

EBW



W

U-Bahnen im Wandel der Zeit Eine Fallstudie der Pariser Metro

Masterarbeit

Abgabedatum 06.11.2012

Anna Maria Frisee
BSc.
0410781
anna1310@sbox.tugraz.at

Betreuer:
Peter Veit
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.
peter.veit@tugraz.at

B

E



Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle all jenen meinen Dank aussprechen, die mich durch das Studium begleitet und mich über die Jahre auf meinem Weg bestärkt haben.

Allen voran möchte ich mich bei meinem Betreuer Univ.-Prof. Dipl.-Ing Dr. Veit und Ass.-Prof. Dipl.-Ing Dr. Marschnig für ihren fachlichen Rat, wie auch ihr Vertrauen und die damit verbundene freie Handhabung des Themas, bedanken.

Des Weiteren gilt meine Dankbarkeit meinen Kollegen und Mitarbeitern des Institutes für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft an der Technischen Universität Graz, die stets ihr Wissen mit mir geteilt haben und mir geduldig mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt anschließend meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Gabriele und Klaus Frisee, die mir das Studium ermöglicht haben und mir jederzeit versucht haben alle Türen für meine Zukunft zu öffnen. Meinem Freund Constantin danke ich für seine immer währende Unterstützung sowie das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzen Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 06.11.2012



Kurzfassung

Die U-Bahn gilt heute nicht selten als pulsierende Ader einer Stadt. Ihre Geschichte wie auch Präsenz geben Anlass zur Faszination. Aus den heutigen Metropolen ist die U-Bahn als öffentliches Verkehrsmittel nicht mehr wegzudenken. Diese Arbeit beantwortet, auf Basis der immer mehr an Bedeutung gewinnenden Thematik des Bevölkerungswachstums und des daraus resultierenden Verkehrsaufkommens, die Frage nach der Zukunftsfähigkeit der U-Bahn.

In dieser Arbeit wird ein Bogen von der Historie der Metro über die Gegenwart, bis hin zu künftigen Entwicklungen des Systems U-Bahn gespannt. Mittels einer Aufarbeitung des geschichtlichen Hintergrunds werden die Pro und Contra unterschiedlicher Verkehrslösungen anhand einer Fallstudie der Pariser Metro herausgearbeitet. Dabei sollen Themen wie die Bauweisen, die Trassierung, der Fuhrpark, das Betriebskonzept, die Sicherungstechnik, wie auch die Handhabung der Schnittstellen zum Fahrgast als Eckpfeiler betrachtet werden. Die Pariser Metro wird dabei als Referenz angesehen, um im Laufe der Arbeit Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Konzepten herstellen zu können.

Den Abschluss dieser Masterarbeit bildet ein Ausblick in die Zukunft, der auf dem bis lang erarbeiteten Wissen basiert. Dieser zeigt, dass die U-Bahn eine Verkehrslösung darstellt, welche kaum in Konkurrenz zu anderen Verkehrsmitteln steht. Im innerstädtischen Bereich ist die Metro als Massenverkehrsmittel ideal und ist durch die elektrische Traktion vollkommen unabhängig von energiepolitischen Entscheidungen. Diese Tatsachen lassen vermuten, dass die Metro im 21. Jahrhundert noch an Bedeutung gewinnen wird. Sowohl die Erweiterung von bestehenden U-Bahnnetzten als auch der Neubau werden eine tragende Rolle in der zukünftigen Stadtentwicklung einnehmen.

Abstract

Today the subway is often described as the vibrant core of a city. Its past and present gives cause for fascination. For a modern metropolis, underground railway systems have become indispensable for public transport. This work discusses the question of the sustainability of the subway, based on the increasingly important issue of population growth and the resulting traffic.

Within this work, a bow is drawn from the history of the metro via the present to its future. By means of a case study of the Paris Metro and its historical background, the advantages and disadvantages of different transport solutions are worked out. In the course of this, topics such as the construction, the track alignment, the rolling stock, the operational concept, the signalling system as well as the handling of the interfaces to the passenger are covered. The Paris Metro is taken as a reference to draw comparisons between the different concepts.

The conclusion of this thesis is an outlook into the future based upon the acquired knowledge. It becomes apparent that the subway hardly has to compete with other transport systems. In the urban area the metro is an ideal means of mass transport and turns out to be completely independent of future energy decisions. These facts suggest that the metro will be even more important in the 21st century. The building of new metros as well as the expansion of existing ones will play a major role in the future of urban development.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------|
| Danksagung..... | I |
| Eidesstattliche Erklärung | II |
| Kurzfassung..... | III |
| Abstract | IV |
| Abbildungsverzeichnis | VIII |
| Tabellenverzeichnis..... | X |
| 1 Begriffsbestimmungen | 1 |
| 1.1 Begriffe für eine U-Bahn im Sinne der Definition | 1 |
| 1.2 Begriffe für nicht als U-Bahn geltende Bahnsysteme | 2 |
| 2 Einleitung | 4 |
| 3 Die Anfänge der U-Bahn | 5 |
| 3.1 London als Geburtsort der Metro | 5 |
| 3.1.1 Die Entwicklung von London im 19. Jahrhundert..... | 5 |
| 3.1.2 Die Geburtsstunde der Metro..... | 6 |
| 3.1.3 Der Themse Tunnel..... | 7 |
| 3.1.4 Die „Röhrenbahn“ | 8 |
| 3.1.5 Die Londoner U-Bahn bis heute | 8 |
| 3.2 Die ersten U-Bahnen | 9 |
| 3.2.1 Glasgow | 9 |
| 3.2.2 Budapest..... | 11 |
| 3.2.3 New York..... | 11 |
| 3.2.4 Wien | 12 |
| 3.2.5 Moskau..... | 13 |
| 4 Warum eine U-Bahn? | 15 |
| 4.1 Entscheidungskriterien..... | 15 |
| 4.1 Der Einfluss der U-Bahn auf die Stadtentwicklung | 17 |
| 5 Die Pariser Metro..... | 19 |
| 5.1 Entstehung..... | 20 |
| 5.2 Die Betreiber der Pariser Metro | 20 |
| 5.3 Das Streckennetz | 22 |
| 5.3.1 Linie 1 | 22 |
| 5.3.2 Linie 2 | 25 |
| 5.3.3 Linie 3 | 27 |
| 5.3.4 Linie 3bis..... | 28 |
| 5.3.5 Linie 4 | 29 |
| 5.3.6 Linie 5..... | 31 |
| 5.3.7 Linie 6..... | 33 |
| 5.3.8 Linie 7..... | 35 |
| 5.3.1 Linie 7bis..... | 37 |
| 5.3.2 Linie 8..... | 38 |
| 5.3.3 Linie 9..... | 40 |
| 5.3.4 Linie 10 | 42 |
| 5.3.5 Linie 11 | 45 |
| 5.3.6 Linie 12 | 46 |
| 5.3.7 Linie 13 | 47 |
| 5.3.8 Linie 14 – „Météor“ | 49 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.3.9 | Einbettung des Metro-Netzes in das ÖV-Netz von Paris (Ergänzung durch Straßenbahn, Bus, und RER) | 50 |
| 5.3.10 | Le Grand Paris | 51 |
| 6 | Bauweisen und Trassierung | 53 |
| 6.1 | Tunnel | 53 |
| 6.1.1 | Offene Bauweise | 53 |
| 6.1.1.1 | Cut-and-cover (konventionelle Methode) | 54 |
| 6.1.1.2 | Deckelbauweise | 54 |
| 6.1.2 | Einschwimm- und Absenkmethod | 55 |
| 6.1.3 | Geschlossene Bauweise | 55 |
| 6.1.4 | Der Tunnelbau der Pariser Metro | 56 |
| 6.2 | Netzformen | 57 |
| 6.3 | Oberbau | 59 |
| 6.4 | Trassierung | 60 |
| 6.5 | Spurweite | 60 |
| 6.6 | Stromversorgung | 61 |
| 6.6.1 | Bereitstellung des Stroms | 62 |
| 7 | Der Fuhrpark | 64 |
| 7.1 | Fahrzeuggröße | 64 |
| 7.2 | Platzbedarf eines Passagiers | 64 |
| 7.3 | Fahrgastraum | 64 |
| 7.4 | Fahrzeigtüren | 65 |
| 7.5 | Zugzusammenstellung | 65 |
| 7.6 | Beschleunigungs- / Bremsvermögen | 66 |
| 7.7 | Fahrzeuge der Pariser Metro | 66 |
| 7.7.1 | Vergleich der Systeme von Gummireifen und Stahlspurkranzrädern | 70 |
| 8 | Betriebskonzept | 74 |
| 8.1 | Netzdichte/Haltestellenabstand | 74 |
| 8.2 | Zugfolgezeiten | 74 |
| 8.3 | Wartung und Abstellen der Fahrzeuge | 75 |
| 9 | Sicherungstechnik | 83 |
| 9.1 | Fahren im Zeitabstand | 83 |
| 9.2 | Stellwerksbetrieb (Nichtselbsttätiger Streckenblock) | 83 |
| 9.3 | Fahrgesteuerter Betrieb | 84 |
| 9.3.1 | Signalsysteme | 84 |
| 9.4 | Die Automatisierung des Zugbetriebs | 87 |
| 9.4.1 | GoA1 – Teilautomatischer Betrieb | 87 |
| 9.4.2 | GoA2 – Halbautomatische Zugsteuerung | 88 |
| 9.4.3 | GoA3 – Fahrerloser Betrieb | 88 |
| 9.4.4 | GoA4 – unbegleitete automatische Zugführung | 89 |
| 9.5 | ATO Betrieb bei der Pariser Metro | 89 |
| 9.6 | Zentrale Überwachungsstelle - <i>Poste de Comman de Centralisée</i> (PCC) | 90 |
| 10 | Abfertigung der Fahrgäste | 91 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 11 | Die Zukunft der U-Bahn | 93 |
| 11.1 | Entwicklungspotential der U-Bahn | 93 |
| 11.1.1 | Leistungsfähigkeit | 93 |
| 11.1.1.1 | Kapazitätssteigerung durch Adaption der Fahrzeuge | 94 |
| 11.1.1.2 | Steigerung der Leistungsfähigkeit durch Erhöhung der Reisegeschwindigkeit | 94 |
| 11.1.1.3 | Steigerung der Leistungsfähigkeit durch Verringerung der Zugfolgezeiten..... | 95 |
| 11.1.1.4 | Erhöhung der Leistungsfähigkeit durch Infrastrukturausbau | 99 |
| 11.1.2 | Sicherheit | 100 |
| 11.1.3 | Instandhaltung | 100 |
| 11.1.4 | Kosten..... | 100 |
| 11.2 | Schlussfolgerung..... | 101 |
| | Literaturverzeichnis | i |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1: | Brunels neue Art Stollen zu graben [9] | 7 |
| Abbildung 2: | Ringnetz der Metro in Glasgow [11] | 10 |
| Abbildung 3: | Netz der Pariser Metro inklusive RER und Straßenbahn [21] | 19 |
| Abbildung 4: | Linie 1 [20] | 22 |
| Abbildung 5: | Linie 1 – <i>Porte Maillot</i> [27] | 23 |
| Abbildung 6: | Linie 1 – entfernte Schleife an der <i>Porte de Vincennes</i> [27] | 24 |
| Abbildung 7: | Linie 1 – Engste Kurve des Netzes bei <i>Bastille</i> mit einem Radius von 40 m [27] | 24 |
| Abbildung 8: | Linie 2 [20] | 25 |
| Abbildung 9: | Linie 2 – Ostschleife unter der <i>Place de la Nation</i> [27] | 26 |
| Abbildung 10: | Linie 2 – Westschleife an der <i>Porte Dauphine</i> [27] | 26 |
| Abbildung 11: | Linie 2 – Verlegte Haltestelle <i>Victor Hugo</i> [27] | 26 |
| Abbildung 12: | Linie 3 [20] | 27 |
| Abbildung 13: | Linie 3 – Umgestaltung der Station <i>Gambetta</i> für Weiterführung der Linie 3 und Eigenständigkeit der Linie 3bis [27] | 28 |
| Abbildung 14: | Linie 3 – Weiterführung unter der Linie 2 bei <i>Villiers</i> [27] | 28 |
| Abbildung 15: | Linie 3 – Schleife bei <i>Porte de Champerret</i> [27] | 28 |
| Abbildung 16: | Linie 3bis [20] | 28 |
| Abbildung 17: | Linie 4 [20] | 29 |
| Abbildung 18: | Linie 4 – <i>Porte de Clignancourt</i> [27] | 30 |
| Abbildung 19: | Linie 4 – <i>Porte d'Orléans</i> [27] | 30 |
| Abbildung 20: | Linie 4 – Verlegung der Station <i>Les Halles</i> [27] | 30 |
| Abbildung 21: | Linie 5 [20] | 31 |
| Abbildung 22: | Linie 5 – <i>Place d'Italie</i> [27] | 32 |
| Abbildung 23: | Linie 5 – <i>Gare du Nord</i> [27] | 32 |
| Abbildung 24: | Linie 5 – Verbindung zu <i>Gare de Lyon</i> [27] | 32 |
| Abbildung 25: | Linie 6 [20] | 33 |
| Abbildung 26: | Linie 6 – Endstation u. <i>Kléber</i> [27] | 34 |
| Abbildung 27: | Linie 7 [20] | 35 |
| Abbildung 28: | Linie 7 – Abzweigung nach <i>Pré-Saint-Gervais</i> (jetzige Linie 7bis) [27] | 36 |
| Abbildung 29: | Linie 7bis (frühere Linie 7) – Weiterführung bis <i>Porte des Lilas</i> [27] .. | 37 |
| Abbildung 30: | Linie 7bis [20] | 37 |
| Abbildung 31: | Linie 8 [20] | 38 |
| Abbildung 32: | Linie 8 – viergleisiger Tunnel und die Station <i>République</i> [27] | 39 |
| Abbildung 33: | Linie 8 – <i>La Motte-Picquet-Grenelle</i> und <i>Commerce</i> [27] | 39 |

