dieses theoretische Modell um mehrere zusätzliche Elemente ergänzt werden. Zunächst sind die Fahrgastpräferenzen zwischen der Zugangsentfernung und der Bedienungshäufigkeit, die bei der Auswahl zwischen den vorgenannten Optionen eine erhebliche Rolle spielen, von örtlichen Faktoren abhängig wie der Beförderungsweite, den Bedingungen, unter denen die Fußwege zurückgelegt werden müssen, und der Servicequalität. Zweitens erhöht die Konzentration des Fahrgastvolumens auf

weniger und letzten Endes auf eine einzige Strecke die Vertretbarkeit der Verbesserung der Betriebsqualität dieser Strecke oder der Einführung eines Verkehrsmittels mit größerer Leistungsfähigkeit. Derartige Verbesserungen locken Fahrgäste auch aus größerer Entfernung an. Diese realen Faktoren, die in dem vorgenannten Modell nicht berücksichtigt sind, begünstigen tendenziell die Einführung einer geringeren Anzahl von Strecken höherer Qualität anstelle zahlreicher Strecken mit kurzen durchschnittlichen Zugangswegen, jedoch mit niedrigerer Servicequalität. Diese Situation führt oft zu der Begründung für den Bau einer einzigen Schienenverkehrsstrecke, die - häufig mit Hilfe einiger Zubringer - einen breiten städtischen Verkehrskorridor bedient.

2.2 Unabhängiger oder integrierter Linienbetrieb?

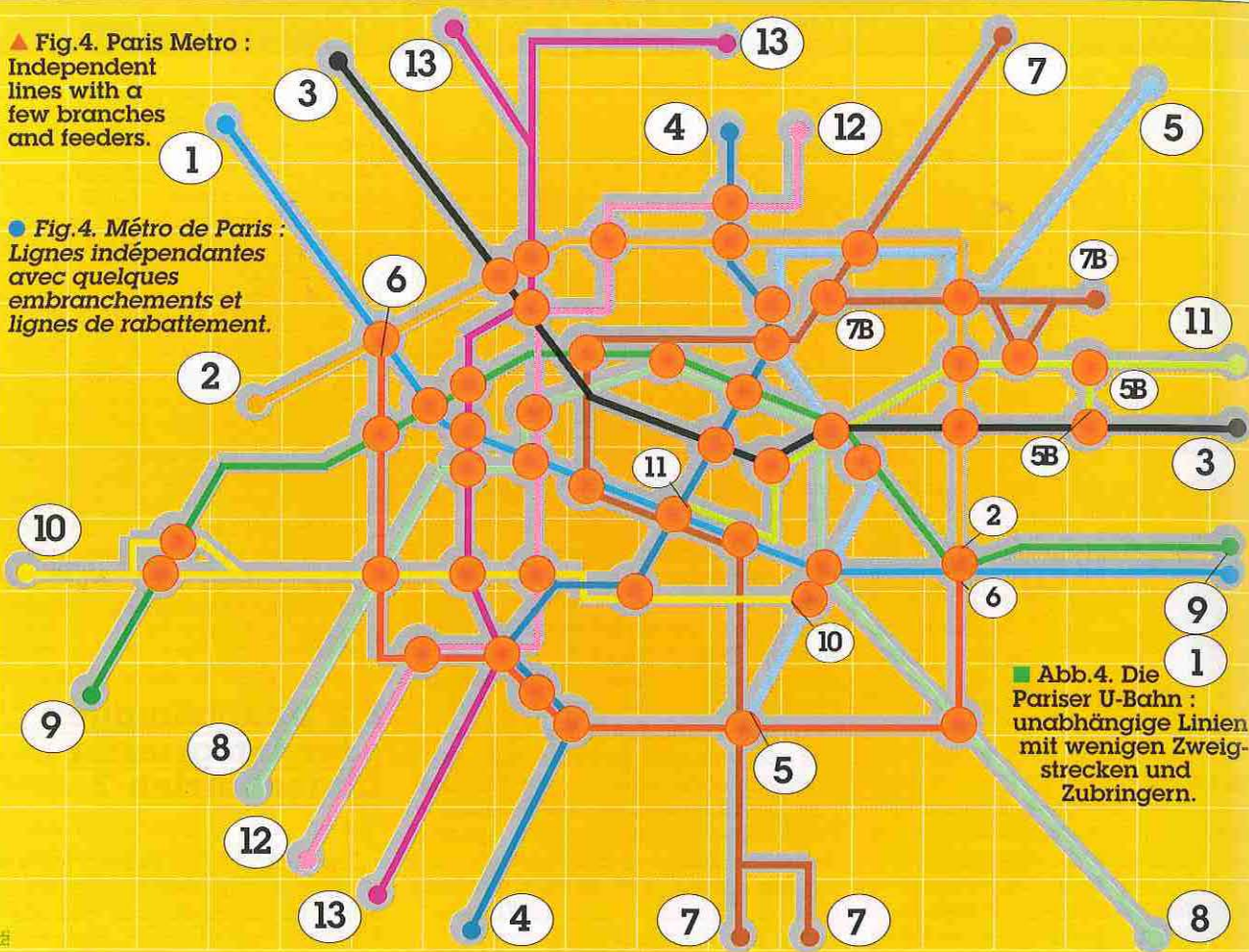
Der unabhängige Betrieb von Verkehrslinien in einem Netz ist einfach, bringt es jedoch mit sich, daß alle Fahrgäste, die zwischen bestimmten

- ▲ **Figure 3. Network with independent and with integrated line operations.**
- **Figure 3. Réseau avec exploitation indépendante ou intégrée des lignes.**
- **Abbildung 3. Netz mit unabhängigem und mit integriertem Linienbetrieb.**



▲ Fig.4. Paris Metro : Independent lines with a few branches and feeders.

● Fig.4. Métro de Paris : Lignes indépendantes avec quelques embranchements et lignes de rabattement.



■ Abb.4. Die Pariser U-Bahn : unabhängige Linien mit wenigen Zweigstrecken und Zubringern.

Choice of transport «à la carte»

segments operational complexity is usually moderate, but with an increasing number of overlapping lines it may become excessive.

In actual practice most metro systems consist of independent lines, sometimes with branches. To achieve maximum service reliability, independent line operation is used, while extensive passengers transfers are facilitated through careful layout and design of stations, good information, security and various amenities. Even such extensive metro systems as Paris (Fig. 4) and Tokyo consist of independent lines only.

Yet, it cannot be concluded that integrated operation of lines cannot be successfully applied. The New York Rapid Transit System has an extremely complex network of interweaving lines and has operated it successfully for many decades. Its reliability is lower than on simpler systems, but the diversity of routings, types of service (express/local, skip-stop, etc) and flexibility of operations are its definite and unique assets. Some network complexity is found on the metro systems in Chicago, London, and Stockholm, as well as on a number of light rail and regional rail systems. The latter are

particularly characterized by large numbers of branches, which will be discussed in detail in the following section.

Figure 5 shows the very complex network and lines of Division B (former BMT/IND) of New York's Rapid Transit System (see page 319).

In conclusion, integrated operation of metro lines can offer more direct and more diversified services than independent operations; however, integrated operation is more sensitive to irregularities and disturbances. It can therefore be operated efficiently only if the lines are not loaded close to capacity and if they have an effective operations control system.

3. Trunk with branches vs. trunk with feeders

The highest transit passenger volumes usually follow radial directions to/from the city centre. When such travel demand is low or

moderate, it is best served by a few lines following a major radial facility from the centre outward, then spreading in several directions to serve a large area of lower density suburbs. When the outlying area and passenger volumes grow and the number of lines increases, their overlapping, joint operation can lead to operational problems and economic inefficiencies. Reliability and efficiency can then be improved by changing the trunk with branches operation to trunk with feeders, i.e., independent operation of the trunk from the branches. This separation allows use of optimal vehicles, right-of-way (R/W) category and operating methods on each one of the two portions of this network: a higher capacity and performance system on the trunk than on the feeders.

The trunk can be upgraded in several ways:

1. Same vehicle type, but separate operation and scheduling;
2. Higher capacity and higher performance vehicles;
3. Upgraded R/W constructed (partially or fully separated);
4. Different mode introduced (typically, rail replacing buses).

Lignes directes, mais temps d'attente $\times 2,5$

le cas dans les villes que nous venons de citer, et que la fréquence sur chaque ligne est, par exemple, de 15 rames à l'heure, soit 4 minutes de battement, les voyageurs se déplaçant entre deux arrêts séparés par une correspondance auront une durée d'attente totale de 4 minutes, à savoir la moitié du battement à leur point de départ, soit 2 minutes, puis 2 minutes au point de correspondance. En cas de desserte intégrée avec lignes directes entre les six terminus (schéma b), il n'y a pas de correspondance, mais la fréquence de chaque ligne devient 15/5, soit 3 rames à l'heure. Avec un battement de 20 minutes, le temps d'attente moyen passe à 10 minutes, soit 2,5 fois plus que pour l'exploitation indépendante.

Schématiquement, un réseau de lignes distinctes reliant n points périphériques avec des taux de fréquentation exigeant une fréquence de desserte f présenterait les caractéristiques des deux types d'exploitation illustrés au **Tableau 2**.

Par conséquent, l'avantage obtenu en éliminant une correspondance pour certains passagers, en reliant les lignes entre elles, l'est au prix d'un allongement de la durée d'attente

pour la majorité et d'une plus grande complexité de l'exploitation du réseau. L'importance de ces inconvénients est proportionnelle à l'étendue du réseau, à sa configuration et au type d'exploitation. Lorsqu'il ne s'agit que de trois ou quatre lignes, la complexité est généralement d'un degré moyen mais, lorsque le nombre de lignes se chevauchant augmente, elle peut devenir énorme.

Dans la pratique, la plupart des réseaux de métro se composent de lignes indépendantes avec, parfois, des embranchements. Chaque ligne est exploitée indépendamment pour assurer une fiabilité optimale de la desserte tandis que les nombreuses

correspondances sont facilitées par une conception et une organisation minutieuse des stations, une information de qualité, de bonnes conditions de sécurité et des aménagements divers. Des réseaux de métro très étendus, comme ceux de Paris (**Figure 4**) et Tokyo sont exclusivement constitués de lignes indépendantes.

Toutefois, il ne faut pas en déduire qu'une exploitation intégrée des lignes ne peut se faire avec succès. Le Rapid Transit System de New-York comporte un réseau extrêmement complexe de lignes qui se recoupent et se chevauchent et il fonctionne très bien depuis de nombreuses décennies. Sa fiabilité est moindre que celle

Tableau 2. Réseaux avec lignes indépendantes et intégrées

Caractéristiques	Exploitation indépen.		Exploitation intégrée	
	Règle	Exemple	Règle	Exemple
Nombre de lignes	$n/2$	3	$n(n-1)/2$	15
Fréquence	f	15	$f/(n-1)$	3
Correspondances	nombreuses		néant	
Fonctionnement	simple		complexe	

Direkte Linien, aber die Wartezeit ist 2,5 mal länger

Haltestellen auf verschiedenen Linien fahren, an den Kreuzungsstellen zwischen den Linien umsteigen müssen. Als Alternativlösung können die ein Netz bildenden Linien integriert werden, so daß die TUs einer Linie zu mehreren anderen Linien fahren können; dies bedeutet, daß die Linien aus sich überschneidenden Streckenführungen im Netz bestehen. Bei dieser Betriebsform kann ein diversifizierte- und flexiblerer Dienst angeboten werden, und die Zahl der Umsteige-fälle wird vermindert. Andererseits ist die betriebliche Komplexität größer, so daß es schwieriger wird, einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten. Hinzu kommt, daß der Betrieb einer großen Zahl sich überschneidender Linien zu einer Verringerung der Bedienungshäufigkeit auf jeder einzelnen Linie führt. Dies wird durch ein einfaches Modell eines U-Bahn-Netzes illustriert, das den U-Bahn-Netzen in Leningrad, Montreal und Taschkent ähnelt.

Nehmen wir an, daß ein Netz sechs Endpunkte durch drei Linien miteinander verbindet, wie in **Abb. 3** (Seite 307) gezeigt. Werden diese Linien unabhängig betrieben (Skizze (a)), wie dies in den genannten Städten ge-

Tabelle 2. Netze mit unabhängigen und mit integrierten Linien

Merkmale	Unabhängiger Betrieb.		Integrierter Betrieb	
	Allgemein	Beispiel	Allgemein	Beispiel
Zahl der Linien bzw. Routen	$n/2$	3	$n(n-1)/2$	15
Bedienungshäufigkeit auf jeder Route	f	15	$f/(n-1)$	3
Umsteigen	Oft		Unnötig	
Netzbetrieb	Einfach		Komplex	

schieht, und zwar z.B. mit einer Frequenz von 15 TU/h auf jeder Linie, was einer Zugfolgezeit von 4 min. entspricht, so können die Fahrgäste zwischen jeweils zwei Haltestellen mit einmaligem Umsteigen fahren und haben dabei eine Wartezeit von insgesamt 4 min : die halbe Zugfolgezeit oder 2 min. an ihrer Zustiegehaltestelle und 2 min. an der Umsteige-haltestelle. Wird der Betrieb integriert, mit direkten Linien zwischen allen sechs Endhaltestellen, wie in Skizze (b) dargestellt, so braucht kein Fahrgast umzusteigen, aber die Bedienungshäufigkeit auf jeder Linie beträgt $15/5 = 3$

TU/h. Aufgrund der durchschnittlichen Zugfolgezeit von 20 min. erhöht sich die mittlere Wartezeit auf 10 min. und ist damit 2,5 mal länger als beim unabhängigen Linienbetrieb.

In parametrischer Form ausgedrückt würde ein Netz einzelner Linien, die außenliegende Punkte miteinander verbinden und ein Fahrgastvolumen bedienen müssen, das eine Bedienungshäufigkeit f erfordert, bei den beiden Betriebsformen die Merkmale aufweisen, die in **Tabelle 2** enthalten sind.

Hieraus ergibt sich, daß der Nutzen des Wegfalls eines Umsteige-falles für

Compared with trunk/branches, the trunk/feeder operation (Fig. 6) has the following advantages (+) and disadvantages (-):

- + Use of higher-performance vehicle or mode on the trunk possible;
- + More reliable and more regular services (delays are not transferred between trunk and feeders);
- + Stronger image and higher ridership attraction;
- + Lower operating costs;
- + Higher utilization of capacities possible on all lines;
- Requires more passenger transfers;
- Requires larger station and transfer facilities.

Consequently, the decision whether or not to replace integrated operation (trunk with branches) by an independent operation (trunk with feeders) mainly depends on the benefits on the trunk (improved service for passengers and greater efficiency for the operator) vs. the additional transfers and more complicated station/transfer facilities. Generally, the

conditions that mostly influence this trade-off and favour the introduction of a trunk/feeder system are a large number of feeders, a great difference in volumes between the trunk and individual feeders, and passenger volumes on the trunk which are close to capacity. Independent operation allows higher trunk capacity and reliability because large TUs operate at regular headways instead of smaller vehicles (buses) at very high frequency and irregular intervals. The problem of scheduling convergence of TUs from several branches, discussed in the following section, must also be considered in making the selection between branch and feeder type operation.

This analysis is applicable particularly to a situation common for contemporary cities which have major corridors with numerous converging bus lines. At a certain volume the passenger density, service irregularity and high operating cost make the upgrading of the trunk section into a rail line a logical development. This has been the case, for example, with introducing or extending metro systems in Atlanta, Hamburg, Montreal and Toronto, regional rail systems in San Francisco (BART) and

Munich (S-Bahn), light rail in Newcastle, Portland and Sacramento. Even in some cases where buses remain the only mode, some suburban routes are converted to feeders (El Monte in Los Angeles). In several cities all suburban bus routes are terminated at major, specially designed terminals where passengers transfer to buses better suited for the high capacity trunk operation; Denver and Porto Alegre are examples of this type of operation.

Consequently, the decision to build a rail transit line on the trunk is usually based on two groups of reasons. The first is independent of technology: it represents the advantages of trunk/feeder over trunk/branches network in terms of a **superior type of operation**; and second, it introduces rail systems — a mode with **higher service quality** and **stronger passenger attraction**.

Choix du mode de transport «à la carte»

de réseaux plus simples, mais la diversité des tracés, les différents services (express/local, arrêts alternés, etc.) et la souplesse de son exploitation sont des atouts incontestables. On relève une relative complexité dans les réseaux de métro de Chicago, Londres et Stockholm ainsi que dans plusieurs réseaux de métro léger et de rail régional. Ces derniers se distinguent essentiellement par un grand nombre d'embranchements, un point que nous examinerons en détail dans le chapitre suivant.

La **Figure 5** (page 319) représente le réseau extrêmement complexe et les lignes de la Division B (anciennement BMT/IND) du métro de New-York (Rapid Transit System).

En conclusion, l'exploitation intégrée de lignes de métro permet des dessertes plus directes et plus diversifiées que l'exploitation indépendante; cependant, elle est davantage exposée aux irrégularités et aux perturbations. Ce système d'exploitation n'est donc performant que si la fréquentation des lignes n'atteint pas le point de saturation et s'il utilise un système d'aide à l'exploitation efficace.

3. Magistrale avec embranchements ou magistrale avec lignes de rabattement

On rencontre généralement les taux de fréquentation les plus élevés sur les lignes radiales, que ce soit en provenance ou en direction du centre. Lorsque ce type de demande est faible ou modéré, la solution la mieux adaptée consiste à prévoir quelques lignes radiales partant du centre vers la périphérie dans plusieurs directions et desservant une vaste zone de banlieues à faible densité de population. Lorsque les zones périphériques s'étendent, que les taux de fréquentation augmentent et que les lignes se multiplient, l'exploitation peut se heurter à des problèmes opérationnels et de rentabilité. On peut alors améliorer la fiabilité et l'efficacité en transformant les magistrales avec embranchements en des magistrales avec lignes de rabattement, c'est-à-dire que magistrale et embranchements sont placés sous exploitation séparée.

Cette séparation permet d'utiliser les voitures, les emprises et les méthodes d'exploitation les mieux adaptées à chacun des deux éléments de la ligne: un système à plus forte capacité et à plus hautes performances sur la magistrale que sur les lignes de rabattement.

Il existe plusieurs solutions pour améliorer une magistrale:

1. Même type de véhicules, mais exploitation et horaires distincts;
2. Voitures à plus forte capacité et à plus hautes performances;
3. Adaptation des emprises (partiellement ou totalement séparées);
4. Recours à un mode de transport différent (en règle générale, le rail remplace l'autobus).

Par comparaison avec le système des magistrales avec embranchements, le système des magistrales avec lignes de rabattement (Figure 6) présente les avantages (+) et les inconvénients (-) suivants:

- + Possibilité d'utiliser des véhicules ou modes de transport à plus hautes performances sur la magistrale. .../..

Auswahl des Verkehrsmittels «à la carte»

bestimmte Fahrgäste durch Integrierung der Linien dadurch erkaufte wird, daß die meisten Fahrgäste länger warten müssen und eine größere Komplexität des Netzbetriebs verursacht wird. Wie groß diese Nachteile sind, ist von der Ausdehnung des Netzes, seiner Gestaltung und der Betriebsart abhängig. Bei Netzteilen mit drei oder vier Linien hält sich die betriebliche Komplexität meist in Grenzen, aber bei einer steigenden Zahl sich überschneidender Linien kann dies exzessiv werden.

In der Praxis bestehen die meisten U-Bahn-Systeme aus unabhängigen Linien, manchmal mit Abzweigungen. Der unabhängige Linienbetrieb wird zur Erzielung einer maximalen Betriebszuverlässigkeit gewählt, während die große Zahl der erforderlichen Umsteigegefälle durch eine sorgfältige Planung und Anordnung der Haltestellen, gute Fahrgastinformation, Sicherheit und verschiedene sonstige Annehmlichkeiten bewältigt wird. Selbst große U-Bahn-Systeme wie Paris (siehe **Abb. 4**) und Tokio bestehen ausschließlich aus unabhängigen Linien.

Hieraus darf jedoch nicht der Schluß gezogen werden, daß der inte-

griierte Betrieb von U-Bahn-Linien unter allen Umständen erfolglos bleiben muß. So verfügt das öffentliche Verkehrssystem in New York über ein außerordentlich komplexes Netz miteinander verbundener Linien und betreibt dieses Netz seit vielen Jahrzehnten mit großem Erfolg. Seine Zuverlässigkeit ist geringer als bei einfacheren Systemen, aber die Diversität der Routen, die Verschiedenartigkeit des Leistungsangebots (Expresverkehr, Ortsverkehr, Überspringen von Haltestellen usw.) und die betriebliche Flexibilität sind eindeutige und einzigartige Vorzüge. Eine bestimmte Komplexität der Netze besteht auch in den U-Bahn-Systemen in Chicago, London und Stockholm sowie bei einer Reihe von Stadtbahn- und Regionalverkehrssystemen. Die letzteren sind insbesondere durch eine große Zahl von Zweigstrecken gekennzeichnet, die im folgenden Abschnitt näher erörtert werden.

Abb. 5 (Seite 319) zeigt das höchst komplexe Netz und die Strecken der Abteilung B (früher: BMT/IND) des New Yorker U-Bahn-Systems (Rapid Transit).

Abschließend kann daher festgestellt werden, daß der integrierte Betrieb von U-Bahn-Linien direktere und

diversifiziertere Verkehrsangebote ermöglicht als ein unabhängiger Betrieb; andererseits reagiert der unabhängige Betrieb empfindlicher auf Unregelmäßigkeiten und Störungen. Er kann daher nur dann effizient verlaufen, wenn die Linien unterhalb ihrer Kapazitäts-Obergrenzen belastet werden und wenn sie über ein gut funktionierendes Betriebskontrollsystem verfügen.

3. Hauptverkehrsstrecken mit Zweigstrecken oder Hauptverkehrsstrecken mit Zubringern

Das stärkste Fahrgastaufkommen ist normalerweise auf den radial in die oder aus den Stadtkernen führenden Strecken festzustellen. Ist dieser Verkehrsbedarf hingegen schwach oder mittel, dann ist es am besten, wenn von einem wichtigen Zentralpunkt des Stadtkerns aus nur einige wenige

▲ **Figure 6. Radial transit line with branches and with feeders.**

● **Figure 6. Ligne radiale de transport en commun avec embranchements et avec lignes de rabattement.**

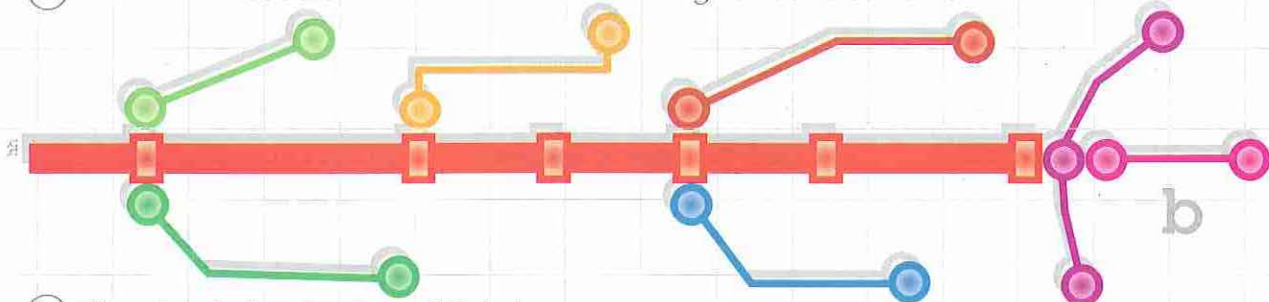
■ **Abbildung 6. Radiale Verkehrsstrecke mit Zweigstrecken und Zubringern.**

Ⓐ Trunk with branches ♦ *Tronc commun avec embranchements*



Ⓐ Hauptverkehrsstrecke mit Zweigstrecken

Ⓑ Trunk with feeders ♦ *Tronc commun avec lignes de rabattement*



Ⓑ Hauptverkehrsstrecke mit Zubringern

4. Operational aspects of trunk lines with branches

Trunk lines with branches, as well as other merging and overlapping lines, require careful design and scheduling to coordinate services on the joint and separate sections. The schedule should ensure **optimum capacity utilization** and **regularity of service**. This is particularly important if the joint (trunk) line section operates close to its capacity, when irregular services may cause unreliable operations. The type of scheduling, however, varies greatly among modes due to their different physical and operational characteristics.

4.1 Factors Influencing Line Merging Operations

Street transit (buses, trolleybuses and streetcars), being subject to street delays, cannot be operated with great

precision. Controlled only visually by their drivers, these vehicles merge as they arrive at the converging point and trunk operation is subject to irregularities; however, operation with very short headways is possible.

Light rail transit is usually also operated visually, but trunk sections are often signalized. This limits the shortest headway or highest frequency that can be operated and requires precise scheduling of converging branches.

Metro and **regional rail** TUs, which can have different numbers of cars, are always controlled by signals and their minimum headways are usually in the range of 1.5 to 2.5 minutes. This capacity constraint on the trunk limits headways on branches to the multiple of the number of branches. For example, if a trunk with 2-min. headways divides into two equally loaded branches, each one can have only 4-min. headways; for five branches, each one can operate only 10-min. headway. The only exception to this is if short TUs from branches are coupled at the merging point into long TUs (as practiced on light rail lines in San Francisco), so that the same headways can be operated on the trunk and on each branch.

To achieve efficient and reliable operation, metro trunk/branch lines should always be precisely scheduled. Based on critical passenger volumes for the trunk and for each branch, TU sizes and frequencies should be computed. Then the schedules of trunk and branches must be reconciled.

4.2 Classification of Trunk/Branch Schedules

Various methods of scheduling trunk/branch operations are illustrated here on the simplest example: a line with two branches. It is assumed that passenger volume on the trunk T, P-eb-T, determines the required sizes and frequencies of TUs. The two branches, designated as A and B, may have equal or different passenger volumes. Eight different cases of schedules are defined and listed in **Table 3** (see page 314); three of the cases, i, iii and viii are graphically illustrated in **Fig. 7**.