| | | |
|---------------|---|----|
| Abbildung 34: | Linie 9 [20] | 40 |
| Abbildung 35: | Linie 9 – <i>Porte de Saint-Cloud</i> inkl. Anbindung an die Linie 10 [27] ... | 41 |
| Abbildung 36: | Linie 10 [20] | 42 |
| Abbildung 37: | Linie 10 – Schleife von <i>Porte d’Auteuile</i> [27] | 43 |
| Abbildung 38: | Linie 10 – <i>Cluny</i> und die Abzweigung nach <i>Jussieu</i> [27] | 44 |
| Abbildung 39: | Linie 11 [20] | 45 |
| Abbildung 40: | Linie 12 [20] | 46 |
| Abbildung 41: | Linie 13 [20] | 47 |
| Abbildung 42: | Linie 13 – <i>La Fourche</i> [27] | 48 |
| Abbildung 43: | Linie 14 [20] | 49 |
| Abbildung 44: | <i>Le Grand Paris</i> [21] | 52 |
| Abbildung 45: | <i>Cut-and-cover</i> [7] | 54 |
| Abbildung 46: | Deckelbauweise [7] | 55 |
| Abbildung 47: | Caissonverfahren der Metro in Amsterdam [7] | 55 |
| Abbildung 48: | Die Belgische Tunnelbaumethode [34] | 56 |
| Abbildung 49: | Anwendung der Caissonmethode bei der Unterquerung der Seine in <i>St. Michel</i> [12] | 57 |
| Abbildung 50: | Netzformen der Metro [2] | 58 |
| Abbildung 51: | Oberbau mit sechs Schienen der Pariser Metro [37] | 62 |
| Abbildung 52: | Fahrzeugtypen der Pariser Metro [27] | 69 |
| Abbildung 53: | Kontakt Rad-Schiene/bzw. Piste bei Fahrzeugen mit Gummirädern [7] | 71 |
| Abbildung 54: | Drehgestell eines gummibereiften Fahrzeuges [23] | 71 |
| Abbildung 55: | <i>Ateliers de Fontenay</i> [27] | 75 |
| Abbildung 56: | <i>Ateliers de Charonne</i> [27] | 76 |
| Abbildung 57: | <i>Ateliers de St. Fargeau</i> [27] | 76 |
| Abbildung 58: | <i>Ateliers de Saint-Ouen</i> [27] | 76 |
| Abbildung 59: | <i>Ateliers de Bobigny</i> [27] | 77 |
| Abbildung 60: | <i>Ateliers d’Italie</i> [27] | 77 |
| Abbildung 61: | <i>Ateliers de Choisy</i> [27] | 78 |
| Abbildung 62: | <i>Ateliers Pré Saint-Gervais</i> [27] | 78 |
| Abbildung 63: | <i>Ateliers de Javel</i> [27] | 78 |
| Abbildung 64: | <i>Ateliers de Boulogne</i> [27] | 79 |
| Abbildung 65: | <i>Ateliers d’Auteuil</i> [27] | 79 |
| Abbildung 66: | <i>Atelier des Lilas</i> [27] | 80 |
| Abbildung 67: | <i>Ateliers de Vaugirard</i> [27] | 80 |
| Abbildung 68: | <i>Ateliers de Pleyel</i> [27] | 81 |
| Abbildung 69: | <i>Ateliers de Châtillon</i> [27] | 81 |
| Abbildung 70: | <i>Ateliers de Tolbiac Nationale II</i> [27] | 81 |

Tabellenverzeichnis

Abbildung 71: *Ateliers de la Villette* [27]82
Abbildung 72: Theoretische Mindestzugfolgezeit Metro Paris99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Entwicklung der Einwohnerzahlen vom Jahr 1600 bis 1900 [2] 6
Tabelle 2: Technische Daten der Wagen der Pariser Metro [21][37]67

1 Begriffsbestimmungen

Im Laufe der Entstehungsgeschichte der U-Bahn haben sich die unterschiedlichsten Formen und Namensgebungen entwickelt. Dies liegt nicht nur an der Vielfältigkeit der Systeme, sondern auch an der Anwendung in den verschiedenen Ländern und somit auch Sprachen.

Oft ist die Abgrenzung einer U-Bahn zu anderen Systemen nur schwer zu beurteilen. Das gravierendste Unterscheidungsmerkmal ist das Vorhandensein eines unabhängigen Netzes, das ohne niveaugleiche Kreuzungen auskommt. Ferner handelt es sich bei einer U-Bahn um ein leistungsstarkes Netz, welches vorrangig die innere Stadt bedient. Dieses ist entweder über Signale geregelt oder automatisch gesteuert. Zusätzliche Voraussetzungen sind ein ebenerdiges Ein- und Aussteigen auf Wagenboden-Niveau sowie einfache Umsteigerelationen zu anderen Verkehrsmitteln. [1]

In den folgenden Unterkapiteln sollen die gebräuchlichen Begriffe für eine U-Bahn erklärt und eine Abtrennung zu Systemen geschaffen werden, die laut Definition nicht als U-Bahn gelten.

1.1 Begriffe für eine U-Bahn im Sinne der Definition

U-Bahn U-Bahn kommt aus dem deutschen Sprachgebrauch und ist eine Abkürzung für „Untergrundbahn“. Trotz seiner Namensgebung gilt der Begriff auch für ebenerdig oder aufgeständert verlaufende Bahnen. [2]

Metro Das Wort Metro entwickelte sich als Kurzform aus dem Namen „*Metropolitan Railway*“. Dies war die Bezeichnung für die Londoner Bahngesellschaft, welche die weltweit erste unterirdische Eisenbahnstrecke baute. Heute findet der Begriff vor allem im französischen und slawischen Sprachraum sowie in Washington D. C. seine Anwendung und hat sich über dies hinaus zu einem technischen Grundbegriff entwickelt. [2]

Underground Der Name *Underground* wurde als Marke der *Underground Group* im Jahr 1908 zum ersten Mal veröffentlicht. Das „*Roundel*“ wurde als Symbol initiiert und ziert seit dem jeden Bahnsteig und Eingang der Londoner U-Bahn. Es besteht aus einem roten Kreis mit einem

| | |
|------------|---|
| | blauen Querbalken über dem der Name <i>Underground</i> zu lesen ist. [3] |
| Tube | Die Bezeichnung „ <i>Tube</i> “ wird ebenfalls in London verwendet und geht auf den Bau des ersten röhrenförmigen Tunnels zurück. 1880 wurde die so genannte „ <i>Tubetrain</i> “ zwischen dem <i>Tower of London</i> und <i>Bermondsey</i> eröffnet. Dies war der erste vollständig in geschlossener Tunnelbauweise hergestellte Abschnitt. [2][3] |
| Subway | Im angloamerikanischen Raum und Japan findet man heute hauptsächlich den Begriff „ <i>Subway</i> “ als Bezeichnung für eine Untergrundbahn. Im Speziellen versteht man darunter primär die New Yorker U-Bahn. [2][4] |
| Tunnelbana | Im skandinavischen Sprachraum findet man auch den Ausdruck „ <i>Tunnelbana</i> “. Speziell die U-Bahn in Stockholm wird so bezeichnet. [2] |
| Subte | „ <i>Subte</i> “ kommt aus dem spanischen Sprachgebrauch und entspricht ebenfalls dem deutschen Wort für U-Bahn. [2] |

1.2 Begriffe für nicht als U-Bahn geltende Bahnsysteme

| | |
|---------------|---|
| Schnellbahn | Eine Schnellbahn bzw. S-Bahn stellt in der Regel im deutschen Sprachgebrauch eine von der U-Bahn unabhängige Bahn dar. Sie ist ein eigenständiges Verkehrssystem und wird im Gegensatz zur U-Bahn von einem Eisenbahnunternehmen betrieben. Trotz ihres großräumig angelegten Netzwerkes bietet sie auch eine regionale Erschließungsfunktion. Der große Unterschied zu den meisten anderen Systemen liegt in dem absoluten Vorrang, der einer Schnellbahn an gelegentlich vorhandenen höhengleichen Kreuzungen eingeräumt wird. Dieser wird mittels Schrankenanlagen, Lichtzeichen, Andreaskreuzen, etc. gewährleistet. [5][2] |
| Straßenbahn | Straßenbahnen werden elektrisch betrieben und verlaufen auf einem straßenbündigen Bahnkörper mittels Rillenschienen, oder auf einem getrennten Bahnkörper. Jedenfalls unterliegt die Straßenbahn der Straßenverkehrsordnung. [5] |
| U-Straßenbahn | Wird eine Straßenbahn auf Teilstücken unterirdisch geführt, so wird diese als U-Straßenbahn bezeichnet. Wobei der Betrieb, die |

Sicherungstechnik und die Fahrzeuge weiterhin einer gewöhnlichen Straßenbahn entsprechen.

Stadtbahn

Eine Stadtbahn stellt eine Schnittstelle zwischen einer U-Bahn und einer Straßenbahn dar. So nutzt sie im innerstädtischen Bereich meist ein Tunnelsystem wie es für eine U-Bahn üblich ist und wird im Randbereich einer Stadt wie eine Straßenbahn geführt. Dies bedeutet, dass sie sowohl kreuzungsfreie Abschnitte enthält, wie auch Bereiche in denen gelegentliche niveaugleiche Kreuzungen mit dem Straßenverkehr vorhanden sind. Die Stadtbahn erhält an Kreuzungen keinen absoluten Vorrang gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern. [2][5][6]

Pre-Metro

Als Pre-Metro werden Stadtbahnen bezeichnet, die in näherer Zukunft zu Metros ausgebaut werden sollen. Die Entscheidung für solch eine Entwicklung beruht meist auf finanziellen Gesichtspunkten, da der Investitionsaufwand einer Stadtbahn weit unter dem einer U-Bahn liegt. Dies ist in der einfacheren Betriebsführung begründet. [2]

2 Einleitung

Die U-Bahn ist aus dem heutigen Stadtbild der meisten Millionenstädte nur schwer wegzudenken. Ihre Entwicklung hat die aktuelle Ausprägung von Städten stark beeinflusst und wird auch in Zukunft ihre Wirkung auf die Siedlungsstruktur der Metropolen nicht verlieren.

Diese Arbeit soll einen Bogen von den Anfängen der U-Bahn über den aktuellen Stand der Technik spannen und des Weiteren einen Ausblick in die Zukunft der Metro geben. Es sollen Gründe aufgearbeitet werden, die zur Entwicklung der Metro geführt haben und ihre unterschiedlichsten Ausprägungen betrachtet werden. Das Verständnis für die Hintergründe damaliger Entscheidungen beim Bau einer Metro stellt die Basis für die Interpretation der Gegenwart sowie zukünftiger Innovationen dar.

Zur Erarbeitung der aktuellen Situation der U-Bahn dient eine Fallstudie der Pariser Metro. Diese soll Fragen bezüglich der vielfältigen Systeme sowie Bauweisen, Betrieb, Fuhrpark, Abfertigung von Fahrgästen, Sicherungs- und Sicherheitstechnik beantworten. Zur Aufarbeitung dieser Themen ist eine detaillierte historische Rekonstruktion der Entwicklung und des Fortschrittes der Pariser Metro unumgänglich. Speziell das Beispiel Paris bietet hierbei eine reiche Palette an Ausbaustufen und technischen Neuerungen, die im Laufe der Jahrzehnte verwirklicht wurden. Kaum ein anderes Netz bietet so vielseitige Facetten wie das der französischen Hauptstadt.

Hinsichtlich des ökologischen Fußabdruckes ist das System U-Bahn, gerade im Bezug auf aktuelle umwelttechnische Fragestellungen, kaum zu überbieten. Somit ist ihre enorme Bedeutung im zukünftigen Städtebau unabdingbar. In welche Richtung jedoch die Entwicklung der U-Bahn gehen wird, ist zum aktuellen Zeitpunkt noch offen. Im dritten großen Abschnitt dieser Arbeit soll somit die Frage nach der Zukunft der Metro gestellt werden. Technische sowie städtebauliche Neuerungen sollen betrachtet und die Perspektive aktueller und geplanter Systeme offengelegt werden.