Cases i and ii in Table 3 have similar passenger volumes on the two

Transformation en ligne ferrée : une évolution logique

...

- + *Desserte plus fiable et régulière (les retards ne se répercutent pas entre la magistrale et les lignes de rabattement).*
- + *Meilleure image de marque et plus d'attrait pour les voyageurs.*
- + *Coûts d'exploitation réduits.*
- + *Meilleure utilisation des capacités sur toutes les lignes.*
- *Nécessite plus de correspondances pour les passagers.*
- *Nécessite des points d'arrêt et de correspondance plus grands.*

Par conséquent, la décision de remplacer ou non une exploitation intégrée (magistrale avec embranchements) par une exploitation indépendante (magistrale avec lignes de rabattement) est largement fonction de la comparaison des avantages retirés sur la magistrale (meilleure desserte pour l'usager et efficacité accrue pour l'exploitant) avec le nombre plus élevé des correspondances et la cons-

truction plus élaborée des points d'arrêt et de correspondance. En règle générale, les arguments qui jouent le plus dans la comparaison et plaident en faveur du système de magistrale avec lignes de rabattement sont un nombre élevé de lignes de rabattement, de fortes différences de fréquentation entre la magistrale et chaque ligne de rabattement et des taux de fréquentation proches de la saturation sur la magistrale. L'exploitation indépendante permet une fiabilité et des capacités accrues sur la magistrale qui peut accueillir des voitures de grandes dimensions y circulant à intervalles réguliers au lieu de véhicules plus petits (autobus), extrêmement fréquents et irréguliers. Il faut aussi, au moment du choix, tenir compte du problème de la synchronisation des voitures venant des différents embranchements, problème dont nous parlerons dans le chapitre suivant.

Cette analyse s'applique tout particulièrement à la situation retrouvée dans toutes nos villes où existent de grands couloirs avec de nombreuses lignes d'autobus convergentes. Une fois atteint un certain plafond en termes de voyageurs transportés, l'irrégularité de la desserte et l'augmentation des coûts d'exploitation font de

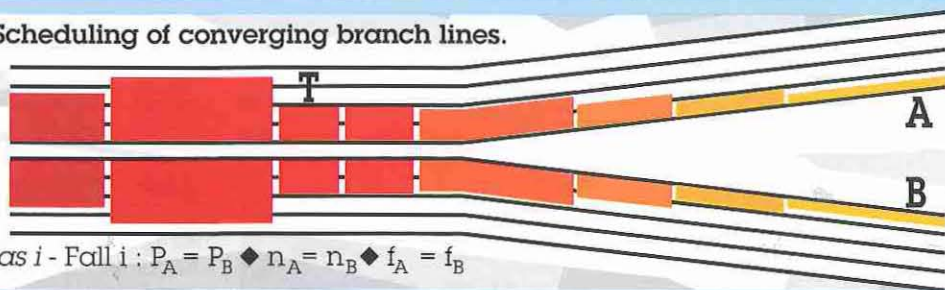
la transformation de la magistrale en une ligne ferrée une évolution logique. Tel fut par exemple le cas de la création ou l'extension des métros d'Atlanta, Hambourg, Montréal et Toronto, des réseaux de rail régional de San Francisco (BART) et de Munich (S-Bahn), des métros légers de Newcastle, Portland et Sacramento. A un point tel que, dans certains cas où l'autobus est le seul mode de transport en service, certains tracés suburbains sont transformés en lignes de rabattement (El Monte à Los Angeles). Dans plusieurs villes, toutes les lignes d'autobus suburbains aboutissent à de grands terminus conçus à cet effet où les voyageurs embarquent à bord d'autres autobus mieux adaptés à la desserte d'une magistrale à forte capacité. C'est notamment le cas de Denver et de Porto Alegre.

Par conséquent, la décision de construire une ligne de transport en commun sur rail s'inspire généralement de deux types de considérations. La première considération est étrangère à la technologie; elle part des avantages du système magistrale/lignes de rabattement qui, par rapport au système magistrale/ embranchements, en fait une **exploitation d'un niveau**

▲ Figure 7. Scheduling of converging branch lines.



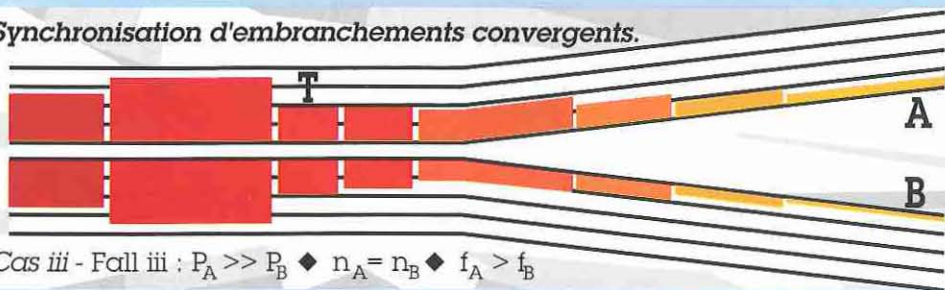
Case i - Cas i - Fall i : $P_A = P_B \blacklozenge n_A = n_B \blacklozenge f_A = f_B$



● Figure 7. Synchronisation d'embranchements convergents.



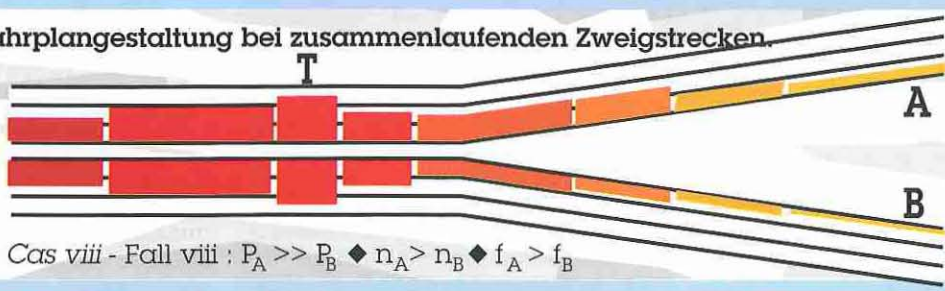
Case iii - Cas iii - Fall iii : $P_A \gg P_B \blacklozenge n_A = n_B \blacklozenge f_A > f_B$



■ Abb. 7. Fahrplangestaltung bei zusammenlaufenden Zweigstrecken.



Case viii - Cas viii - Fall viii : $P_A \gg P_B \blacklozenge n_A > n_B \blacklozenge f_A > f_B$



Umbau in eine Schienenverbindung : eine logische Entwicklung

Strecken nach außen führen, die sich später in eine Anzahl von Zweigstrecken teilen, die in mehrere Richtungen führen und auf diese Weise ein größeres Gebiet weniger dicht besiedelter Vorstädte bedienen. Bei zunehmender Größe der Vororte und einem wachsenden Fahrgastaufkommen kann die Überschneidung der Linien und ihr gemeinsamer Betrieb zu betrieblichen Problemen und wirtschaftlicher Ineffizienz führen. Die Zuverlässigkeit und Effizienz können verbessert werden, wenn aus den Hauptverkehrsstrecken mit Zweigstrecken Hauptverkehrsstrecken mit Zubringern gemacht werden, d.h. wenn die Hauptverkehrsstrecken von den Zweigstrecken betrieblich getrennt werden. Diese Trennung ermöglicht den Einsatz optimaler Fahrzeuge, die Reservierung eigener Trassen und spezielle Betriebsverfahren in jedem der beiden Teile des Netzes. Dies führt zu einer höheren Kapazität und Leistungsfähigkeit auf der Hauptverkehrsstrecke als auf den Zubringerstrecken.

Eine Hauptverkehrsstrecke kann auf verschiedene Weise leistungsgesteigert werden :

1. Gleicher Fahrzeugtyp, Betrieb und Fahrplangestaltung jedoch getrennt;
2. Fahrzeuge mit größerer Kapazität und höherer Leistung;
3. Bau leistungsfähigerer Trassen (voll oder teilweise separat);
4. Einführung einer anderen Verkehrsart (meist der Ersatz von Bussen durch Schienenverkehrsmittel).

Im Vergleich zu Hauptverkehrsstrecken mit Abzweigungen besitzt der Betrieb von Hauptverkehrsstrecken mit Zubringern (Abb. 6 Seite 311) die folgenden Vorteile (+) bzw. Nachteile (-) :

- + Möglichkeit des Einsatzes leistungsfähigerer Fahrzeuge oder Verkehrsarten auf der Hauptverkehrsstrecke;
- + zuverlässigerer und regelmäßigerer Dienst (Verspätungen pflanzen sich nicht zwischen den Hauptverkehrsstrecken und den Zubringern fort);
- + besseres Image und stärkere Anziehungskraft für die Fahrgäste; .../..

- ...
- + niedrigere Betriebskosten;
- + Möglichkeit der besseren Kapazitätsausnutzung auf allen Linien;
- erfordert häufigeres Umsteigen;
- erfordert größere Haltestellen und Umsteigeeinrichtungen.

Die Entscheidung darüber, ob der integrierte Betrieb (Hauptverkehrsstrecke mit Abzweigungen) durch einen unabhängigen Betrieb (Hauptverkehrsstrecke mit Zubringern) ersetzt werden soll, hängt daher in erster Linie von dem Nutzeffekt für die Hauptverkehrsstrecke (verbessertes Leistungsangebot an die Fahrgäste und größere Effizienz für den Betreiber) ab. Dem stehen das größere Umsteigervolumen und die komplizierteren Haltestellen/Umsteigeeinrichtungen gegenüber. Zu den Voraussetzungen, die diese Entscheidung am stärksten beeinflussen und zugunsten der Einführung eines Systems von Hauptverkehrsstrecken mit Zubringern sprechen, gehören im all-

Table 3 : Different types of scheduling for trunk/branch lines

Case	h	n	f	h	Regular Operation
i	$P_A \approx P_B$	$n_A = n_B$	$f_A = f_B$	$h_T = 1/2 h_A = 1/2 h_B$	T,A,B
ii	$P_A \approx P_B$	$n_A = n_B$	$f_A = f_B$	$h_T = h_A = h_B$ COUPLING	T,A,B
iii	$P_A >> P_B$	$n_A = n_B$	$f_A > f_B$	h_T, h_B uniform h_A irregular	T,B
iv	$P_A >> P_B$	$n_A = n_B$	$f_A > f_B$	h_T irregular h_A, h_B uniform	A,B
v	$P_A >> P_B$	$n_A > n_B$	$f_A = f_B$	$h_T = 1/2 h_A = 1/2 h_B$	A,B
vi	$P_A >> P_B$	$n_A > n_B$	$f_A = f_B$	$h_T = h_A = h_B$ COUPLING	T,A,B
vii	$P_A >> P_B$	$n_A > n_B$	$f_A > f_B$	h_T, h_B uniform h_A irregular	B
viii	$P_A >> P_B$	$n_A > n_B$	$f_A > f_B$	h_T irregular h_A, h_B uniform	A,B

branches. Therefore TU lengths on the two branches, n_A and n_B , are equal, as are the frequencies f and, naturally, headways h . In Case i trains from the branches merge and result

in trunk headways equal to half of the branch headways; in Case ii, TUs are coupled, so that the same headways are operated on branches and the trunk. In both cases regular operation

(equal TU lengths and uniform headways) are operated on all three sections of the lines, T, A and B, as shown in the last column.

Cases iii through viii represent situations where passenger volumes on the two branches are very different and services from the trunk are divided unevenly between them. In Case iii (see Fig. 6), two TUs are sent to branch A, then one to branch B, so that branch A has irregular headways: one equal to hF , the next $2hF$; services on the trunk T and branch B are regular. In Case iv, headway: on branches are uniform but not equal, so that trunk headways vary; Case v has all regular headways, but different TU lengths for the branches; Case vi is the same as v, but TUs are coupled on the trunk. In Cases vii and viii, both train lengths and headways are different on the branches, one favouring the trunk, the other giving regular headways to the branches, but uneven headways to the trunk.

Choice among these cases varies in practice with the character of the line. The first cases are appropriate for many metro lines which have a long trunk and short branches, trunk operation dominates and it is therefore given regular service. In the cases

... 5 embranchements avec battements de 10 min. ...

supérieur. Deuxièmement, il s'agit d'un réseau ferroviaire, c'est-à-dire un mode de transport offrant une desserte de meilleure qualité et plus attrayant pour les voyageurs.

4. Caractéristiques opérationnelles des magistrales avec embranchements

Les magistrales avec embranchements ou autres lignes d'apport ou secondaires nécessitent énormément de soin au niveau de la conception et de la synchronisation pour coordonner les services sur les tronçons communs et les parties séparées. La synchronisation doit assurer une utilisation optimale de la capacité ainsi que la régularité de la desserte. Cet aspect est particulièrement important lorsque le tronçon commun (magistrale) est exploité à un point proche de la saturation, l'irrégularité de la desserte peut entamer la fiabilité de l'exploitation. Toutefois, le type de synchronisa-

tion varie sensiblement d'un mode de transport à l'autre en fonction de leurs caractéristiques physiques et opérationnelles.