3 Die Anfänge der U-Bahn

Um das Verständnis für die Ursprünge der U-Bahn zu wecken, muss man zurück zum Beginn des 19. Jahrhundert blicken. Zu dieser Zeit findet man, ausgelöst durch die industrielle Revolution, die Anfänge des öffentlichen Verkehrs. Weltweit folgte eine Innovation der nächsten und so entwickelte sich aus den Pferdeomnibussen bald die Pferdeisenbahn. Der ständige Bedarf nach einer Steigerung der Leistungsfähigkeit brachte Erfindungen wie die Dampfmaschine hervor. Ihr großer Nachteil lag vor allem innerstädtisch an der starken Geräusch- und Rußentwicklung. Ein weiterer Schritt war dabei die Dampfspeicherlokomotive, welche sich vor allem in Paris großen Beliebtheit erfreute. Der Energiebedarf lag jedoch wesentlich höher als bei herkömmlichen Dampfmaschinen. Auch ihre Zuverlässigkeit litt durch die beschränkte Reichweite. Das erste öffentliche Verkehrsmittel, das einen regen Zuspruch fand, war das „*cablecar*“ in San Francisco. Das Seil wurde über eine stationäre Dampfmaschine angetrieben und überzeugte durch die Sauberkeit, hohe Geschwindigkeit und die niedrigen Betriebskosten. Auch in London und Frankreich kam dieses System zum Einsatz. Die elektrische Traktion wurde bereits in den 30er Jahren des 19. Jahrhunderts erfunden. Die Energiespeicherung bzw. Energiezufuhr war hingegen noch nicht genug ausgereift um tatsächlich ein weitläufiges System zu betreiben. Erst um 1900 begann der Vormarsch der elektrischen Traktion und somit der Siegeszug der Metro. Am Beispiel London, als Geburtsort der U-Bahn, soll im folgenden Unterkapitel die detaillierte Entstehungsgeschichte der Metro, sowie ihr Auslöser, veranschaulicht werden. [7]

3.1 London als Geburtsort der Metro

3.1.1 Die Entwicklung von London im 19. Jahrhundert

Im 19. Jahrhundert war London die größte Stadt und wirtschaftliches Zentrum der Welt. Das britische Empire hatte mit einer Fülle an Rohstoffen und Arbeitskräften sowie seiner für die damalige Zeit modernen Staatsform eine Vormachtstellung im Vergleich zu anderen Staaten. So ist es nicht verwunderlich, dass gerade in der Großstadt London der Grundstein für die heutige U-Bahn gelegt wurde. [2]

Die technische Revolution war Auslöser für einen Wandel der Produktion und in Folge dessen war die Industrialisierung nicht mehr aufzuhalten. Dieser Umschwung löste eine Zuwanderung in die Ballungsräume aus und ging Hand in Hand mit einer flächenmäßigen Ausdehnung der Stadt. Diese Entwicklung bedingte zwangsläufig den Bedarf eines Massentransportmittels. Zu Fuß waren die großen Distanzen kaum mehr zu überwinden

und so entwickelte sich als erstes Massenverkehrsmittel der Pferdeomnibusverkehr. In London verkehrte dieser 1829 bereits regelmäßig und so schritt die Ausdehnung der Stadt voran. Innerhalb einer Stadt kristallisierten sich Gebiete mit unterschiedlichen Nutzungsarten heraus. So entstanden neben den Produktionsstätten große Wohnquartiere für die Arbeiter. In London waren diese am Südufer der Themse zu finden. Dort befanden sich die großen Hafenanlagen und Lagerhäuser. Diese Armenviertel standen bald im starken Kontrast zu den ruhig gelegenen Wohnquartieren der gehobenen Gesellschaft. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts war London bereits um ein vielfaches gewachsen. Dessen Entwicklung im Vergleich zu anderen Metropolen zeigt die Tabelle 1. [2][8]

| Stadt | Einwohner (in 1000) | | | | |
|--------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1600 | 1700 | 1800 | 1850 | 1900 |
| London | 250 | 600 | 959 | 2 362 | 4 537 |
| Paris | 300 | 500 | 547 | 1 053 | 1 714 |
| New York | | | 79 | 696 | 3 437 |
| Berlin | | | 172 | 419 | 1 889 |

Tabelle 1: Entwicklung der Einwohnerzahlen vom Jahr 1600 bis 1900 [2]

Die Weiterentwicklung des öffentlichen Verkehrs war die Pferdeeisenbahn. Der Unterschied zu den Omnibussen bestand in der deutlichen Steigerung der Leistungsfähigkeit und des Komforts durch die Schienenführung. Optisch waren sich die beiden sehr ähnlich. An Beliebtheit gewann die Pferdeeisenbahn jedoch erst durch die Erfindung der Rillenschiene, wodurch die Schienen nicht mehr störend über die Straßenoberfläche hinaus ragten, sondern sich in der gleichen Ebene befanden. In den 1860er Jahren machte diese Neuerung die Pferdeeisenbahn auch in Europa populär. [7]

Bald waren auch die Grenzen der Leistungsfähigkeiten der Pferdebahnen und Pferdeomnibusse erreicht und die Dichte des Fuhrwerksverkehrs auf den Straßen wurde zu einem Problem. Dies bedingte die Ausbildung eines neuen öffentlichen Verkehrssystems, das unabhängig vom Straßenverkehr war und eine deutlich höhere Leistungsfähigkeit aufwies. [2]

3.1.2 Die Geburtsstunde der Metro

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts entwickelte sich in Großbritannien und bald auch im restlichen Europa die Eisenbahn als Verkehrsmittel. Sie verband die großen Städte und industriellen Zentren miteinander und so endeten auch in London mehrere Eisenbahnstrecken. Um deren Kopfbahnhöfe auch innerstädtisch miteinander zu verbinden, musste eine Lösung gefunden werden, die Eisenbahn getrennt vom Straßenverkehr zu führen. Man entschied sich für eine tiefliegende Führung der Strecke, deren Herstellung mit der

offenen Bauweise durchgeführt wurde. Als Ergebnis dieser Überlegungen wurde am 10. Jänner 1963 die erste unterirdische 6,5 km lange Eisenbahnstrecke zwischen *Paddington (Bishop's Road)* und *Farrington Street* eröffnet. Die Bezeichnung Metro entwickelte sich schon bald aus der Bahngesellschaft, die den Namen „*Metropolitan Railway*“ trug. [2][3]

Im Jahr 1868 folgte die *Metropolitan District Railway* zwischen *South Kensington* und *Westminster*. [3]

3.1.3 Der Themse Tunnel

Die starke Überlastung der Verkehrswege, vor allem über die Themse, führte zu ersten Überlegungen zum Bau eines Tunnels als Unterquerung eines Flusses. Die Errichtung einer zusätzlichen Brücke war auf Grund des starken Schiffsverkehrs nicht möglich, da Hubbrücken zu dieser Zeit noch nicht erfunden waren. Auch die Rampen, um eine Brücke mit den Fuhrwerken zu befahren, hätten ein zu großes Ausmaß angenommen. So entschied man sich eine „unterirdische Brücke“ [9] nach den Plänen von Sir Marc Isambard Brunel zu bauen. Seine Konstruktionszeichnungen sind in Abbildung 1 zu sehen. [10] Der Tunnel sollte von *Rotherhithe* nach *Wapping* führen und die Hafenanlage im Norden mit den Fabriken im Süden verbinden. [8]

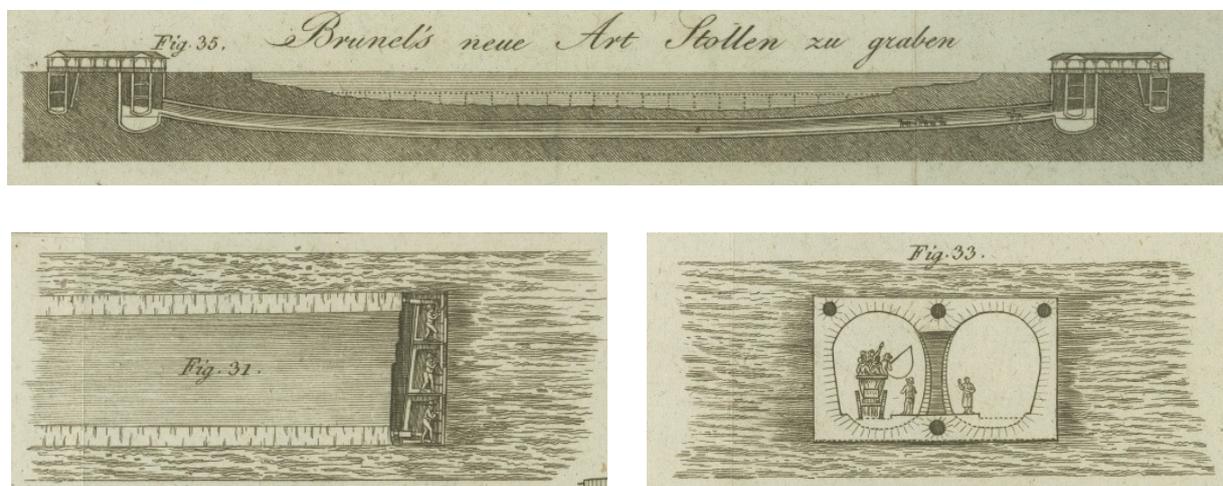


Abbildung 1: Brunels neue Art Stollen zu graben [9]

Im Jahr 1825 wurde mit dem Bau des Tunnels durch den lehmigen Boden unter der Themse begonnen. Mittels des von Brunel erfundenen Schildes konnte die Tunnelwand während des Baus gestützt werden und Stück für Stück vorwärts geschoben werden. Hinter dem Schild wurden die Stollenwände mit Ziegeln und Zement verkleidet und somit stabilisiert. Trotz dieser herausragenden Technik, die auch heute noch in weiter entwickelter Form im Tunnelbau seine Anwendung findet, kam es immer wieder zu

Zwischenfällen und so brauchte es noch viele Jahre, bis der Tunnel vollendet war. Immer wieder kam es zu Wassereinbrüchen und Explosionen, die durch die im Schlamm der Themse enthaltenen Gase verursacht wurden. Die Sanierungsarbeiten nach den häufigen Zwischenfällen kosteten viel Geld und so fehlten der *Thames Tunnel Company* nach dem zweiten großen Wassereinbruch 1828 die Mittel um den Bau zu vollenden. Darum entschied man sich, den Tunnel etwa in Flussmitte zuzumauern und die Baustelle still zu legen. 1835 beschloss die Regierung den Weiterbau zu finanzieren und so konnte der Tunnel 1843 eröffnet werden. Für den Bau der geplanten Rampen reichte die Finanzierung allerdings nicht aus und so konnte der Tunnel nur von Fußgängern passiert werden und erfüllte somit seinen eigentlichen Zweck nicht. [8][10]

1869 wurde der Tunnel an die *East London Railway* verkauft und die ersten Dampfeisenbahnen wurden unter der Themse geführt. [3][8]

3.1.4 Die „Röhrenbahn“

Der vollständigen Erschließung Londons durch die offene Bauweise waren bautechnische Grenzen gesetzt. Durch die Weiterentwicklung des von Brunel geschaffenen Prinzips konnte der erste Röhrentunnel vom *Tower of London* zu *Bermondsey* in geschlossener Bauweise hergestellt und 1880 eröffnet werden. [2][3]

In Folge dessen konnte man nur zehn Jahre später den nächsten im Schildvortrieb gebauten Tunnel eröffnen. Die *City and South London Line* führte von der *King William Street* in London, unter der Themse hindurch, nach *Stockwell*. Die große Tiefenlage, die erstmals durch das neuartige Prinzip erreicht werden konnte, schloss den Betrieb von Dampflokomotiven aus, da kein passendes System für das Lüftungsproblem zur Verfügung stand. Nach anfänglichen Überlegungen einen Seilantrieb einzusetzen, entschloss man sich zu einem elektrischen Antrieb. Dieser wurde damals gerade erst entwickelt und war noch nicht verbreitet. So erhielt London als erste Stadt der Welt im Jahre 1890 eine elektrisch angetriebene Untergrundbahn mit der Bezeichnung „*tube*“. Bis heute werden die meisten zur damaligen Zeit errichteten Tunnelanlagen noch verwendet. [2][3][8]

3.1.5 Die Londoner U-Bahn bis heute

Nach der Elektrifizierung der ersten U-Bahn Strecke war ein Ausbau des Metronetzes nicht mehr aufzuhalten. Weitere Strecken folgten und wurden 1902 mit Ausnahme der *Metropolitan Railway* in der „*Underground Electric Railway Company of London*“ vereint. Sie wurde als „*Underground Group*“ bekannt und veröffentlichte 1908 zum ersten Mal das bis heute gültige und weltweit bekannte „*Underground*“ Zeichen. In den folgenden Jahren

gab es mehrere Umstrukturierungen, die 1985 mit der bis heute gültigen Bezeichnung „*London Underground*“ vorerst abgeschlossen waren. [3]

Heute befördert die Londoner *Underground* jährlich 1,107 Milliarden Passagiere auf einem 402 km langen Streckennetz und ist Teil des *Transport for London*, welches auch für den restlichen ÖPNV (Öffentlicher Personennahverkehr) verantwortlich ist. [3]

3.2 Die ersten U-Bahnen

Als Folge des erfolgreichen U-Bahn Systems in London entstanden in Europa bald weitere Metros. Auf einige herausragende U-Bahnen sowie Meilensteine der Entwicklung soll im Folgenden eingegangen werden.

3.2.1 Glasgow

Die U-Bahn in Glasgow wurde 1896 eröffnet und trägt umgangssprachlich den Namen „*Clockwork Orange*“. Dieser Name bezieht sich einerseits auf die orange Farbe der Züge und andererseits auf eine Aussage eines Mitarbeiters des Unternehmens, der in einer Presseerklärung verlautbaren ließ, dass die Bahn wie ein Uhrwerk funktionieren würde. [8]

Die Bahn weist einige Besonderheiten auf. So erfolgte ihr Antrieb bei der Eröffnung noch durch ein Zugseil, das über eine Dampfmaschine angetrieben wurde. Die Wagen wurden daran ab- und angeklemt, um zu beschleunigen und zu bremsen. Trotz des damals bereits in London erprobten Elektroantriebes, entschied man sich für diese Antriebsform und konnte somit eine große Baukosteneinsparung erwirtschaften. Dies lag in der günstigeren Streckenführung, die durch größere Steigungen erreicht werden konnte. [2][8]

Doch nicht nur die Antriebsform, sondern auch die Linienführung ist erwähnenswert. Das Netz wurde in einem zweigleisigen Ring mit 15 Stationen ausgeführt. (siehe Abbildung 2) Die Gleise verfügten über keine Auffahrt an die Oberfläche, wodurch die Wagen entweder im Tunnel gewartet, oder mit einem Kran durch einen Schacht an die Oberfläche gehoben wurden. [2]

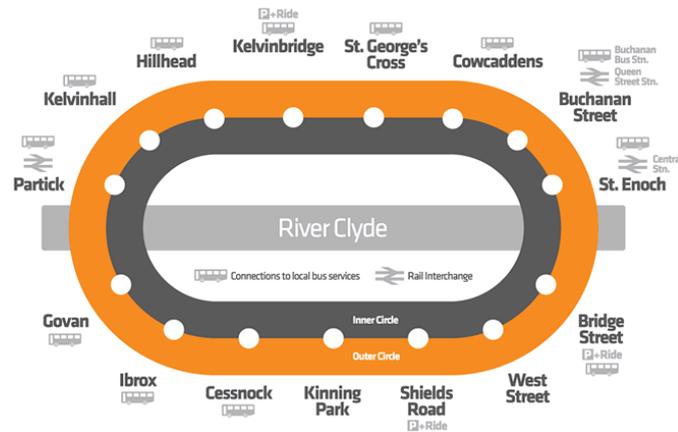


Abbildung 2: Ringnetz der Metro in Glasgow [11]

Das System erfreute sich allerdings keiner großen Beliebtheit, da es in starker Konkurrenz zur bereits bestehenden Straßenbahn stand. Die sinkenden Fahrgastzahlen und die enormen Kosten des unwirtschaftlichen Systems führten 1922 zum Bankrott der Betreibergesellschaft, wodurch die U-Bahn Eigentum der Stadt Glasgow wurde. [12] Im Jahr 1935 wurde die U-Bahn schlussendlich von der *Glasgow Corporation Tramway Department* elektrifiziert, doch auch diese Entscheidung konnte die U-Bahn vorerst nicht retten. [2]

1977 wurde die Metro stillgelegt und bis 1980 grundlegend modernisiert. Dies erfolgte durch eine Erneuerung der Stationen und Bahnsteige sowie die Ergänzung von Rolltreppen. Die alten Wagen wurden durch neuere Modelle mit einer größeren Kapazität ersetzt. Dabei handelt es sich um 33 voll angetriebene Wagen die als 2- oder 3-Wagenzüge im zwei- bzw. drei-Minuten Takt verkehren. Die über eine Stromschiene gespeisten Wagen sind in der Stahl-Aluguss-Bauweise gefertigt und werden vollautomatisch mit Zugführerbegleitung betrieben. Der bestehende Oberbau wurde runderneuert. Das heutige System, das aus vorgefertigten Betonblöcken und gummigelagerten Schienen besteht überzeugt durch einen wesentlich geringeren Instandhaltungsaufwand und eine Verminderung des Körperschalls im Vergleich zu dem vorherigen Oberbau. Die Spurweite beträgt 1219 mm bei einer maximalen Neigung von 55‰ und einem Mindestradius von 95 m. Zur Erleichterung der Reparaturarbeiten am Fuhrpark wurde ein oberirdisches Depot inklusive Verbindungen zu beiden U-Bahn-Ringen geschaffen. Die Attraktivität seitens der Fahrgäste konnte durch die Einführung eines magnetischen Fahrkartensystems und die Schaffung direkter Anbindungen an das Schnellbahnsystem gesteigert werden. [12] Erst diese Schritte konnte die Attraktivität des Unternehmens steigern und führen bis heute zu stetig steigenden Fahrgastzahlen. [2]

3.2.2 Budapest

Die seit der Selbstständigkeit Ungarns stetig wachsende Stadt Budapest war im 19. Jahrhundert auf der Suche nach neuen Verkehrslösungen. Die Stadt verfügte bereits über ein ausgedehntes Straßenbahnnetz, man entschied sich aber vorerst gegen eine Erweiterung dieses Netzes. Auslöser dafür, war die „*Andrassy ut*“. Dabei handelt es sich um eine Prunkstraße, dessen optisches Erscheinungsbild durch eine Straßenbahnlinie getrübt worden wäre. Als Lösung entschied man sich im Jahr 1893 für den Bau einer unterirdischen elektrischen Bahn. Nach nur einem halben Jahr Planungszeit und zwei Jahren Bauzeit, eröffnete die erste Linie im Mai 1896. Die Linie 1 wurde in offener Bauweise hergestellt und wird heute noch als „Kleine U-Bahn“ bezeichnet, da die Abmessungen des Tunnels mit 6 m Breite und 2,75 m Höhe über SOK (Schienen Oberkante) überdurchschnittlich klein sind. Nach dem zweiten Weltkrieg wurde, mit einer zehnjährigen Unterbrechung auf Grund der Wirtschaftskrise, bis 1970 der erste Abschnitt fertiggestellt. Diese zweite Linie wurde bereits mittels Tunnelbohrmaschinen in einer großen Tiefenlage (mehr als 60 m) hergestellt. Direkt anschließend an den Bau der Linie 2 wurde mit dem Bau der Linie 3 begonnen. Sie wurde teilweise im Schildvortrieb und in offener Bauweise errichtet und 1980 eröffnet. Die bis dato letzten Verlängerungen wurden 1990 abgeschlossen. Die aktuell letzte Ausbaustufe ist gerade im Gange. Seit 2004 finden die Bauarbeiten zur Linie 4 statt. 70% der Arbeiten sind im Moment vollendet. [12][13]

3.2.3 New York

New York hatte zum Beginn des U-Bahnbaus bereits eine Million Einwohner. Die New Yorker U-Bahn wurde wie viele amerikanische innerstädtische Bahnen vorerst als Hochbahn ausgeführt. Mit den Jahren erschien dieses Konzept jedoch nicht als zielführend und die Strecken wurden Stück für Stück in Tunnel verlegt. 1867 eröffnete die erste oberirdische Strecke, erst im Jahr 1904 war der erste U-Bahntunnel fertig gestellt. Wie auch in einigen anderen Städten mit frühen U-Bahnnetzen, lag der Bau und Betrieb vorerst in privater Hand. Somit entwickelten sich drei unabhängige Unternehmen. Erst 1932 wurde die erste nicht unabhängige Linie eröffnet, da kein privates Unternehmen die Aufgabe übernehmen wollte. Zwischen 1920 und 1940 konnten die privaten Unternehmen den finanziellen Anforderungen nicht mehr standhalten und machten Bankrott. Seit 1940 ist die *Subway* somit fast ausschließlich in staatlicher Hand. Einzig eine Linie, die Manhattan mit New Jersey verbindet, ist mit der „*Port Authority Trans-Hudson Corporation*“ (PATH) noch in privater Hand. Insgesamt weist das U-Bahnsystem in New York eine Gesamtlänge von 420 km auf und gehört somit zu den größten Netzen weltweit. Die meisten Linien sind zwei- bis viergleisig ausgeführt um auch die Tagesspitzen entsprechend handhaben zu können. Die zusätzlichen Gleise dienen

Lokalzügen, den ergänzenden Zügen für die Morgen- und Abendspitzen und Expresszügen, die nicht in jeder Station halten. Mit einem Fahrgastvolumen von rund 1,1 Milliarden Passagieren im Jahr stellt die New Yorker *Subway* ein unabdingbares Verkehrssystem dar. [12]

3.2.4 Wien

In Wien entstand die erste Pferdeeisenbahn im Jahr 1865. 1896 wurde das Netz elektrifiziert und hatte bis 1904 eine Gesamtlänge von 152 km. Nach dem Vorbild anderer Metropolen, dachte man auch in Wien über den Bau einer U-Bahn nach. Zur Realisierung kam es aber angesichts der fehlenden finanziellen Mittel vorerst nicht. 1892 wurde der Bau der dampfbetriebenen Stadtbahn beschlossen, welche die meisten Hauptstrecken Wiens miteinander verband. Das optische Erscheinungsbild wurde maßgeblich vom Architekten Otto Wagner geprägt. Mit dem Ende des 1. Weltkrieges und der darauffolgenden Wirtschaftskrise in Österreich stand die Stadtbahn vor dem Aus. Der Betrieb wurde auf Grund fehlender finanzieller Mittel eingestellt. In den darauffolgenden Jahren wurden die Strecken nur notdürftig erhalten, bis im Jahre 1923 die Gemeinde Wien die Konzession auf 30 Jahre übernahm. Auf eigene Kosten trennte die Wiener Straßenbahn die Gleise vom Eisenbahnnetz und elektrifizierte die gesamte Strecke. [12]

Der enorme Aufschwung des Automobils in der Mitte des 20. Jahrhunderts und die daraus resultierenden Verkehrsprobleme veranlassten die Stadt Wien zur Wiederaufnahme der Überlegungen zu einer U-Bahn. 1964 startete man mit den Planungen und konnte 1978 den ersten Abschnitt der Linie 1 eröffnen. Das Grundnetz beinhaltete die Linien 1, 2 und 4 und band das bestehende Stadtbahnnetz in das U-Bahnnetz teilweise mit ein. In einer zweiten Ausbauphase wurde bis zum Jahr 2000 ein 61 km langes Netz durch die Ergänzungen der Linien 3 und 6 geschaffen. Die dritte Ausbauphase beinhaltete die Verlängerungen der Linie 1 und 2, welche in der vierten Ausbauphase fortgesetzt werden. Erst im Zuge der fünften Ausbauphase wird zusätzlich auch die Linie 5 errichtet werden. [12]

Das Wiener U-Bahnnetz beinhaltet heute einige bedeutende technische Fortschritte. Auf einen verschleißarmen Betrieb wird ebenso viel Wert gelegt wie auf eine verschwindend geringe Lärmbelästigung. Wichtige Innovationen stellten dabei die Kreuzanker Drehgestelle, besonders schwingungsdämpfende Oberbauten, sowie die Erfindung des Wiener Bogens dar. Auch in Bezug auf ein verbessertes Brandverhalten und einen effizienten Tunnelbau wurden mit der Entwicklung der Kunststoff-Faserbeton-Tübbinge und dem Einsatz der „Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode“ (NATM) große Fortschritte gemacht. [12]

3.2.5 Moskau

Die Hauptstadt Moskau ist Heimat einer der wohl sagenumwobensten U-Bahnen der Welt. Die im Jahr 1935 eröffnete Metro wurde fast ausschließlich in bergmännischer Bauweise hergestellt. Da jedoch eine Einhaltung der geplanten dreijährigen Bauphase mit dieser Methode unerreichbar schien, erwarb man eine englische Tunnelbohrmaschine. Nach dessen Vorbild wurden in Folge noch weitere Maschinen konstruiert. [2][14]

Die ersten Linien, die unter Stalin errichtet wurden, sind geprägt von Säulen aus Marmor sowie Skulpturen, Mosaiken und Kronleuchtern. Stalin wollte mit der Metro ein Prestigeobjekt erschaffen, welches im starken Kontrast zum tristen Moskauer Stadtbild stand. [14]

Während des zweiten Weltkrieges stagnierte der Baufortschritt maßgeblich. Dies resultierte aus der Abberufung vieler Arbeiter für den Kriegsdienst. Als die Sowjetunion den Gegenangriff auf das nationalsozialistische Deutschland startete, wurde die tief liegende Metro zu militärischen Stützpunkten umfunktioniert. Im Verlauf des Krieges diente das U-Bahnnetz auch als Zufluchtsort für die Bewohner Moskaus. Neben einer ärztlichen Versorgung standen auch Grundnahrungsmittel und Betten zur Verfügung. [14]