4.1 Facteurs influençant la synchronisation

Le transport en voirie (autobus, trolleybus et tramways) étant soumis aux aléas de la circulation ne permet guère de précision dans les horaires. Pilotés uniquement à vue par leurs conducteurs, ces véhicules s'intègrent au trafic de la magistrale lorsqu'ils arrivent au point de connexion et la desserte de la magistrale risque d'en être perturbée. Toutefois, des battements très rapprochés restent possibles.

Le métro léger est lui aussi généralement piloté à vue, mais les magistrales ont souvent une signalisation. Cet élément fixe un battement minimum incompressible ou une fréquence maximum et impose une synchronisation précise des lignes convergentes.

Les rames de métro et de rail régional, qui peuvent se composer d'un nombre variable de voitures, sont toujours contrôlées par une signalisation et leurs écarts minimum se situent en général entre 1,5 et 2,5 minutes. Cette contrainte de capacité sur la magistrale limite les battements sur les embranchements au multiple du nombre d'embranchements. A titre d'exemple, lorsqu'une magistrale avec des battements de 2 minutes se divise en deux embranchements recevant chacun la moitié de la capacité, chaque embranchement doit avoir des battements de 4 minutes. Pour cinq embranchements, chacun doit avoir des battements de 10 minutes. La seule exception possible est le cas où les voitures ou petites rames venant des embranchements sont couplées au point de raccordement pour former de longues rames (comme cela se fait sur les lignes du métro léger de San Francisco), de sorte que les battements sont identiques sur la magistrale et sur les embranchements.

Pour une desserte efficace et fiable d'un réseau de métro, il faut une coordination précise entre la magistrale et les embranchements. La longueur des rames et les fréquences doivent être calculées en fonction des volumes cri-

Mindest-Zugfolgezeit: zwischen 1,5 und 2,5 min.

gemeinen eine große Zahl von Zubringern, ein großer volumenmäßiger Unterschied zwischen der Hauptverkehrsstrecke und den einzelnen Zubringern und ein Fahrgastaufkommen auf der Hauptverkehrsstrecke, das sich der Kapazitätsgrenze nähert. Der unabhängige Betrieb ermöglicht eine größere Kapazität auf der Hauptverkehrsstrecke und eine höhere Zuverlässigkeit, weil große TUs mit regelmäßigen Zugfolgezeiten fahren, anstelle von kleineren Fahrzeugen (Autobussen), die mit sehr hoher Frequenz, aber mit unregelmäßigen Abständen verkehren. Bei der Entscheidung zwischen dem Zweigstrecken- und dem Zubringerbetrieb muß aber auch das Problem der Fahrplangestaltung für die Einfädung der TUs aus mehreren Zweigstrecken in die Hauptverkehrsstrecke berücksichtigt werden. Dieses Problem wird im folgenden Abschnitt erörtert.

Diese Analyse gilt in erster Linie für eine Situation, wie sie im allgemeinen in den heutigen Städten angetroffen wird, in denen es eine große Zahl von Hauptverkehrsstrecken gibt, in denen zahlreiche Autobuslinien zusammenlaufen. Von einem bestimmten Volumen ab wird die Leistungssteigerung der Hauptverkehrsstrecke durch Umbau in eine Schienenverbindung infolge der Fahrgastdichte, der Unregelmäßigkeit der Verkehrsdienste und der hohen Betriebskosten zu einer logischen Entwicklung. Dies war z.B. bei der Einführung oder dem Ausbau der U-Bahnen in Atlanta, Hamburg, Montreal und Toronto, dem regionalen Schienenverkehrssystem BART in San Francisco, der Münchener S-Bahn und den Stadtbahnen in Newcastle, Portland und Sacramento der Fall. Selbst dort, wo Busse die einzige Verkehrsart geblieben sind, werden bestimmte Vorortlinien in Zubringerlinien umgewandelt, wie in El Monte in Los Angeles. In verschiedenen Städten enden alle Vorort-Buslinien in größeren, besonders dafür ausgelegten Endhaltestellen, in denen die Fahrgäste in andere Busse umsteigen, die für den Verkehr auf den Hauptverkehrsstrecken über eine besonders hohe Kapazität verfügen. Denver und Porto Alegre sind Beispiele für diese Betriebsform.

Der Beschluß, auf einer Hauptverkehrsstrecke eine Schienenverbindung einzurichten, beruht daher meistens auf zwei Kategorien von Gründen. Die erste hat mit den Fragen der Technologie nichts zu tun: sie geht von den Vorteilen einer Hauptverkehrsstrecke mit Zubringern gegenüber einer Hauptverkehrsstrecke mit Zweigstrecken (**überlegene Betriebsform**) aus; und zweitens wird dadurch ein Schienenverkehrssystem

eingeführt - eine Verkehrsart mit **höherer Service-Qualität** und **stärkerer Anziehungskraft** auf die Fahrgäste.

4. Betriebliche Aspekte von Hauptverkehrsstrecken mit Zweigstrecken

Hauptverkehrsstrecken mit Zweigstrecken benötigen - wie alle anderen zusammenlaufenden und sich überschneidenden Linien - eine besonders sorgfältige Planung und Fahrplangestaltung, um den Verkehr auf den getrennten und den gemeinsamen Strecken zu koordinieren. Der Fahrplan sollte eine **optimale Kapazitätsausnutzung** und eine **regelmäßige Bedienung** gewährleisten. Dies ist dann besonders wichtig, wenn sich der auf der gemeinsamen Hauptverkehrsstrecke geführte Verkehr an der Kapazitätsgrenze befindet, denn unter diesen Umständen können unregelmäßig fahrende Verkehrsmittel zu einem unzuverlässigen Betrieb führen. Aufgrund ihrer unterschiedlichen physischen und betrieblichen Merkmale gelten für die Fahrplangestaltung allerdings völlig verschiedene Maßstäbe.

4.1 Faktoren, die den Betrieb auf zusammenlaufenden Strecken beeinflussen

Der **Straßenverkehr** (Autobusse, Trolleybusse und Straßenbahnen) unterliegt dem Verkehrsfluß auf den Straßen und kann nicht mit großer Präzision betrieben werden. Diese Fahrzeuge werden von ihren Fahrern rein visuell gesteuert und ordnen sich je nach ihrem Eintreffen am Punkt ihrer Einfädung in den allgemeinen Verkehrsfluß ein. Der Verkehr auf der Hauptverkehrsstrecke ist daher zwangsläufig unregelmäßig; andererseits ist ein Betrieb mit sehr kurzen Fahrzeugfolgezeiten möglich.

Der **Stadtbahnverkehr** wird meistens ebenfalls auf Sicht gefahren, jedoch sind die Hauptverkehrsstrecken häufig mit Signalanlagen ausgerüstet. Die Untergrenze der Fahrzeugfolgezeit bzw. die Obergrenze der Bedienungshäufigkeit ist daher beschränkt und erfordert eine genaue Planung der zusammenlaufenden Zweigstrecken.

Die TUs der **U-Bahn** und des **regionalen Schienenverkehrs** mit unterschiedlicher Zahl von Fahrzeugen sind ausnahmslos signalgesteuert, und ihre Mindest-Zugfolgezeit liegt meistens zwischen 1,5 und 2,5 min. Durch diese Kapazitätsbeschränkung auf den Hauptverkehrsstrecken werden die Zugfolgezeiten auf den Zweigstrecken auf das entsprechende Vielfache der Zahl der Zweigstrecken beschränkt. Teilt sich z.B. eine Hauptverkehrsstrecke mit einer Zugfolgezeit von 2

Tabelle 3 : Verschiedene Arten von Fahrplänen für Hauptverkehrs-/Zweigstrecken (Siehe Text auf Seite 317)

Fall	h	n	f	h	Regelmäßiger Betrieb
i	$P_A \approx P_B$	$n_A = n_B$	$f_A = f_B$	$h_T = 1/2 h_A = 1/2 h_B$	T, A, B
ii	$P_A \approx P_B$	$n_A = n_B$	$f_A = f_B$	$h_T = h_A = h_B$ KUPPLUNG	T, A, B
iii	$P_A >> P_B$	$n_A = n_B$	$f_A > f_B$	h_T, h_B uniform h_A unregelmäßig	T, B
iv	$P_A >> P_B$	$n_A = n_B$	$f_A > f_B$	h_T unregelmäßig h_A, h_B uniform	A, B
v	$P_A >> P_B$	$n_A > n_B$	$f_A = f_B$	$h_T = 1/2 h_A = 1/2 h_B$	A, B
vi	$P_A >> P_B$	$n_A > n_B$	$f_A = f_B$	$h_T = h_A = h_B$ KUPPLUNG	T, A, B
vii	$P_A >> P_B$	$n_A > n_B$	$f_A > f_B$	h_T, h_B uniform h_A unregelmäßig	B
viii	$P_A >> P_B$	$n_A > n_B$	$f_A > f_B$	h_T unregelmäßig h_A, h_B uniform	A, B

Basic lines

where long branches converge on a short trunk section in the centre, typical for regional rail systems (e.g., Munich, Philadelphia), scheduling is done for branches, only being subject to capacity limitations on the trunk.

Trunk with branches : 7 and 13, with feeders 3 and 7.

Circle lines are found in the metro networks of Moscow and Glasgow, in Tokyo regional rail and in the Belgrade streetcar network.

cisco) requiring the transfer of most passengers. The second disadvantage is that their terminals are located in high density areas where land is most valuable and space least available. Streets are congested and tunnel construction expensive; consequently, the storage of vehicles for peak hour service is very difficult.

5. Types of transit lines

Geometric form and position in the city give transit lines certain functional and operational characteristics. Although some lines have irregular forms, many can be classified into several basic types. These basic types are, defined here and presented schematically in Fig. 8. They can also be seen in the rapid transit networks of some cities. The map of the Paris Metro (Fig. 4), for example, allows the following approximate classification of lines into types defined below :

Radial : 10 and 11;

Diametrical : 3, 4, 7, 8, 9 and 12;

Tangential : 5 and 13;

Circumferential : 2 and 6;

5.1 Radial, Diametrical, and Branch Lines

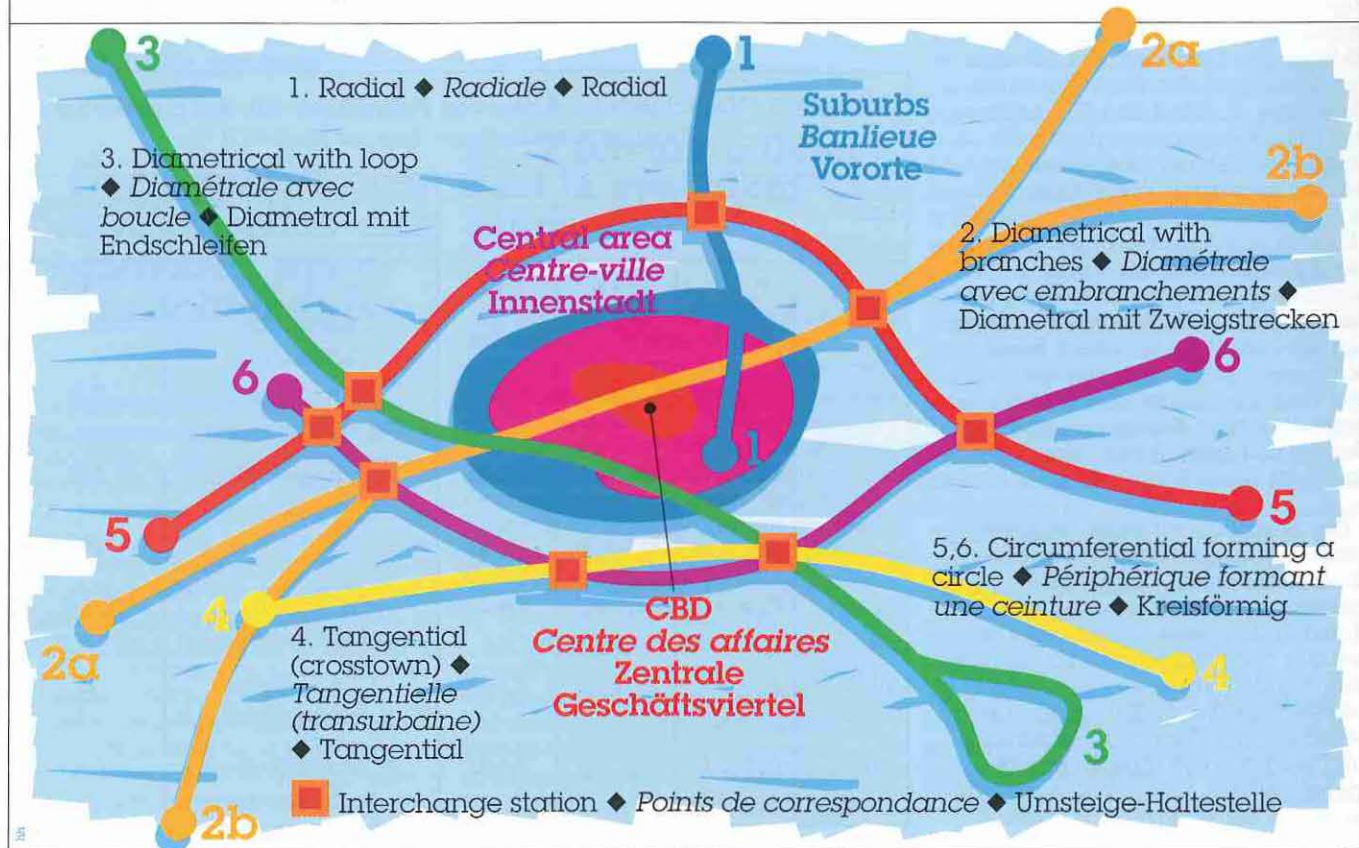
Radial lines, with one terminus in the centre, the other in suburbs, tend to follow the major demand directions. They are widely used for all transit modes. Some rapid transit lines (e.g. the Lindenwold Line in Philadelphia) and many regional rail systems consist of radial lines only, since railroad stations were often built as stub terminals. Examples of the latter are all British Railways' stations in London, and several of the railroad stations found in Paris, Moscow and other cities.