Nach Kriegsende wurden die Arbeiten zur Erweiterung der Metro fortgesetzt. Mit dem Tod Stalins im Jahre 1953 veränderte sich jedoch auch die gestalterische Ausführung der Stationen. Auf Grund von finanziellen Einsparungen wurden bestehende Pläne adaptiert und ein einheitliches, schlichteres Dekorationsschema geschaffen. In den 70er Jahren lehnte man sich wieder bevorzugt an die Gestaltung der unter Stalin errichteten Stationen an. [14]

Heute besteht die Moskauer Metro aus zwölf Linien (eine davon ist als „*Light Metro*“ realisiert) mit einer Gesamtlänge von 305,5 km. Jeden Tag befördert sie bis zu 8,9 Millionen Menschen und zählt damit zu einer der am stärksten frequentierten U-Bahnen der Welt. Die bis zu einer Tiefe von 84 m gelegenen Stationen können über 670 Rolltreppen erreicht werden. Dabei weist die Rolltreppe der am tiefsten gelegenen Station „*Park Pobedy*“ eine Länge von 126 m auf. Durch den generell recht großen Stationsabstand kann eine durchschnittliche Geschwindigkeit von bis zu 41,61 km/h erreicht werden. Diese Tatsache macht die Metro zum schnellsten Fortbewegungsmittel in der Innenstadt von Moskau. Weiters gilt sie als außerordentlich zuverlässig, pünktlich und leistungsfähig. Diese hohe Anerkennung der U-Bahn seitens der Bevölkerung spiegelt sich in einem hohen Modal Split von 40,7% wieder. [2][15]

Die technische Ausführung sowie der Fuhrpark sind beispielhaft für alle ehemals sowjetischen U-Bahnen. Das sehr deutlich ausgeprägte Ring-Radialen-Netz wurde mit einem Schwellenoberbau verwirklicht. Dabei handelt es sich grundlegend um Holzschwellen, welche in Aussparungen auf Beton verlegt sind. Im Bereich von oberirdisch verlaufenden Strecken kommen Betonschwellen (für den Weichenbereich werden Holzschwellen eingesetzt) auf einem Schotteroberbau zum Einsatz. Versuche, einen schwellenlosen Oberbau zu realisieren, scheiterten an ungelösten, schalltechnischen Schwierigkeiten. Die Spurweite von 1520 mm entspricht der in Russland auch für die Vollbahn üblichen Spurweite. Als Standardschiene wird seit 1974 der Typ P65 eingebaut. Der Zugsicherung der Metro in Moskau erfolgt mittels einer Führerstandssignalisierung und einer automatischen Geschwindigkeitskontrolle. Die minimale Zugfolgezeit beträgt rekordverdächtige 80 Sekunden. [2] [12]

4 Warum eine U-Bahn?

4.1 Entscheidungskriterien

Die Entscheidung für oder gegen eine U-Bahn hängt von den unterschiedlichsten Faktoren ab und ist nur schwer zu verallgemeinern. In Europa geht man von einer überschlägigen Bevölkerung einer Stadt von etwa einer Million Menschen aus, ab der der Bau einer U-Bahn in Betracht gezogen werden sollte. Dass diese Zahl nur eine grobe Abschätzung darstellt und keineswegs als handfestes Kriterium herangezogen werden kann, erkennt man an den stark divergierenden Zahlen anderer Gebiete der Erde. Im nordamerikanischen Raum geht man beispielsweise von einer Population von 1 ½ bis 2 Millionen Menschen aus, die zum Bau einer U-Bahn benötigt werden. Überdies werden weitere Voraussetzungen gestellt. So sind zusätzliche Faktoren eine Beschäftigung von 100.000 Menschen im Stadtzentrum, eine Bevölkerungsdichte im Stadtinneren von mindestens 4.500 Menschen pro Quadratkilometer sowie ein Pendlerstrom ins Zentrum von wenigstens 40.000 Menschen täglich. [1]

Die Erfahrung hat gezeigt, dass auch Städte, die eine deutlich niedrigere Population aufweisen, erfolgreich eine Metro betreiben können. Beispiele hierfür sind die U-Bahn in Stockholm (750.000 Einwohner), Lissabon (900.000 Einwohner), Rotterdam (700.000 Einwohner), sowie Nürnberg und Oslo (unter 500.000 Einwohner). Ausschlaggebend für den Erfolg können neben der Bevölkerungszahl vor allem auch topografische Aspekte und die urbane Struktur sein. [7]

Diese Fakten legen nahe, dass eine Entscheidung rein auf Basis von Bevölkerungszahlen nur sehr unzulänglich möglich ist. Weitere Ansatzpunkte zum Entschluss für oder gegen eine Metro bieten sowohl wirtschaftliche als auch gesellschaftliche und entwicklungsbedingte Kriterien. Betrachtet man den Bau einer U-Bahn ausschließlich auf einer wirtschaftlichen Basis, so stellt man fest, dass nur vereinzelt finanzielle Erfolge durch die Erschließung mittels einer Metro erzielt werden konnten. Eines dieser seltenen Beispiele stellt die Verlängerung der *London Underground* Richtung *Heathrow Airport* dar. [1]

Eine wesentlich realistischere Abbildung der tatsächlichen Entscheidungskriterien für den Bau einer U-Bahn stellt eine auf gesellschaftlicher Basis aufgebaute Kosten-Nutzen-Analyse dar. Diese berücksichtigt nicht nur die offensichtlichen Kosten eines Projekts, sondern bezieht auch die indirekten Kosten in die Entscheidung mit ein. So schlagen hierbei beispielsweise nicht rein die Baukosten oder Instandhaltungskosten zu Buche, sondern auch die Zeitersparnis für die Passagiere, ein geringer Platzbedarf oder eine

daraus resultierende sinkende Unfallstatistik im Straßenverkehr, sprich externe Kosten und Nutzen. Ein Beispiel hierfür stellt die gesteigerte Attraktivität des Stadtzentrums dar, welche nur schwer in Nutzen darzustellen ist, dennoch einen großen Einfluss auf die Entscheidung haben kann und somit auf jeden Fall einer ausführlichen Formulierung bedarf. Schlussendlich sind auch die Wahl der Lebensdauer einer Investition und der angenommene Diskontierungszinssatz entscheidende Kriterien beim Bau einer U-Bahn. Unumstritten ist, dass diese Methode es vermag, eine absolute Kostenwahrheit widerzuspiegeln. Sie bietet eine gute Möglichkeit um eine Reihung unterschiedlicher Lösungen zu ermitteln. [1][16]

Entwicklungsbedingte Kriterien können beim Bau einer Metro ebenso entscheidend sein wie die zuvor erwähnten Punkte. So steigen zum Beispiel im Einzugsgebiet einer U-Bahn die Immobilien und Grundstückspreise merklich an. Dies stellt nicht nur eine Wertsteigerung für die anliegenden Besitztümer dar, sondern initiiert auch die Erschließung bislang kaum entwickelter Stadtgebiete. Für den U-Bahn-Betreiber selbst bietet die Vermarktung der in seinem Besitz befindlichen Grundstücke, welche für den Betrieb oder Bau der Metro benötigt werden, oft eine gute finanzielle Möglichkeit. Die Priorität liegt dabei vor allem bei den Stationen, die zum Beispiel durch den Bau eines Einkaufszentrums auch für die Stadt selbst einen finanziellen Nutzen bieten. [1]

Der Entschluss für oder gegen den Bau einer U-Bahn ist somit von vielen unterschiedlichen Faktoren abhängig. Dabei sollte nicht vergessen werden, dass das Potential, das von einer U-Bahn ausgeht, nur schwer von einem anderen Verkehrsmittel erreicht werden kann. So können mit einer Metro bis zu 50.000 und mehr Menschen pro Richtung innerhalb einer Stunde transportiert werden. Dies stellt die vier- bis fünffache Leistungsfähigkeit einer achtspurigen Autobahn dar. Dabei ist der Platzverbrauch einer U-Bahn an der Oberfläche fast gleich Null. Diese Zahlen machen deutlich, dass die Handhabung des aktuellen Verkehrsaufkommens in Städten wie London oder New York ohne U-Bahn schlichtweg nicht machbar wären. [1]

Etwas fragwürdiger stellt sich die Situation beim Energieverbrauch eines U-Bahnnetzes dar. Nicht nur aus umwelttechnischen Gründen, sondern auch in Bezug auf die Abhängigkeit eines Landes von den Schwankungen des weltweiten Ölpreises, ist der Bedarf an Erdöl von großer Bedeutung. Mit einem überschlägigen Wert von 0,9 kWh pro Reisenden und Kilometer schlägt das Auto nicht überraschend mit einem sehr hohen Wert zu Buche. Dem gegenüber stehen 0,5 kWh pro Personenkilometer bei einer U-Bahn. Etwas frappierend wirkt hingegen, dass der Stadtbus einen nur kaum höheren Energieverbrauch, als die U-Bahn aufweist. Dies resultiert aus dem verhältnismäßig großen Eigengewicht der Bahn in Bezug auf den Fahrgast. Der Vorteil der U-Bahn gegenüber dem Stadtbus liegt, trotz eines sehr ähnlichen Energieverbrauches, in der

elektrischen Traktion. Der dazu benötigte Strom ist unabhängig von der zur Stromerzeugung genutzten Energiequelle. Somit kann vor allem in Zukunft der benötigte Strom bevorzugt aus erneuerbaren Energien gewonnen werden. [1][17]

Auch zur Aufrechterhaltung der Mobilität der Bevölkerung einer Stadt kann eine U-Bahn einen wichtigen Beitrag leisten. Der öffentliche Verkehr ermöglicht auch Menschen ohne Zugang zu privaten Transportmitteln am gesellschaftlichen oder beruflichen Leben teilzunehmen. Doch auch wenn das private Verkehrsmittel ausfällt, wird durch den öffentlichen Verkehr die Mobilität garantiert. Diese Tatsache rechtfertigt unter anderem bis zu einem gewissen Grad die meist notwendige finanzielle Unterstützung einer Metro durch öffentliche Mittel. [1]

Die Kosten eines Metro-Neubaus belaufen sich zwischen 25 und 150 Millionen Euro pro Kilometer. Auf Grund unserer gesellschaftlichen Struktur muss das System die morgendlichen und abendlichen Spitzenstunden bewältigen können. Dies führt zu einem meist ineffizienten Betrieb während der restlichen Zeit. [1]

Der Beschluss für oder gegen eine Metro bedingt somit eine detaillierte und überaus vielseitige Betrachtung und lässt sich nur schwer verallgemeinern.

4.1 Der Einfluss der U-Bahn auf die Stadtentwicklung

Seit jeher prägen Verkehrssysteme die Entwicklung einer Stadt maßgeblich. Die Metro hat seit dem Bau der ersten U-Bahn in London Ende des 19. Jahrhunderts, auf Grund ihrer großen Leistungsfähigkeit, einen bedeutenden Einfluss auf Siedlungsstrukturen und Entwicklungszonen der jeweiligen Metropolen.

Auslöser und Triebfeder zur Intention der U-Bahn in London war die Auslastung der bestehenden Verkehrssysteme. Die Leistungsfähigkeit der Straße reichte nicht mehr aus, um die täglichen Pendlerströme bewältigen zu können und auch das Flächenangebot der Stadt war erschöpft. Somit musste eine weitere Lösung gefunden werden, um ein leistungsfähiges Verkehrssystem zu schaffen. Das Ergebnis war das bis heute vielfach kopierte System der U-Bahn. Durch den Bau der U-Bahn konnte das bestehende Verkehrsaufkommen wesentlich effizienter abgewickelt werden und das bis dato ungelöste Verkehrsproblem war geklärt. Ein weiterer Effekt war eine weitläufigere Entwicklung der Stadt. Als Resultat konnten auch bisher ungenutzte Randflächen der Stadt auf Grund der besseren Erreichbarkeit genutzt und besiedelt werden. Dies führte zu einer Verschmelzung der Dörfer und Vorstädte mit dem Zentrum und einer weitläufigen Expansion der Stadt. Als Beispiel sei hier Berlin genannt, an dem diese Entwicklung besonders deutlich wurde. Auf Grund der ansteigenden Abwanderung in die

Warum eine U-Bahn?

Stadtrandgebiete wandelte sich auch die Bedeutung des Stadtzentrums. Wohngebiete und Industrie rückten an die Stadtgrenzen ab und der Stadtkern übernahm immer mehr die Funktion eines Geschäfts-, Verwaltungs- und Dienstleistungsbereichs. [2]

In weiterer Folge entwickelten sich Metros von einer Lösung für bestehende Verkehrsströme zu einer Möglichkeit, Verkehr an der gewünschten Stelle zu initiieren. Meist zieht die Erschließung eines bislang nur gering besiedelten Gebietes durch eine U-Bahn eine blühende Entwicklung dieses Sektors mit sich. So ist in vielen Städten eine starke Zunahme der Bevölkerungsdichte entlang von Metrostrecken zu erkennen. [2]

Heutzutage kommt der U-Bahn somit nicht rein die Rolle der Kompensation von Verkehrsströmen zu, sondern die extensive Stadtentwicklung wird meist bewusst durch den Ausbau einer Metro gesteuert. Aktuell kann dieser Vorgang anhand des Ausbaus der U2 in Wien beobachtet werden. Mittels der Erweiterung der Linie 2 soll ein ganzes Stadtgebiet neu erschlossen werden und somit ein Anreiz zur Besiedelung geschaffen werden. [18]

Somit stellt die Analyse und Betrachtung der zukünftigen Entwicklungsgebiete einer Stadt heute einen wichtigen Faktor bei der Planung einer U-Bahn dar.