Radial lines have two major disadvantages. First, they offer limited distribution in the centre (drastic examples of this are the Southern Pacific and East Bay Terminals in San Fran-

Diametrical lines connect suburbs on different sides of the city centre. They follow radial directions, passing through the central area. These lines must be designed so that their two sections are balanced in terms of capacity requirements, permitting good equipment utilization. Diametrical lines are usually superior to radial lines because they offer better distribution and transfers with other lines and have no downtown terminals. One problem that diametrical surface (bus, streetcar) lines may have is the transfer of delays from their centre to their outward sections; with radial lines delays may be corrected at downtown terminals.

Integration of transit systems and greater attention given to networks instead of independent lines have led to increasing use of diametrical instead of radial lines. Many surface bus lines

▲ Figure 8. Types of transit lines.
● Figure 8. Types de lignes de transport en commun.
■ Abbildung 8. Arten von Verkehrsstrecken.



8 cas différents de synchronisation

tiques de voyageurs sur la magistrale et sur chaque embranchement. Ensuite, il faudra synchroniser les horaires des divers tronçons.

4.2 Synchronisation de la magistrale et des embranchements

Nous allons illustrer les différentes manières de synchroniser le trafic de la magistrale et des embranchements au moyen d'un exemple très simple : une ligne avec deux embranchements. Supposons que le volume des voyageurs sur la magistrale T, Pt, détermine la taille et la fréquence des rames. Les deux embranchements, A et B, peuvent avoir des taux de fréquentation égaux ou différents. Huit cas différents de synchronisation sont définis et repris au **Tableau 3**. Trois de ces cas - i, iii et viii - sont illustrés à la **Figure 7** (page 313).

Dans les cas i et ii du Tableau 3, on trouve des taux de fréquentation similaires sur les deux embranchements. Par conséquent, les rames circulant sur les deux embranchements, n_A et n_B , sont de même longueur; de même,

Tableau 3 : Différents types de synchronisation de la magistrale et des embranchements

Cas	h	n	f	h	Identité de fonction
i	$P_A \approx P_B$	$n_A = n_B$	$f_A = f_B$	$h_T = 1/2 h_A = 1/2 h_B$	T, A, B
ii	$P_A \approx P_B$	$n_A = n_B$	$f_A = f_B$	$h_T = h_A = h_B$ COUPLAGE	T, A, B
iii	$P_A \gg P_B$	$n_A = n_B$	$f_A > f_B$	h_T, h_B uniforme h_A irrégulier	T, B
iv	$P_A \gg P_B$	$n_A = n_B$	$f_A > f_B$	h_T irrégulier h_A, h_B uniforme	A, B
v	$P_A \gg P_B$	$n_A > n_B$	$f_A = f_B$	$h_T = 1/2 h_A = 1/2 h_B$	A, B
vi	$P_A \gg P_B$	$n_A > n_B$	$f_A = f_B$	$h_T = h_A = h_B$ COUPLAGE	T, A, B
vii	$P_A \gg P_B$	$n_A > n_B$	$f_A > f_B$	h_T, h_B uniforme h_A irrégulier	B
viii	$P_A \gg P_B$	$n_A > n_B$	$f_A > f_B$	h_T irrégulier h_A, h_B uniforme	A, B

les fréquences f et, bien sûr, les battements h sont identiques. Dans le cas i, les rames venant des deux embranchements se mêlent au trafic de la

magistrale où les battements sont deux fois plus courts que ceux des embranchements. Dans le cas ii, les rames sont couplées, de sorte que les

8 verschiedene Fahrplanmöglichkeiten

min. in zwei gleichermaßen belastete Zweigstrecken auf, so kann jede von ihnen nur eine Zugfolgezeit von 4 min. bewältigen. Bei fünf Zweigstrecken verlängert sich diese Zeit logischerweise auf 10 min. Die einzige Ausnahme von dieser Regel trifft dann zu, wenn kürzere TUs aus den Zweigstrecken am Vereinigungspunkt zu längeren TUs zusammengekoppelt werden, wie dies auf den Stadtbahnstrecken in San Francisco geschieht, so daß auf der Hauptverkehrsstrecke die gleichen Zugfolgezeiten eingehalten werden können wie auf den jeweiligen Zweigstrecken.

Zur Gewährleistung eines effizienten und zuverlässigen Betriebs sollten für U-Bahn-Hauptverkehrs- und Zweigstrecken stets präzise Fahrpläne aufgestellt werden. Die Größe der TUs und die Zugfrequenzen sollten auf der Grundlage der kritischen Fahrgastzahlen für die Hauptverkehrsstrecke und für jede Zweigstrecke genau berechnet werden. Die sich daraus ergebenden Fahrpläne müssen dann exakt aufeinander abgestimmt werden.

4.2 Möglichkeiten der Fahrplangestaltung für die Hauptverkehrsstrecke und die Zweigstrecken

Unter Zugrundelegung des einfachsten Falles - einer Hauptverkehrsstrecke mit zwei Abzweigungen - werden nachstehend verschiedene Methoden der Fahrplangestaltung dargestellt. Hierbei wird davon ausgegangen, daß das Fahrgastvolumen Pt auf der Hauptverkehrsstrecke T die erforderliche Größe und Frequenz der TUs bestimmt. Die beiden Zweigstrecken A und B können die gleichen oder unterschiedliche Fahrgastvolumina aufweisen. **Tabelle 3** (Seite 315) definiert und nennt acht verschiedene Fahrplanmöglichkeiten; drei dieser Fälle - i, iii und viii - sind in **Abb. 7** (Seite 313) graphisch dargestellt.

Die Fälle i und ii in Tab. 3 gehen beiden Zweigstrecken aus. Daher sind die Längen der TUs aus den beiden Zweigstrecken n_A und n_B , die Frequenzen f und selbstverständlich auch die Zugfolgezeiten h identisch. Im Fall

i fahren die Züge von den Zweigstrecken auf die Hauptverkehrsstrecke und führen dort zu einer Halbierung der für die Zweigstrecken geltenden Zugfolgezeiten; im Fall ii werden die TUs zusammengekoppelt, so daß auf den Zweigstrecken und der Hauptstrecke die gleichen Zugfolgezeiten eingehalten werden. In beiden Fällen ist der Betrieb auf allen drei Abschnitten der Gesamtstrecke T, A und B regelmäßig (d.h. gleiche TU-Längen und einheitliche Zugfolgezeiten), wie in der letzten Spalte dargestellt.

Die Fälle iii bis viii sind auf Situationen abgestellt, bei denen sich die Fahrgastvolumina auf den beiden Zweigstrecken stark voneinander unterscheiden und ihre Befahrung von der Hauptverkehrsstrecke aus ungleich verteilt ist. Im Fall iii (siehe Abb. 6) werden zwei TUs auf die Zweigstrecke A und dann eine TU auf die Zweigstrecke B geschickt, so daß auf der Zweigstrecke A unregelmäßige Zugfolgezeiten beachtet werden müssen : einmal h_T und das nächste Mal $2h_T$, während der Betriebsablauf auf der Hauptverkehrsstrecke T und der Zweigstrecke B regelmäßig ist. Im Fall iv sind die Zugfolgezeiten auf den Zweigstrecken einheitlich, aber nicht

Conversion of a radial network into a diametrical one

are of this type; most light rail and metro networks consist of diametrical lines. Several cities have undertaken major construction projects to convert their radial regional rail networks into diametrical: Munich's « Verbindungstunnel » has converted 11 radial lines into 6 diametrical lines; the Paris RER lines have the same role; a similar solution was implemented in Philadelphia, connecting the former Penn-Central and Reading lines.

The only major exceptions to this trend from radial to diametrical lines are express bus lines which are nearly exclusively radial; this is because they are designed to serve only commuters to the CBD. Thus they represent a special commuter transit service rather than a regular transit network.

Branch Lines are very common complements of radial and diametrical lines. They provide broader coverage in suburban areas, so that they represent a functionally logical network form. Street transit modes — bus and streetcar — usually have a limitation on the number of branches imposed by congestion and irregularity of services on the trunk; however, if the branches operate with long headways, it is possible to have as many as 10-12

branches.

On metro and regional rail systems the number of branches is limited by the minimum headway that can be operated on the trunk. Both frequency and regularity of services must therefore be carefully planned during the design of rail networks with branches, utilizing the types of analyses presented in the preceding section.

5.2 Tangential, Circumferential, Circle and Loop Lines

Lines serving non-centrally oriented travel can take several forms. **Tangential** or **crosstown lines**, following a tangential direction with respect to the city centre, are common in cities with a grid street pattern, such as Chicago, Philadelphia and Washington. They often operate on streets with major commercial activities, schools, etc., and are spaced several blocks from each other.

Demand is usually lower and less peaked on tangential than on radial

directions. Most tangential lines are operated by buses, although trolleybus, streetcar and even rapid transit tangential lines exist in Paris, Philadelphia, San Francisco, Toronto and other cities.

Circumferential lines, laid out around the central city, are often used in combination with radial lines. Sometimes these lines go around the whole central area, representing circle or ring lines. These lines usually have three functions. First, they provide connections among numerous medium-to-high density areas around the city centre. Second, they can be excellent distributors for regional rail lines: the Circle Line of London Underground connects seven British Railways stations. Third, circumferential lines connect radial lines for many suburb-to-suburb trips. Although this requires two transfers, it eliminates the need that all such trips have to follow circuitous travel via the city centre. These functions are particularly useful in spatially large cities, as is the case with the circle Metro line in Moscow and Yamanote Regional Rail line in Tokyo.

Passenger volumes on circumferential lines are not as peaked as those on radial lines, but passenger ex-

Priorité à la magistrale ou aux embranchements

battements sont les mêmes sur la magistrale et sur les embranchements. Dans les deux cas, on constate une identité de fonctionnement (même longueur des rames et battements identiques) sur les trois tronçons de la ligne, T, A et B, comme l'indique la dernière colonne.

Les cas iii à viii correspondent à des situations où les embranchements ont des taux de fréquentation fort inégaux et où la desserte venant de la magistrale est répartie inégalement entre ces deux embranchements. Dans le cas iii (Cf. Figure 6), deux rames sont dirigées vers l'embranchement A et une vers l'embranchement B et l'embranchement A a donc des battements irréguliers, le premier étant égal à h_p et le suivant à $2h_p$. Par contre les dessertes de la magistrale T et de l'embranchement B sont régulières. Dans le cas iv, les battements sur les embranchements sont réguliers mais ils ne sont pas égaux, ce qui fait varier les battements sur la magistrale. Dans le cas v, tous les battements sont réguliers, mais des rames de longueurs différentes circulent sur les deux embranchements. Le cas vi est identique au cas v, mais les rames sont couplées sur la magistrale.

Dans les cas vii et viii, les longueurs des rames comme les battements diffèrent d'un embranchement à l'autre; dans l'un c'est la magistrale qui a priorité et, dans l'autre, les battements des embranchements sont réguliers mais ils sont irréguliers sur la magistrale.