5 Die Pariser Metro

Paris ist seit dem Jahr 987 n. Chr. nicht nur Hauptstadt von Frankreich, sondern auch dessen wirtschaftliches Zentrum. Der Großraum Paris mit seinen Vorstädten wird als „Île-de-France“ bezeichnet und ist aktuell Heimat von rund 11,6 Millionen Menschen. [19] Paris selbst hatte bereits in den 1920er Jahren, mit knapp drei Millionen Einwohnern, seine bislang höchste Bevölkerungsdichte. Durch eine Abwanderung in die Vorstädte kam es danach zu einem Absinken der Bevölkerungszahlen. [20] Seit 1999 wurde allerdings eine deutliche Steigerung der Geburtenrate verzeichnet und so lebten im Jahr 2009 bereits wieder 2,2 Millionen Menschen in Paris. [19]

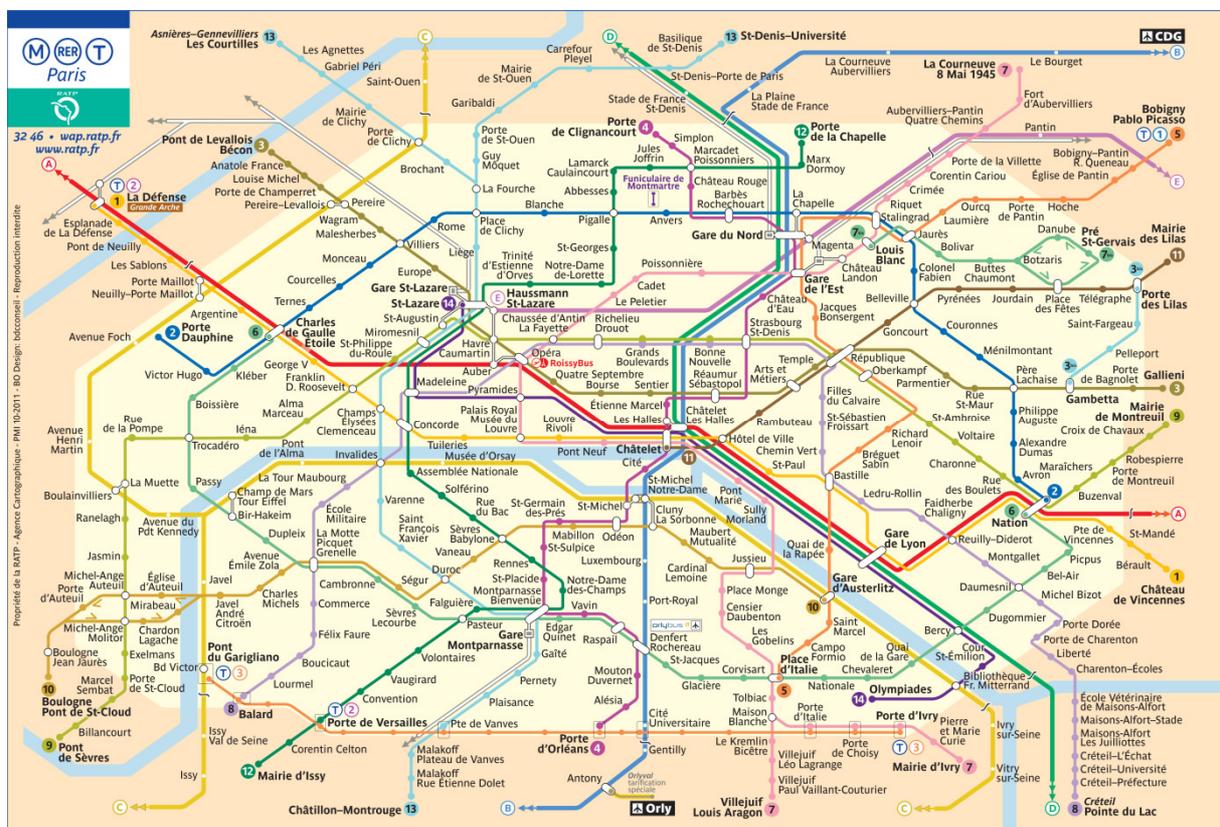


Abbildung 3: Netz der Pariser Metro inklusive RER und Straßenbahn [21]

Die Pariser Metro ist die viertälteste U-Bahn in Europa und eine der berühmtesten der Welt. Die 14 Hauptlinien und die zwei Ausläufer der Strecken 3 und 7 stellt eines der allgemein größten und engmaschigsten Netze der Welt dar. Die 215,5 km lange [22] Metro besitzt 297 Stationen. Zählt man jene Stationen in denen sich verschiedene Linien kreuzen mehrfach, so ergibt sich sogar eine Anzahl von 381 Stationen. Zusammen mit den fünf Linien der RER, dem Bussystem, der Straßenbahn, dem VAL-System und einer Standseilbahn erschließt sie das gesamte Gebiet von Paris. Außerordentliche 92% des gesamten Netzes liegen unterirdisch. Des Weiteren verfügt die Metro über eine Vielzahl

von nicht im Fahrgastbetrieb befahrenen Strecken, welche vorrangig von Arbeitsfahrzeugen genutzt werden. [12][20]

5.1 Entstehung

Erste Überlegungen zum Bau einer U-Bahn in Paris wurden schon sehr früh gemacht. Bereits im Jahr 1855 sollen erste Vorschläge aufgekommen sein. [12] Trotz vieler äußerst kreativer Möglichkeiten wurde auf Grund einer mangelnd geeigneten Lösung über mehrere Jahrzehnte hinweg keiner dieser Pläne realisiert. Ein zusätzliches Hindernis stellten die unterschiedlichen Vorstellungen von Regierung und Stadtverwaltung dar. Der französische Staat wollte die Kopfbahnhöfe mittels einer Eisenbahnstrecke verbinden, während die Stadt Paris auf der Suche nach einem Verkehrssystem zur Erschließung des Ballungsraumes war. [20]

Deutlich vorangetrieben wurde die Entscheidung schlussendlich durch die Erfindung der elektrischen Traktion und die Ausrichtung der Weltausstellung 1900 in Paris. [20] Der Staat erkannte 1895 die Notwendigkeit einer städtischen Bahn an und genehmigte somit den Bau der Metro mit Priorität auf die Verbindung der für die Weltausstellung benötigten Standorte. Unter der Leitung von André Berthelot entstand ein Plan mit einer Gesamtlänge von 65 km, der sechs Linien enthielt. 1897 wurde dieser von der Regierung anerkannt und am 30. März 1898 genehmigt. Am 1. November 1898 konnten die Bauarbeiten für die Metro unter Hochdruck aufgenommen werden. Statt in der anfänglich vorgesehenen Meterspur wurde die Bahn in Normalspur hergestellt. Die Eigenständigkeit der Metro wurde jedoch mittels eines engen Tunnelprofils und einer beschränkten Wagenbreite von 2,40 m erreicht. [20][23]

Heute verkehrt die Metro täglich zwischen 5:30 Uhr und 1:00 Uhr und befördert im Jahr insgesamt 1,479 Milliarden Fahrgäste (Stand 2009).[20][24]

5.2 Die Betreiber der Pariser Metro

Die Konzession der anfänglich gebauten sechs Linien (ca. 60 km) oblag der privaten Gesellschaft *Compagnie du Métropolitain de Paris* (CMP). Der Rohbau der Tunnel wurde von der Stadt Paris durchgeführt. 1902 beteiligte sich ein weiteres unabhängiges Unternehmen, die *Compagnie du Chemin de Fer Electrique Nord-Sud de Paris*, am öffentlichen Verkehr, welches 1910 zwei eigenständige Metrolinien eröffnete. Die als A und B bezeichneten Linien sollten in ihrer Qualität den Linien der CMP überlegen sein, doch die finanziellen Probleme der Gesellschaft, auch auf Grund der Eigenverantwortlichkeit für den Tunnelbau, führten zu einer Übernahme durch die CMP im

Jahre 1930. Heute sind die damaligen Strecken Teil der Linie 12 sowie der Linie 13. Das Bussystem, welches damals nur die Vorstädte von Paris bediente, wurde nach Ende des zweiten Weltkrieges an die CMP übergeben. Nur kurz darauf, im Jahr 1949, wurde die *Régie autonome des transports parisiens* (RATP) gegründet. Diese übernahm das Netz der CMP und betreibt es bis heute. Aktuell führt die RATP neben der Metro und dem Bussystem auch noch zwei Straßenbahnlinien, ein VAL-System, eine Standseilbahn und gemeinsam mit der SNCF die RER-Linien A und B. [12][20]

Nach Ende des zweiten Weltkriegs führte das starke Anwachsen der Vorstädte zu ergänzenden Überlegungen zur Metro. Um auch die umliegenden Gebiete von Paris zu erschließen wurden die fünf Linien der *Réseau express régional* (RER) errichtet. Das RER stellt ein leistungsfähiges regionales Schienenverkehrssystem für Paris dar und verfügt, zur Anknüpfung an umliegende Gebiete, über einen großen Lichtraum. In Paris selbst liegen die Stationen 25 bis 30 Meter unter der Oberfläche. Die Linien A und B werden, wie bereits erwähnt, gemeinschaftlich von der RATP und der *Société Nationale de Chemin de Fer Français* (SNCF) betrieben, wohingegen die Linien C, D und E alleinig der SNCF unterliegen. [12]

Zur Koordination und strategischen Entwicklung des öffentlichen Verkehrs dient das *Syndikat des Transports Parisiens* (STP). Dieses dient der Abstimmung der RATP und SNCF sowie der lokalen Busbetreiber untereinander und ist aus Vertretern der Regierung und lokalen Behörden zusammengesetzt. [12]

5.3 Das Streckennetz

5.3.1 Linie 1

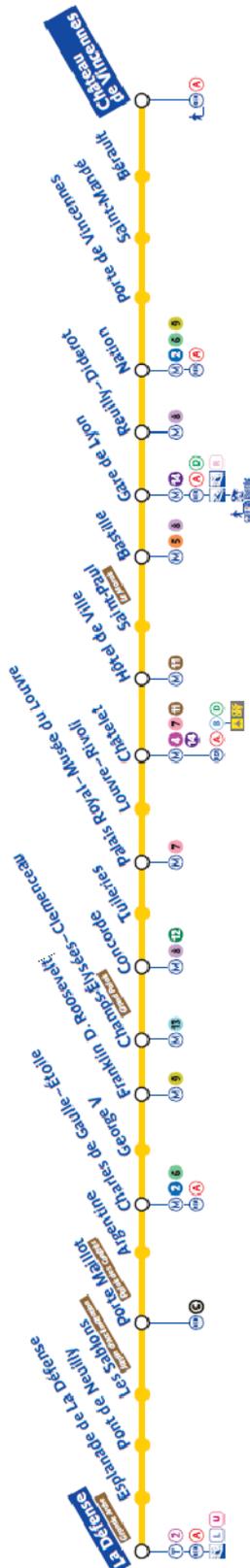


Abbildung 4:
Linie 1 [20]

Im Jahr 1900 wurde die Pariser Metro mit der Linie 1 eröffnet. Diese führte von *Port Maillot* nach *Port de Vincennes* in einer West-Ost-Achse quer durch die Stadt. Die Strecke verläuft in diesem Abschnitt bis auf die Querung des Saint-Martin-Kanals vollkommen unterirdisch. Die in Abbildung 7 ersichtliche Überführung ist in einer engen S-Kurve ausgeführt und beinhaltet mit 40 m den heute kleinsten Radius des gesamten Netzes. An dieser Stelle befindet sich auch die einzige nach oben offene Station der Linie 1 mit dem Namen „*Bastille*“. Beide Endpunkte der Strecke wurden als Schleife mit getrennten Tunneln und Inselbahnsteigen ausgeführt und dienten dem raschen Wenden der Züge. Eine ähnliche Schleife findet man noch heute an der Station *Porte Dauphine* der Linie 2, wie in 5.3.2 erläutert. Die damaligen Schleifen wurden ohne Fahrgäste durchfahren und besaßen sogar einen noch kleineren Radius von nur 30 m. [20][23][25]

1934 wurde die Linie 1 in Richtung Osten bis *Château de Vincennes* verlängert. Im Zuge dessen wurde die Schleife an der ehemaligen Endstation *Port de Vincennes* entfernt und der Platz für das damalige 2. Gleis zur Verbreiterung der Bahnsteigkante genutzt. (siehe Abbildung 6) [20]