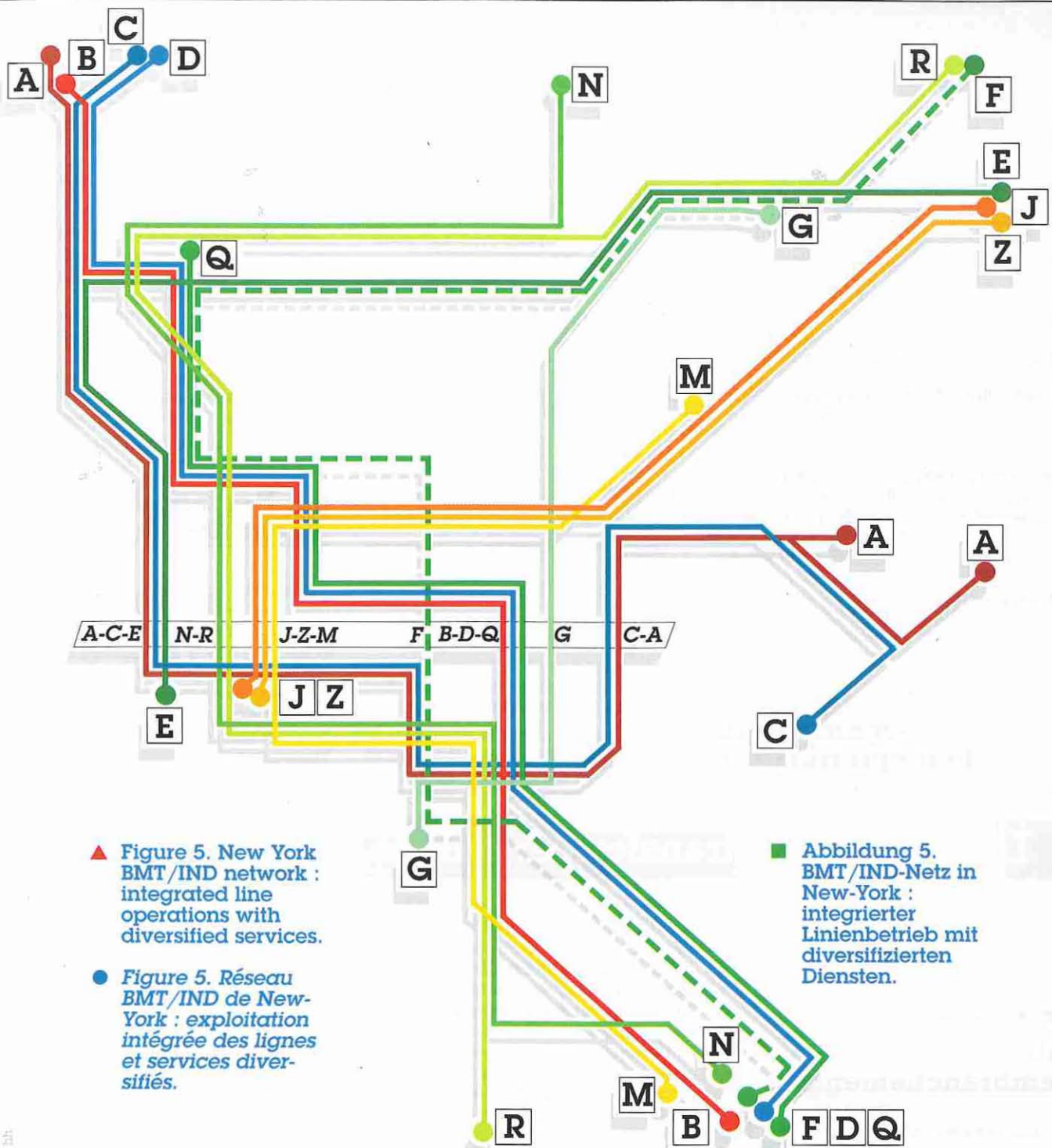
Dans la pratique, le choix entre ces diverses options est conditionné par les caractéristiques de la ligne. Les premiers cas conviennent à de nombreuses lignes de métro qui comportent une longue magistrale et de courts embranchements; la desserte de la magistrale y a priorité et les battements y sont donc réguliers. Lorsque de longs embranchements convergent vers une courte magistrale dans le centre de la ville, comme c'est généralement le cas pour les réseaux de rail régional (comme à Munich et Philadelphie), tout l'effort porte sur les embranchements et la seule contrainte est la saturation de la magistrale.

5. Types de lignes de transport en commun

Leur configuration et leur situation dans la ville confèrent aux lignes de transport en commun certaines caractéristiques fonctionnelles et opérationnelles. Bien que certaines lignes aient des formes irrégulières, beaucoup s'identifient à plusieurs types généraux. Ces types sont définis et présentés sous forme de schéma à la **Figure 8** (page 316). On les retrouve aussi dans les réseaux de transport en commun de plusieurs villes. Pour le plan du métro de Paris (Figure 4), par exemple, on peut classer les différentes lignes de la manière suivante :

- Radiales : 10 et 11
- Diamétrales : 1, 3, 4, 7, 8, 9 et 12
- Tangentielles : 5 et 13
- Périphériques : 2 et 6
- Magistrales avec embranchements : 7 et 13
- Magistrales avec lignes de rabattement : 3 et 7

On trouve des lignes de ceinture dans les réseaux de métro de Moscou



Hauptverkehrsstecke oder Zweigstrecke begünstigen

gleich, so daß die Zugfolgezeiten auf der Hauptverkehrsstecke schwanken. Im Fall v sind alle Zugfolgezeiten regelmäßig, jedoch sind die TU-Längen auf den Zweigstrecken unterschiedlich. Der Fall vi ist der gleiche wie der Fall v, jedoch werden die TUs auf der Hauptverkehrsstecke zusammengekoppelt. In den Fällen vii und viii sind sowohl die Zuglänge als auch die Zugfolgezeiten auf den Zweigstrecken unterschiedlich, wobei im einen Fall die Hauptverkehrs-

strecke begünstigt wird und im anderen Fall regelmäßige Zugfolgezeiten auf den Zweigstrecken, aber unregelmäßige Zugfolgezeiten auf der Hauptverkehrsstecke verursacht werden.

Die Auswahl zwischen diesen möglichen Fällen hängt in der Praxis von den jeweiligen Merkmalen der Strecke ab. Die ersten Fälle eignen sich für viele U-Bahnen, die eine lange Hauptverkehrsstecke und kurze Zweigstrecken haben, so daß der Verkehr auf der Hauptverkehrs-

strecke dominiert und daher eine regelmäßige Fahrplangestaltung erfährt. In den Fällen, in denen sich lange Zweigstrecken zu einer kurzen Hauptverkehrsstecke im Stadtzentrum vereinigen - was für regionale Schienenverkehrssysteme typisch ist (z.B. München, Philadelphia) - ist es am besten, die Fahrpläne nach den Erfordernissen der Zweigstrecken zu gestalten, wobei allerdings die Kapazitätsgrenzen der Hauptverkehrsstecke berücksichtigt werden müssen.

change is high since trip lengths are usually short; both characteristics result in good fleet utilization on these lines. Although functionally very good, circle lines have one operational problem: any delay which occurs on them is difficult to recover since there is no terminal with reserve time for this purpose. This fact also limits the operational flexibility of circle lines: operating speeds on them can only have discrete values — those resulting in cycle times which are integer multiples of the operated headway.

Loop lines consist of a major two-way segment and a closed-circle, usually one-way route at one end. Thus such lines may have one terminal only. They are often used for short-haul within CBD areas, or for collection/distribution of rapid transit passengers in CBD or in suburbs. The most famous example of this line type is the « Loop » of the Chicago Rapid Transit system.

6. Rail transit network type

Rail transit networks can be classified by their geometric forms into several types. Each type has some characteristic features.

6.1 Radial Networks

When most lines are radial and diametrical focusing on a small area in the CBD, they form a radial network. Briefly stated, the positive and negative characteristics of a radial network compared with other network types are:

- + Lines follow major travel directions, thus maximum ridership per kilometre of constructed line is achieved;
- + Most of the served trips require no transfer;
- Promotes extreme concentration of activities in a small CBD area;
- Does not attract those non-CBD oriented trips which would require

indirect travel via CBD with a transfer;

- Because of the high density of lines in a small CBD area, station shed areas overlap, reducing total area coverage.

The most typical radial networks are regional rail systems in most cities: London, Munich, New York, Paris, Philadelphia and many others. Rapid transit networks in Atlanta, Chicago, Philadelphia and Stockholm, are also radial. Light rail networks are usually more complex, but a basically radial orientation dominates in Bern, Boston, Gothenburg, San Francisco and many other cities.

6.2 Rectangular Networks

Networks consisting of a grid of lines can provide uniform area coverage. Trips between any two points are never excessively circuitous (rectangular at most) and require not more than one transfer. They are suited to urban areas with a predominantly even density of activities and do not stimulate develop-

Le lourd défi de transformer radiale en diamétrale

et Glasgow, dans le réseau de rail régional de Tokyo et dans le réseau de tramways de Belgrade.

5.1 Radiales, diamétrales et embranchements

Les **radiales**, dont une extrémité se trouve dans le centre-ville et l'autre dans la banlieue, correspondent généralement aux grands axes sur lesquels se concentre la demande. Elles sont abondamment utilisées pour tous les modes de déplacement. Certaines lignes rapides (comme la ligne Lindenwold à Philadelphie) et bon nombre de réseaux de rail régional ne sont en fait que des lignes radiales parce que les anciennes gares de chemins de fer étaient construites en cul-de-sac. C'est notamment le cas de toutes les gares de British Railways à Londres et de plusieurs gares de Paris, Moscou et d'autres villes.

Les radiales comportent deux grands inconvénients. Premièrement, elles ne permettent guère d'éclatement dans le centre-ville (les exemples les plus typiques sont le Southern

Pacific Terminal et le East Bay Terminal de San Francisco) et imposent à la plupart des voyageurs de prendre des correspondances. Le second inconvénient est que leurs terminus se trouvent dans des zones à forte densité où le prix du terrain est très élevé et l'espace très limité. Les rues sont encombrées et la construction de tunnels est onéreuse, ce qui rend très difficile le stationnement des voitures aux heures de pointe.

Les **diamétrales** relient les banlieues se trouvant aux extrémités opposées du centre-ville. Elles traversent le centre-ville de bout en bout en suivant la ligne diamétrale. Ces lignes doivent être conçues de telle sorte que leurs deux tronçons soient équilibrés en termes de capacité pour permettre une bonne utilisation du matériel. Les diamétrales sont souvent préférables aux radiales parce qu'elles permettent une meilleure répartition et des correspondances avec d'autres lignes et parce qu'elles n'ont pas de terminus dans le centre. Un problème que peuvent rencontrer les diamétrales de surface (autobus, tramways) est que les retards subis dans le centre-ville se répercutent sur les tronçons de banlieue. Avec les radiales, les

retards peuvent être corrigés au terminus du centre-ville.

L'intégration des réseaux de transport en commun et le regain d'intérêt manifesté pour les réseaux par opposition aux lignes indépendantes ont conduit à donner la préférence aux diamétrales plutôt qu'aux radiales. Bon nombre de réseaux d'autobus de surface sont composés de diamétrales, de même que la plupart des réseaux de métro léger et de métro lourd.

Plusieurs villes ont entrepris de grands travaux pour transformer leurs réseaux de lignes radiales de rail régional en diamétrales: le Verbindungstunnel de Munich a transformé 11 radiales en 6 diamétrales; le RER de Paris remplit la même fonction; une solution similaire a été adoptée à Philadelphie pour raccorder les anciennes lignes de Penn-Central et de Reading.

Les seules grandes exceptions à cette tendance sont les lignes d'autobus express qui sont presque toutes des radiales, ceci parce qu'elles ont exclusivement pour fonction de desservir les migrants journaliers se rendant au quartier des affaires de la ville. Il s'agit donc plutôt d'un service

5. Arten der Verkehrsstrecken

Infolge ihrer geometrischen Form und ihrer Standortwahl innerhalb einer Stadt erhalten die Verkehrsstrecken bestimmte funktionale und betriebliche Merkmale. Manche Strecken weisen unregelmäßige Formen auf, aber die meisten lassen sich in verschiedene Grundtypen einordnen. Diese Grundtypen werden in diesem Artikel definiert und in **Abb. 8** (Seite 316) schematisch dargestellt. Sie haben auch Eingang in die Nahverkehrsnetze mehrerer Städte gefunden. So ermöglicht die Verkehrsnetzkarte von Paris (Abb. 4) z.B. die folgende ungefähre Klassifizierung der Verkehrsstrecken in die nachstehend genannten Typen:

Radial: 10 und 11

Diametral: 1,3,4,7,8,9 und 12

Tangential: 5 und 13

Kreisförmig: 2 und 6

Hauptverkehrsstrecke mit Abzweigungen: 7 und 13, mit Zubringern 3 und 7.

Kreisförmige Strecken befinden sich in den U-Bahn-Netzen von Moskau und Glasgow sowie im regionalen Schienenverkehrsnetz von Tokio und im Straßenbahnnetz von Belgrad.

5.1 Radiale, Diametral- und Zweigstrecken

Radialstrecken mit einer Endhaltestelle im Zentrum und der anderen in einem Vorort folgen tendenziell den Hauptbedarfsrichtungen. Sie werden von allen Verkehrsarten ausgiebig genutzt. Manche Schnellverkehrsverbindungen (z.B. die Lindenwold-Strecke in Philadelphia) und viele regionale Schienenverkehrssysteme bestehen ausschließlich aus Radialstrecken, da die Eisenbahnhöfe seinerzeit ausnahmslos in der Form von Kopfbahnhöfen gebaut wurden. Beispiele hierfür gibt es in der Form sämtlicher Bahnhöfe der British Rail in London sowie mehrerer Eisenbahnhöfe in Paris, Moskau und in anderen Städten.

Radialstrecken weisen mehrere erhebliche Nachteile auf. Erstens bieten sie im Stadtzentrum nur beschränkte Verteilungsmöglichkeiten (drastische Beispiele sind die Southern Pacific und East Bay-Endhaltestellen in San Francisco, wo die meisten Fahrgäste umsteigen müssen). Der zweite Nachteil besteht darin, daß die Endhalte-

stellen in hochverdichteten Gebieten liegen, in denen die Grundstücke am teuersten und am knappsten sind. Die Straßen sind verstopft, und der Bau von Tunnels ist teuer. Die Bereitstellung von Fahrzeugen für die Hauptverkehrszeiten ist daher sehr schwierig.

Durch **Diametralstrecken** werden Vororte auf verschiedenen Seiten des Stadtzentrums miteinander verbunden. Sie sind ebenfalls radial angeordnet und führen durch das Stadtzentrum. Diese Strecken müssen so geplant werden, daß ihre beiden Abschnitte in bezug auf die Kapazitätsanforderungen ausgewogen sind und eine gute Geräteausnutzung ermöglichen. Diametralstrecken sind den Radialstrecken meist überlegen, weil sie eine bessere Verteilung und günstigere Umsteigemöglichkeiten zu anderen Strecken bieten und keine Endhaltestellen im Stadtzentrum besitzen. Ein Problem, das bei Oberflächen-Diametralstrecken (Bus, Straßenbahn) jedoch besteht, ist die Fortpflanzung von Verspätungen vom Stadtzentrum in die Außenbezirke; bei Radialstrecken können Verspätungen in den Endhaltestellen im Stadtzentrum korrigiert werden.

Die Integration von Verkehrssystemen und die größere Schwerpunktverlagerung auf Netze anstelle unabhängiger Linien hat zur gesteigerten Schaffung von Diametral- anstelle von Radialstrecken geführt. Viele Oberflächen-Buslinien gehören zu diesem Typ, die meisten Stadtbahn- und U-Bahn-Netze bestehen aus Diametralstrecken.

Verschiedene Städte haben umfangreiche Bauprojekte durchgeführt, um ihre radial angeordneten regionalen Schienenverbindungen in Diametralstrecken umzuwandeln: so hat der Verbindungstunnel in München elf Radialstrecken in sechs Diametralstrecken verwandelt. Die RER-Strecken in Paris verfolgen den gleichen Zweck. Eine ähnliche Lösung wurde in Philadelphia durchgeführt, wo die Strecken der früheren « Penn Central » mit den Reading-Strecken verbunden wurden.

Die einzigen größeren Ausnahmen von diesem Trend in Richtung auf diametrale Strecken sind die Autobus-Schnellverbindungen, die fast ausschließlich radial sind. Dies ist darauf zurückzuführen, daß ihr einziger Zweck darin besteht, Pendler in das zentrale Geschäftsviertel zu bringen. Sie sind daher eher als spezieller Pendlerverkehr anzusprechen denn als reguläre Verkehrsverbindung.

Zweigstrecken sind allgemein verbreitete Ergänzungen zu Radial- und diametralen Strecken. Sie bieten eine breitere Abdeckung in Vorstadtgebie-

ten, so daß sie eine funktional logische Netzform darstellen. Die Straßenverkehrsarten - Busse und Straßenbahnen - unterliegen meist einer Beschränkung der Zahl ihrer Zweigstrecken angesichts der Verkehrsstaus und dadurch verursachten Unregelmäßigkeiten des Verkehrsablaufs auf den Hauptverkehrsstrecken. Werden die Zweigstrecken jedoch mit langen Zugfolgezeiten betrieben, so ist es möglich, die Zahl der Zweigstrecken bis zu 10 oder 12 zu vergrößern.

Auf U-Bahn- und regionalen Schienenverkehrsverbindungen wird die Zahl der Zweigstrecken durch die Mindest-Zugfolgezeit beschränkt, die auf der Hauptstrecke eingehalten werden muß. Sowohl die Frequenz als auch die Regelmäßigkeit der Bedienung müssen daher bei der Planung von Schienenverkehrssystemen mit Zweigstrecken sorgfältig geplant werden, wobei die im vorhergehenden Abschnitt dargestellten Analysen benutzt werden können.

5.2 Tangential-, Umfahungs-, kreisförmige und Schleifenstrecken

Diejenigen Strecken, die nicht der Fahrgastbeförderung in und aus Stadtzentren dienen, können mehrere Formen annehmen. **Tangential-** oder **Querstrecken**, die am Stadtzentrum vorbeiführen, gibt es vielfach in Städten mit schachbrettartigem Straßenmuster, wie Chicago, Philadelphia und Washington. Sie fahren häufig auf Straßen mit umfangreichen kommerziellen Aktivitäten, Schulen usw. und liegen mehrere Straßenblocks voneinander entfernt.

Das Fahrgastaufkommen ist meist niedriger und weist weniger ausgeprägte Spitzenzeiten auf als die Radialstrecken. Die meisten Tangentialstrecken werden von Bussen befahren, aber in Paris, Philadelphia, San Francisco, Toronto und anderen Städten gibt es auf diesen Strecken auch Trolleybusse, Straßenbahnen und sogar Schnellbahnen.

Umfahrungsstrecken, die kreisförmig um die Innenstadt herumführen, werden häufig in Verbindung mit Radialstrecken geschaffen. Manchmal führen die Umfahrungsstrecken um das ganze Stadtzentrum herum und stellen einen **geschlossenen Kreis** dar. Sie haben meist drei Funktionen. Erstens verbinden sie zahlreiche mittel- bis hochverdichtete Stadtviertel miteinander. Zweitens können sie aus-

Interchange stations throughout the central area

ment of highly concentrated areas. However, because of these features in most cities they do not fit in well in travel patterns which are predominantly centrally oriented. Utilization of rectangular networks is therefore often limited, so that many of them can be efficiently served only by buses.

While many surface transit networks, particularly in U.S. cities, have rectangular patterns (Buffalo, Philadelphia, San Francisco), this is a less common form for rapid transit (metro) networks. One of the few such systems is Toronto: its network, consisting of rapid transit (metro), surface rail and bus routes, represents a regular rectangular network with lines following major arterial streets. Rapid transit networks in Barcelona, Osaka and Manhattan/New York also have generally rectangular patterns.

6.3 « Ubiquitous Coverage » Networks

In modern rapid transit planning there is an increasing consensus that for most cities a functionally designed

ubiquitous coverage network represents the most advantageous form. This type of network consists of diametrical lines passing through the central area, but not focused on one point: their interchange stations are dispersed throughout that area, providing larger coverage than a radial network. Toward suburbs some lines split into branches.

Consequently, ubiquitous coverage networks can incorporate major advantages of both radial and rectangular networks, i.e.:

- + Serve major passenger flows;
- + Provide good area coverage throughout the central area;
- + Provide access to concentrated points, but do not cause excessive congestion in a very small area;
- + Capture many non-CBD oriented trips;
- + Have relatively simple stations.

Good examples of ubiquitous coverage metro networks are represented by the Paris Metro, Munich U-Bahn and Tokyo subway. The Paris network (Fig. 4), is generally recognized as the most complete network, covering the entire urban area.

Acknowledgements

A NATO-CNR Senior Guest Fellowship enabled Prof. Vuchic to cooperate with Prof. Musso at the University of Salerno in the autumn of 1989. This paper is one of the results of that cooperation. The research was also supported by a grant from Consiglio Nazionale delle Ricerche. The authors gratefully acknowledge this assistance.

Bibliography

1. Rockwell, E., Notes on the Principles of Urban Railway Planning (1959) and Urban Railway Planning (1967); Working Papers of the Planning Office, London Transport Board.
2. F. Lehner, Regional Organization of Transport and Urban Development, Report 1, 38th Congress of the International Union of Public Transport (UITP), London, England, 1969.
3. H. D. Franz, Untersuchungen zur Planung von Verkehrsnetzen unter

Eviter de traverser le centre-ville...

spécial de transport de banlieue que d'un véritable réseau de transport en commun.

Les **embranchements** sont très souvent des prolongements des lignes radiales et diamétrales. Ils maillent très bien le tissu suburbain et constituent un réseau fonctionnellement logique. Les lignes en voirie (autobus et tramways) sont généralement limitées quant au nombre de leurs embranchements en raison des encombrements et de l'irrégularité de la desserte sur la magistrale. Toutefois, si les fréquences y sont suffisamment espacées, la ligne peut comporter jusqu'à 10 à 12 embranchements.

Pour le métro et les réseaux de rail régional, le nombre des embranchements est limité par les fréquences minimales possibles sur la magistrale. Fréquence et régularité du service doivent par conséquent être soigneusement étudiées au stade de la conception des réseaux ferrés comportant des embranchements. Pour ce faire, on a recours au type d'analyse dont nous avons parlé dans le chapitre précédent.

5.2 Tangentielles, périphériques, ceintures et boucles

Les lignes assurant une desserte qui n'est pas axée sur le centre-ville peuvent prendre plusieurs formes. Les lignes **tangentielles** ou **transurbaines**, qui suivent une trajectoire tangentielle par rapport au centre-ville, sont caractéristiques des tracés de ville en damier, comme à Chicago, Philadelphie et Washington. Elles empruntent souvent des rues où se trouvent beaucoup de commerces, des écoles, etc., et sont distantes de plusieurs pâtés de maisons.

La demande est généralement moindre et moins irrégulière sur les tangentielles que sur les radiales. La plupart des tangentielles sont des lignes d'autobus, bien qu'on trouve des lignes de trolleybus, de tramways et même des transports rapides sur les tangentielles de Paris, Philadelphie, San Francisco et Toronto notamment.

Les lignes **périphériques**, qui entourent le centre-ville, sont souvent combinées avec des radiales. Parfois, elles contournent l'ensemble de la

zone centrale et constituent alors des lignes de **ceinture**. En général, ces lignes ont trois fonctions. Premièrement, elles permettent de relier entre elles de nombreux quartiers à moyenne ou haute densité de population disposés autour du centre-ville. Deuxièmement, elles remplissent très bien une fonction de distribution pour les lignes de rail régional; c'est notamment le cas de la Circle Line du métro londonien qui relie sept gares de chemin de fer de British Railways. Troisièmement, les périphériques relient entre elles les radiales pour permettre de nombreux déplacements entre les faubourgs. Quoique ce type de trajet nécessite deux correspondances, il évite de traverser le centre-ville en suivant des itinéraires sinueux. Ces fonctions sont d'une utilité particulière dans les villes géographiquement très étendues, comme c'est le cas avec la ligne périphérique du métro de Moscou et la ligne de rail régional Yamanote à Tokyo.

La fréquentation des lignes périphériques n'est pas aussi élevée que sur les radiales, mais le taux de rotation des voyageurs est important parce

Suite du texte page suivante

que les trajets effectués sont généralement courts, deux facteurs qui contribuent à une bonne utilisation du parc de véhicules de ces lignes. Quoique très intéressantes d'un point de vue fonctionnel, les lignes périphériques présentent un problème opérationnel : les retards y sont difficiles à récupérer car ces lignes ne comportent pas de terminus où le retard peut être absorbé. Cet élément a aussi pour effet de limiter la souplesse des lignes périphériques : les vitesses commerciales ne peuvent avoir que des valeurs discrètes, celles donnant des temps de parcours qui sont des multiples entiers des battements.

Les **lignes en boucle** se composent d'un tronçon à deux sens et d'une boucle fermée, généralement à un seul sens, à une de ses extrémités. Ces lignes ne peuvent donc avoir qu'un seul terminus. Elles sont souvent utilisées pour les courtes distances dans les centres des affaires ou pour drainer/répartir les voyageurs des transports rapides dans ces centres ou les banlieues. L'exemple le plus connu de ce type de ligne est le « Loop » du Rapid Transit de Chicago.

6. Types de réseaux de transport en commun sur rails

Les réseaux de transport en commun sur rails peuvent être classés en plusieurs catégories suivant leur configuration. Chaque catégorie a ses caractéristiques propres.

6.1 Réseaux radiaux

Lorsque la plupart des lignes sont des lignes radiales et diamétrales concentrées sur un petit secteur du quartier des affaires de la ville, elles forment ce qu'on appelle un réseau radial. En quelques mots, les aspects positifs et négatifs d'un réseau radial par rapport aux autres types de réseaux sont les suivants :

- + Les lignes suivent les grands axes de déplacement et le taux de fréquentation au kilomètre est donc optimal.

- + La plupart des trajets ne nécessitent pas de correspondance.
- Ce type de réseau favorise une concentration extrême de l'activité en un centre très exigu.
- Il n'attire pas les déplacements qui ne vont pas en direction du quartier des affaires et qui pourraient pourtant se faire moyennant une correspondance.
- Etant donné la forte densité de lignes dans un centre limité, les aires de captage des points d'arrêt se chevauchent, ce qui a pour effet de réduire l'aire de captage totale.