Nur ein paar Jahre später wurde 1937 auch die Verlängerung Richtung Westen bis *Pont de Neuilly* eröffnet. Die somit nicht mehr zum Wenden benötigte Schleife bei *Porte Maillot* wurde jedoch als Abstellgleis beibehalten und die neue Strecke darunter hinweg geführt. *Porte Maillot* selbst wurde etwas weiter westlich als viergleisige Station neu aufgebaut. (siehe Abbildung 5) [20][23]

In den 1960er Jahren beschloss man die Linie 1, welche damals die betriebsamste Strecke war, auf gummiereifte Züge umzustellen. 1963 fuhr der erste dieser Züge und im

Dezember 1964 waren alle Fahrzeuge auf Gummireifen umgestellt worden. [20][23]

Die letzte Erweiterung erfuhr die Linie 1 im Jahre 1992. Damals wurde sie Richtung Westen um weitere zwei Stationen verlängert und endet nun in der Station *La Défense*. Im Zuge dieser Verlängerung quert die Strecke die Seine in der Mitte einer Schnellstraße und verläuft danach gemeinsam mit dieser in einem Tunnel. Die Endstation ist in zwei getrennten eingleisigen Bahnsteigen ausgeführt. Die Züge wenden danach in einer Kehranlage. [20]

Aktuell ist die 16,6 km lange Linie 1 mit täglich bis zu 750.000 Fahrgästen die am stärksten frequentierte in Paris. Die jüngste Neuerung dieser Strecke ist die Umstellung auf einen vollautomatischen Betrieb. Im März 2012 fuhren bereits 14 der 49 Züge fahrerlos auf der Linie 1. Bis 2013 sollen alle Züge umgerüstet sein. Da ein Einstellen der Linie undenkbar ist, müssen alle Arbeiten im laufenden Betrieb abgewickelt werden. Somit wurde während den Pausen in der Nacht die Installation der Leittechnik und des Telekommunikationssystems vorgenommen, sowie die Erneuerung der Fahrzeuge und die Anpassung der Ausstattung der Leitzentrale. Die Sicherheit der Fahrgäste beim Ein- und Aussteigevorgang wird durch Bahnsteigtüren gewährleistet. Mittels des Zugsicherungs- und Steuerungssystem *Trainguard MT* kann die volle Leistungsfähigkeit des Systems ausgeschöpft werden und die Taktfrequenz flexibel angepasst werden. Das eingesetzte System garantiert eine höhere Energieeffizienz und Zuverlässigkeit. Bei einem Systemausfall oder nach nächtlichen Pausen erkennt das System die Position des Zuges wieder selbstständig bzw. der Zug ist in der Lage sich selbst zu orten und in Notfällen bis zur nächsten Station zu fahren. [26]

Eine detaillierte Beschreibung des Systems des vollautomatischen Betriebes wird in Unterkapitel 9.5 vorgenommen.

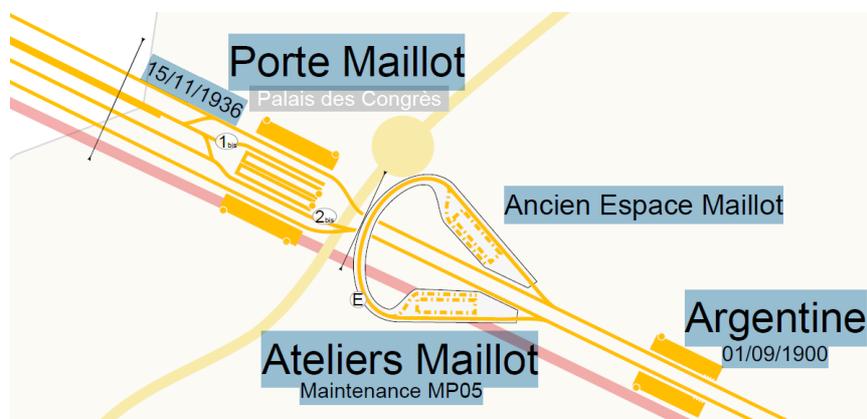


Abbildung 5: Linie 1 – *Porte Maillot* [27]

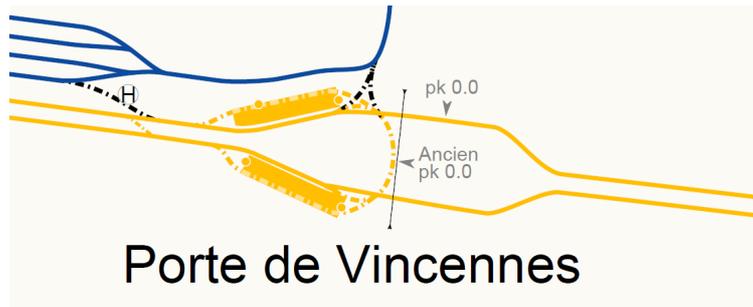


Abbildung 6: Linie 1 – entfernte Schleife an der *Porte de Vincennes* [27]



Abbildung 7: Linie 1 – Engste Kurve des Netzes bei *Bastille* mit einem Radius von 40 m [27]

5.3.2 Linie 2



Abbildung 8:
Linie 2 [20]

Kurz nach der Linie 1 ging 1900 auch der erste und westlichste Abschnitt der, ursprünglich als Linie 2 Nord bezeichneten Strecke, zwischen *Porte Dauphine* und *Étoile* in Betrieb. Der Name „*Ligne 2 Nord*“ entfiel, als der südliche Teil der Strecke 1907 in die Linie 5 überging. Der anfänglich nur als Zubringerstrecke für die Linie 1 eröffnete Abschnitt wurde in den folgenden drei Jahren zuerst bis *Anvers* und darauffolgend bis *Alexandre Dumas* und weiter bis *Nation* verlängert. Seitdem wurde die Führung der 12,3 km langen Linie 2 nicht mehr verändert. [20][23]

Die Linie 2 besitzt vier Hochbahnstationen, welche sich auf einer 2 km langen Viaduktstrecke befinden. Es handelt sich dabei um die Stationen *Barbès-Rochechouart* bis *Jaurès*. Die Konstruktion dient der Überquerung des Saint-Martin-Kanals sowie der Eisenbahnstrecken Richtung Bahnhof *Nord* und *Est*. Zwischen *Barbès-Rochechouart* und *Stalingrad* führt die Metro in einer Einhausung über den Eurostar-Terminal. [20][23][22]

Erwähnenswert sind die beiden Endstationen. Die Station *Nation* ist eine Wendeschleife, die im Fahrgastbetrieb durchfahren wird. Zum Ein- und Aussteigen dient ein gemeinsamer Mittelbahnsteig. Die Ausführung der Schleife ist in Abbildung 9 zu erkennen. Bei *Porte Dauphine* hingegen befindet sich eine nicht im Fahrgastbetrieb durchgeführte Schleife, wie sie anfänglich auch an den Endstationen der Linie 1 zu finden war. [20][23][25]

Die in einem Bogen gelegene Station *Victor Hugo* wurde im Jahr 1931 Richtung Osten in die anschließende Gerade verschoben um die Ein- und Ausstiegssituation zu verbessern. Der ursprüngliche Bahnsteig ist erhalten geblieben. (siehe Abbildung 11) [1]

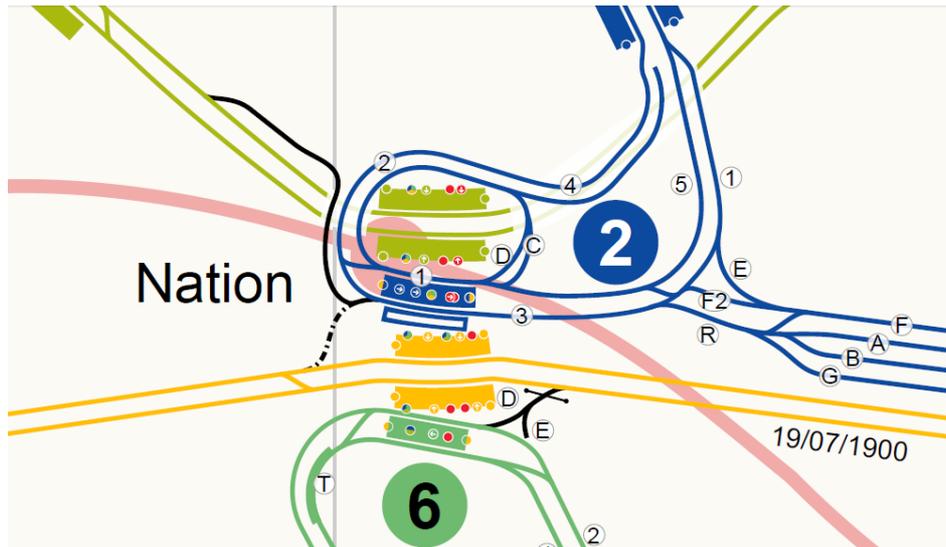


Abbildung 9: Linie 2 – Ostschleife unter der *Place de la Nation* [27]

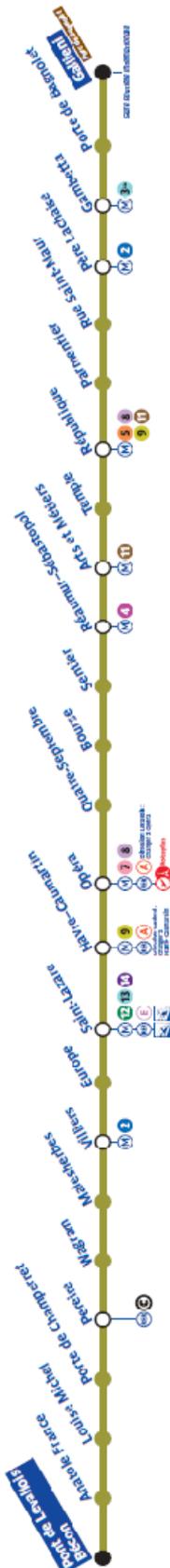


Abbildung 10: Linie 2 – Westschleife an der *Porte Dauphine* [27]



Abbildung 11: Linie 2 – Verlegte Haltestelle *Victor Hugo* [27]

5.3.3 Linie 3

Abbildung 12:
Linie 3 [20]

Die 11,7 km lange, durchgehend unterirdisch verlaufende, Linie 3 führt ähnlich der Linie 1 etwas nördlicher von Westen nach Osten. Sie wurde ebenso in mehreren Abschnitten eröffnet. Anfänglich nahm sie ihren Betrieb im Jahr 1904 nur zwischen *Villiers* und *Père Lachaise* auf. 1905 folgte die Verlängerung Richtung Osten bis *Gambetta*. An die dort bestehende Schleife wurde 1921 eine Verlängerung bis nach *Porte des Lilas* eröffnet. 1921 wurde eine zweite Erweiterung von *Gambetta* ausgehend bis zur Station *Gallieni* geführt, welche ab dann als Endhaltestelle der Linie 3 diente. Die Strecke bis *Porte des Lilas* wurde, auf Grund der geringen Verkehrsbedeutung, zur Linie 3bis. Die Umgestaltung der Station *Gambetta* erwies sich als aufwendig, weswegen man den ehemaligen Abfahrtsbahnsteig der Schleife zu einer Stumpfendstation umbaute. Der ehemalige Ankunfts-bahnsteig wurde zu Gunsten eines Abstellgleises aufgegeben. Die neue Station für die Linie 3 wurde etwas westlicher wieder aufgebaut und verschmolz mit der damals sehr nahe an dem alten Bahnsteig gelegenen Station *Martin Nadaud*, wie in der Abbildung 13 zu erkennen. [20][23]

Im Westen sollte die Linie 3 bei *Villiers* auf die Linie 2 übergehen, weshalb die Stationen ursprünglich auf gleicher Höhe errichtet wurden. Ebenso wie die damals bestehende Endschleife wurde auch die Station nachträglich verändert. Um die Strecke in Richtung Westen zu verlängern entfernte man die Schleife und die Linie 3 wurde, 1910 zuerst bis *Pèreire* und 1911 bis *Porte de Champerret*, unter der Linie 2 weitergeführt (siehe Abbildung 14). 1937 erfolgte dann der endgültige Ausbau bis *Pont de Levallois*. Die zur damaligen Zeit bestehende Schleife an den vorläufigen Endstationen *Villiers* wurde aufgelassen, die Schleife bei *Porte de Champerret* (siehe Abbildung 15) wird im Fahrgastbetrieb nicht mehr genutzt. [20][23]

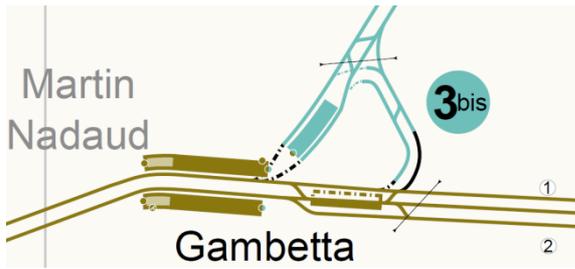


Abbildung 13: Linie 3 – Umgestaltung der Station *Gambetta* für Weiterführung der Linie 3 und Eigenständigkeit der Linie 3bis [27]

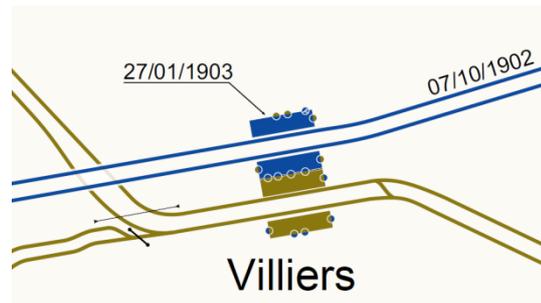


Abbildung 14: Linie 3 – Weiterführung unter der Linie 2 bei *Villiers* [27]



Abbildung 15: Linie 3 – Schleife bei *Porte de Champerret* [27]

5.3.4 Linie 3bis



Die Linie 3bis war, wie in Abschnitt 5.3.3 bereits erläutert, anfänglich Teil der Linie 3. Nach einer Erweiterung der Linie 3 wurde der 1,3 km lange Abschnitt von *Gambetta* bis *Porte des Lilas* als eigenständige Linie 3bis ausgeführt, da die Verkehrsbedeutung wesentlich geringer war, als die der neu errichteten Strecke der Linie 3. [20]

Die Umgestaltung der Station *Gambetta* ist in Abbildung 13 ersichtlich.