Les réseaux radiaux les plus typiques sont les réseaux de rail régional qu'on trouve dans la plupart des villes, comme Londres, Munich, New-York, Paris, Philadelphie, etc. Les réseaux de transport en commun rapide d'Atlanta, Chicago, Philadelphie et Stockholm sont eux aussi des réseaux radiaux. Les réseaux de métro léger sont généralement plus complexes, mais on constate une dominante radiale à Bern, Boston, Göteborg, San Francisco, etc.

Das Stadtzentrum vermeiden

gezeichnete Verteiler für regionale Schienenverkehrssysteme sein : die ringförmige Londoner U-Bahn verbindet nicht weniger als sieben Bahnhöfe der British Rail miteinander. Drittens schaffen kreisförmige Strecken eine Verbindung zwischen Radialstrecken für zahlreiche Fahrten zwischen Vororten. Obgleich zu diesem Zweck zweimal umgestiegen werden muß, wird auf diese Weise die Notwendigkeit beseitigt, daß alle diese Fahrten auf verschlungenen Wegen durch das Stadtzentrum durchgeführt werden müssen. Diese Funktionen sind in räumlich ausgedehnten Städten von besonderer Bedeutung, wie im Falle der Ring-U-Bahn in Moskau und der Yamanote-Regionalbahn in Tokio.

Das Fahrgastaufkommen auf kreisförmigen Strecken ist nicht so stark auf Spitzenzeiten konzentriert wie auf Radialstrecken. Andererseits ist der Fahrgastwechsel besonders häufig, da die Fahrtfernen meist kurz sind. Diese beiden Merkmale führen zu einer guten Fahrzeugausnutzung auf diesen Strecken. Obgleich sie demnach funktionell gut sind, weisen kreisförmige Strecken dennoch ein betriebliches Problem auf : Verspätungen können nur mit großen Schwierigkei-

ten aufgefangen werden, weil diese Strecken nicht über Endhaltestellen mit Reservezeiten für diesen Zweck verfügen. Diese Tatsache beschränkt auch die betriebliche Flexibilität der kreisförmigen Strecken : die dort erreichten Betriebsgeschwindigkeiten haben nur Anhaltswert und stellen Produkte aus der Multiplikation der tatsächlichen Zugfolgezeiten dar.

Schleifenstrecken bestehen aus einem längeren zweibahnigen Teil und einem geschlossenen Kreis an einem Ende, der meist nur in einer Richtung befahren wird. Strecken dieser Art verfügen manchmal nur über eine einzige Endhaltestelle. Sie werden häufig für den Kurzstreckenverkehr im zentralen Geschäftsviertel oder für die Aufnahme bzw. Weiterbeförderung von Schnellbahnfahrern im zentralen Geschäftsviertel oder in Vororten gebaut. Das bekannteste Beispiel ist die Schleife des Schnellverkehrssystems in Chicago.

6. Arten von Schienenverkehrsnetzen

Schienenverkehrsnetze können aufgrund ihrer geometrischen Form in verschiedene Typen unterteilt werden. Jeder Typ besitzt bestimmte, charakteristische Merkmale.

6.1 Radiale Netze

Wenn die meisten Strecken radial geführt sind und konzentrisch auf ein kleines Gebiet im zentralen Geschäftsviertel zulaufen, dann bilden sie ein radiales Netz. Die positiven (+) und negativen (-) Merkmale eines radialen Netzes im Vergleich zu anderen Netztypen sind kurz zusammengefaßt die folgenden :

- + Die Strecken folgen den Hauptfahrtrichtungen, so daß je gebauetem Streckenkilometer eine Maximalzahl an Fahrgästen zu erwarten ist;
- + bei den meisten Beförderungsfällen ist kein Umsteigen notwendig;
- Förderung extremer Konzentrationen in einem kleinen zentralen Geschäftsviertel;
- zieht keine Fahrgäste an, die nicht in das zentrale Geschäftsviertel wollen, aber dennoch durch dieses

besonderer Berücksichtigung des öffentlichen Personennahverkehrs, Bundesminister für Verkehr, Abt. Strassenbau, Bonn, Federal Republic of Germany, 1975.

4. V. R. Vuchic, Transit Operating Manual, Pennsylvania Department

of Transportation, Harrisburg, PA 1978.

5. V. R. Vuchic, Metro Systems in Year 2000 : Modernization, Diversification and Expansion, UITP Revue, Vol. 35/4, 1986, pp. 307-334.
6. Antonio Musso and Vukan R.

Vuchic, Characteristics of Metro Networks and Methodology for Their Evaluation, Transportation Research Record 1162, Washington, DC 1988, pp. 22-33.

Points de correspondance dispersés en centre-ville

6.2 Réseaux en damier

Les réseaux constitués de lignes disposées en damier permettent un captage uniforme dans la zone qu'ils couvrent. Les trajets entre deux points quelconques sont rarement sinueux (rectangulaires au pire) et ne nécessitent pas plus d'une correspondance. Ils conviennent très bien aux zones urbaines ayant une densité d'activité uniforme et ne favorisent pas le développement de secteurs à forte concentration. Or, ces mêmes caractéristiques font que, dans la plupart des villes, ils correspondent mal aux habitudes de déplacement qui sont essentiellement axées sur le centre-ville. Par conséquent, les réseaux en damier sont peu fréquentés, de sorte que, pour beaucoup d'entre eux, des services d'autobus suffisent.

Quoique beaucoup de réseaux de surface soient en damier, surtout dans les villes américaines (Buffalo, Philadelphie, San Francisco), c'est là une forme peu répandue de réseau de métro. Un des rares exemples est celui de Toronto dont le réseau, composé de métro, de rail de surface et de lignes d'autobus, forme un damier parfait, les lignes suivant les grandes artères. Les réseaux de transport rapide de Barcelone, Osaka et Manhattan/New-York ont eux aussi une configuration d'ensemble en damier.

6.3 Les réseaux de couverture générale

En matière de planification des transports rapides modernes, dans la plupart des cas, un réseau de couverture générale conçu de manière fonctionnelle est, de l'avis général, la configuration la plus intéressante. Ce type de réseau se compose de lignes diamétrales traversant le centre-ville, mais qui ne convergent pas vers un seul point; leurs points de correspondance sont dispersés dans le centre ville, ce qui permet un captage beaucoup plus étendu qu'avec un réseau radial. Arrivées dans la banlieue, certaines lignes se séparent en plusieurs embranchements.

Par conséquent, les réseaux de couverture générale combinent les avantages des réseaux radiaux et des réseaux en damier, à savoir :

- + Ils desservent les couloirs où les taux de fréquentation sont les plus élevés.
- + Ils permettent une bonne couverture du centre-ville.
- + Ils assurent l'accès à des points rapprochés sans entraîner de graves encombrements dans une zone très réduite.
- + Beaucoup de déplacements ne sont pas axés sur le centre-ville.
- + Leurs points d'arrêt sont relativement simples.

On retrouve ce type de réseau de couverture générale dans le Métropolitain de Paris, le U-Bahn de Munich et le métro de Tokyo. Le réseau de Paris (Figure 4) est généralement considéré comme le plus complexe qui soit parce qu'il couvre la totalité de la zone urbaine.

Remerciements

L'octroi d'une bourse OTAN-CNR a permis au Prof. Vuchic de collaborer avec le Prof. Musso à l'Université de Salerne pendant l'automne 1989. Le présent rapport est un des fruits de cette collaboration. Leurs recherches ont également bénéficié d'une bourse du Consiglio Nazionale delle Ricerche. Les auteurs sont reconnaissants de l'aide qui leur a été ainsi apportée.

Bibliographie

Voir version anglaise (p. 322 et ci-dessus).

Starke Konzentration von Strecken in einem kleinen Gebiet

Viertel fahren und dort umsteigen müssen;

- infolge der starken Konzentration von Strecken in einem kleinen Gebiet kommt es zu Überschneidungen zwischen den Einzugsgebieten der Haltestellen und damit zu einer Einschränkung der Verkehrsabdeckung in der Innenstadt.

Bei den typischsten Radialnetzen handelt es sich in den meisten Städten um Schienenverkehrssysteme : London, München, New York, Paris, Philadel-

phia und viele andere. Die Schnellverkehrsbahnen in Atlanta, Chicago, Philadelphia und Stockholm fahren ebenfalls auf radialen Strecken. Stadtbahnssysteme sind gewöhnlich komplexer, aber in Bern, Boston, Göteborg, San Francisco und in vielen anderen Städten sind sie ebenfalls grundsätzlich sternförmig ausgelegt.

6.2 Rechteckige Netze

Durch Netze mit Strecken, die sich rechteckig kreuzen, kann eine einheitliche Gebietsabdeckung erzielt werden. Fahrten zwischen zwei Punkten sind niemals sehr verschlungen (schlimmstenfalls rechteckig) und erfordern höchstens ein einmaliges Umsteigen. Sie eignen sich für Städte mit im wesentlichen gleichförmiger Verteilung der innerstädtischen Aktivitäten und fördern nicht die Entwicklung hochkonzentrierter Gebiete. Aufgrund dieser Auslegung kommen sie aller-

G-MEX CENTRE

MANCHESTER

ENGLAND

MEET...
over 220 Exhibitors
from 15 Countries

AT THE MACK-BROOKS GROUP'S
2nd INTERNATIONAL LIGHT RAIL EXHIBITION

LIGHT RAIL 91

19-21 NOVEMBER 1991

The market interest is now so strong that the 2nd Light Rail International Exhibition in our Railtex series is double the size of our first show held in Bristol in 1989!

To obtain your visitor leaflet/registration form please telephone our 24 hour ticket hotline service on 0707 251 861 (or +44 707 251 861 if ringing from outside the UK).

Alternatively please write to: The Light Rail 91 Department, Mack-Brooks Exhibitions Ltd, Forum Place, Hatfield, Hertfordshire AL10 0RN, England. Fax: 0707 275 544.

ANNOUNCEMENT!

Our RAILTEX/LIGHT RAIL 93 International Exhibition will be held from 25-27 May 1993 in London, England. Details available from Mack-Brooks.

See you in Manchester



A
MACK-BROOKS
EXHIBITION



Umsteigestellen auf dem ganzen Gebiet

dings weniger für ein Fahrgastverhalten in Frage, das hauptsächlich zentral orientiert ist. Die Zahl rechteckiger Verkehrsnetze ist daher beschränkt, und sie bestehen in vielen Fällen aus Autobuslinien.

Während viele Oberflächen-Verkehrsnetze, insbesondere in den Vereinigten Staaten, eine rechteckige Form haben (Buffalo, Philadelphia, San Francisco), ist dies für Schnellverkehrsnetze eine weniger weit verbreitete Form. Eines dieser wenigen Systeme ist Toronto. Es besteht aus U-Bahn, Oberflächen-Schienenverkehrsmitteln und Autobusstrecken und besitzt die Form eines regelmäßigen Rechtecks, innerhalb dessen die Verkehrsstrecken den Hauptstraßen folgen. Die Schnellverkehrsnetze in Barcelona, Osaka und Manhattan/New York haben ebenfalls eine etwa rechteckige Form.

6.3 «Allgegenwärtige» Verkehrsnetze

Unter den heutigen Schnellverkehrsplanern besteht ein wachsender Konsens dahingehend, daß ein funk-

tionell geplantes **allgegenwärtiges Netz** für die meisten Städte die vorteilhafteste Form darstellt. Dieses Netz besteht aus diametralen Strecken, die durch die Innenstadt führen, aber nicht an einem bestimmten Punkt zusammenlaufen. Die Umsteigestellen verteilen sich auf das ganze Gebiet und bieten eine größere Abdeckung als ein radiales Netz. In Richtung auf die Außenbezirke teilen sich manche Strecken in Zweigstrecken auf.

Diese Netze bieten damit wesentliche Vorteile der radialen und der rechteckigen Netze, d.h. :

- + sie verkraften ein großes Fahrgastaufkommen;
- + sie bieten eine gute geographische Verkehrsabdeckung in der Innenstadt;
- + sie bieten Zugang zu konzentrierten Punkten, verursachen aber keine übertriebenen Ballungerscheinungen in einem sehr kleinen Gebiet;
- + sie ziehen viele Fahrten auf sich, die nicht in das zentrale Geschäftsviertel führen;
- + sie benötigen verhältnismäßig einfache Haltestellen.

Gute Beispiele für 'allgegenwärtige' U-Bahn-Netze sind die U-Bahnen in Paris, München und Tokio. Das Pariser Netz (siehe Abb. 4) wird im allgemeinen als das vollständigste Netz anerkannt, weil es das gesamte Stadtgebiet erfaßt.

Danksagung

Aufgrund eines NATO-Stipendiums konnte Prof. Vuchic mit Prof. Musso im Herbst 1989 an der Universität Salerno zusammenarbeiten. Dieser Artikel ist eines der Ergebnisse dieser Zusammenarbeit. Die Forschungsarbeiten wurden darüber hinaus durch einen Zuschuß des Consiglio Nazionale delle Ricerche gefördert. Die Verfasser erkennen diese Unterstützung mit Dank an.

Literaturverzeichnis

Siehe Englische Fassung (Seiten 322 und 324).