Abbildung 16: Linie 3bis [20]

5.3.5 Linie 4

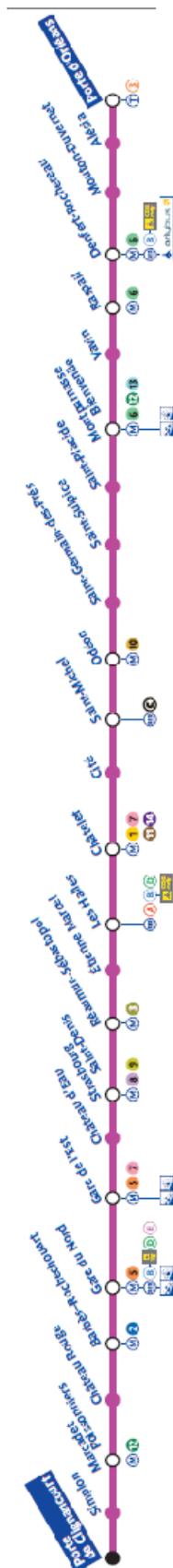


Abbildung 17:
Linie 4 [20]

Die Linie 4 ist neben der Linie 1 die bedeutendste der Pariser Metro. Die 10,6 km lange Strecke quert die Stadt in Nord-Süd-Richtung und hat Umsteigeverbindungen zu allen Hauptlinien der Metro und RER-Linien. Eröffnet wurde die Linie jedoch getrennt in einen nördlichen und einen südlichen Teil. Grund dafür war die große Herausforderung einen Tunnel unter der Seine zu bauen. So wurde 1908 erst der Abschnitt *Porte de Clignancourt - Châtelet* und 1909 die Strecke zwischen *Raspail* und *Porte d'Orléans* eröffnet. 1910 konnte der Bau des Verbindungstunnels erfolgreich abgeschlossen werden und die zwei Abschnitte schmolzen zusammen. Sowohl der Tunnel, als auch die beiden angrenzenden Stationen *Cité* und *Saint-Michel*, wurden in Caisson-Bauweise errichtet. Die beiden Endhaltestellen sind als Schleife ausgeführt um ein schnelles Wenden zu ermöglichen (siehe Abbildung 18 und Abbildung 19). *Porte de Clignancourt* verfügt sogar über drei weitere außen liegende Schleifen zum Abstellen von Fahrzeugen. [20][23]

Nur im Jahr 1977 wurde die Streckenführung noch leicht verändert. Die Station *Les Halles* musste damals zu Gunsten eines neuen RER-Bahnhofes, wie in Abbildung 20 ersichtlich, um 30 m nach Osten verschoben werden. 1966/67 wurde die Linie 4 auf Gummireifenbetrieb umgerüstet. Die 2011 geplante Verlängerung der Linie 4 Richtung Süden ist bis zum heutigen Tag noch nicht abgeschlossen. [20][23][27]



Abbildung 18: Linie 4 – *Porte de Clignancourt* [27]

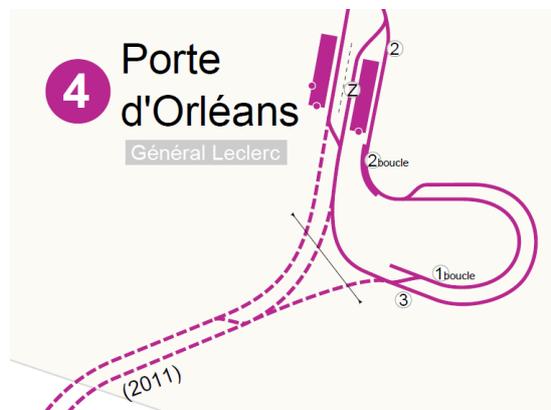


Abbildung 19: Linie 4 – *Porte d'Orléans* [27]

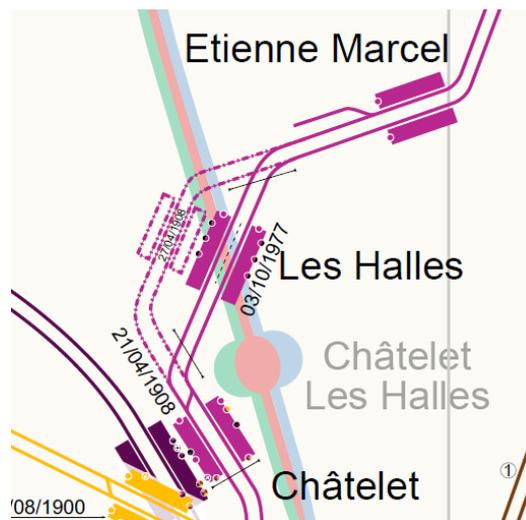


Abbildung 20: Linie 4 – Verlegung der Station *Les Halles* [27]

5.3.6 Linie 5



Abbildung 21:
Linie 5 [20]

Der erste Abschnitt der heute insgesamt 14,6 km langen Linie 5 wurde 1906/07 eröffnet. Er reichte von *Place d'Italie* bis *Gare du Nord* und wurde in fünf Teilstücken in Betrieb genommen. Sowohl die Querung der Seine, als auch des Saint-Martin-Kanals erfolgen mittels einer Brücke. Südlich der Seine verläuft die Strecke direkt durch die Bahnsteighalle des Kopfbahnhofes *Austerlitz*. In dem Bereich zwischen den Brücken liegt die Bahn für einen sehr kurzen Abschnitt in Tieflage. Im Anschluss an beide Brücken geht die Line nach einem kurzen Übergangsstück wieder in den Tunnel über. Am *Place d'Italie* teilte sich die Linie 5 ihren Bahnsteig mit der Endstation der damaligen Linie 2 *Sud*. Auf Grund der daraus resultierenden Behinderungen entschied man sich beide Linien zwischen 1907 und 1942 zu einer gemeinsamen Linie 5 zusammenzulegen. Auch nach dem Bau der Linie 6 von *Place d'Italie* bis *Nation* blieb die Linie 5 in dieser Art bestehen. 1942 verlängerte man drei Jahre verspätet, auf Grund des zweiten Weltkrieges, die Linie 5 Richtung Norden bis *Église de Pantin* und erkannte, dass diese, inklusive des südlichen Metrorings, zu lang geworden war. Auf Grund dessen trennte man die ehemalige Linie 2 *Sud* wieder ab und vereinte sie mit der Linie 6 (siehe Abbildung 22). Die bislang bestehende Schleife bei *Gare du Nord* (siehe Abbildung 23) wurde unbrauchbar und dient heute zur Übung für Fahrer. 1985 wurde die Strecke zum bislang letzten Mal verlängert. Richtung Norden ergänzte man zwei weitere Stationen mit der neuen Endhaltestation *Bobigny Pablo Picasso* und einem an die Strecke angrenzenden Depot. [20][23]

Einen dauerhafter Kritikpunkt an der Führung der Linie 5 findet man im Bereich *Quai de la Rapée*. Hier verläuft die Metro ganz in der Nähe des Fernbahnhofes *Gare de Lyon* (siehe Abbildung 24). Als die Linie 5 im Jahre 1906 ihre nördlichste Station bei *Quai de la Rapée* (damals *Place Mazas*) hatte, wurde auch der Bahnhof *Gare de Lyon* über eine kurze Verbindungsstrecke angefahren. Dazu erfolgte in

Place Mazas ein Fahrtrichtungswechsel. Nach der Verlängerung der Strecke 5 über *Place Mazas* hinaus wurde der Betrieb dieses Abschnittes wieder eingestellt. Zwischen 1937 und 1967 wurde er für eine batteriebetriebene 600 mm-Schmalspurbahn verwendet, um die Fahrgeldeinnahmen der RATP zum Hauptquartier zu befördern. [20][23]

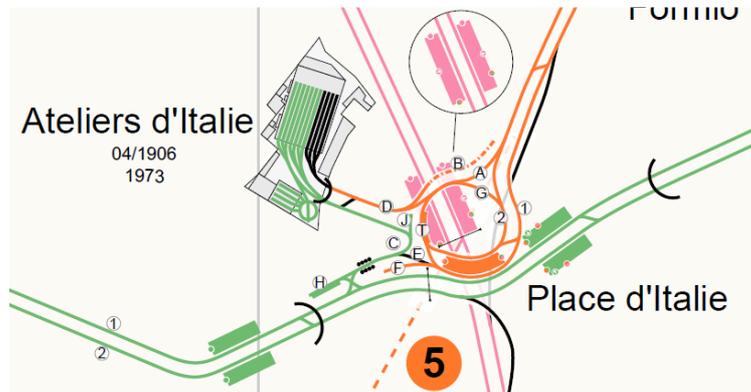


Abbildung 22: Linie 5 – *Place d'Italie* [27]

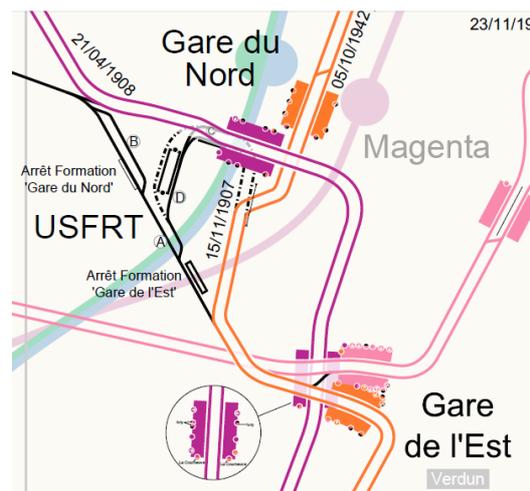


Abbildung 23: Linie 5 – *Gare du Nord* [27]



Abbildung 24: Linie 5 – Verbindung zu *Gare de Lyon* [27]

5.3.7 Linie 6

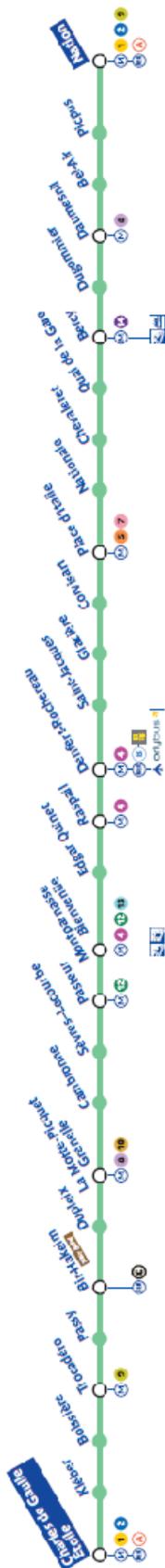


Abbildung 25:
Linie 6 [20]

Die Linie 6 bestand zu ihrer Eröffnung im Jahr 1909 nur aus einem kurzen Stück zwischen *Place d'Italie* und der Station *Nation*. Fertiggestellt war die Linie jedoch schon wesentlich früher, jedoch wartete man mit der Inbetriebnahme auf Grund der geringen Verkehrsbedeutung noch einige Zeit zu. 1931 beschloss man zum ersten Mal den südlichen Metroring, der anfänglich Linie 2 *Sud* hieß und danach von der Linie 5 befahren wurde, an die Linie 6 zu koppeln. So reichte die Linie 6 von *Nation* bis *Étoile*. Auslöser dafür war die Kolonialausstellung. Nach Ende der Ausstellung ging man wieder auf die ursprüngliche Lösung zurück bis man sich im Jahr 1942 endgültig zu dieser Abänderung entschloss. Die nun unbrauchbar gewordene Verbindung der Linie 5 mit der jetzigen Linie 6 fand durch den Einbau einer Wagenwaschanlage neue Verwendung. [20][23]

Von der insgesamt 13,7 km langen Strecke verlaufen 7,6 km über Viadukte. Zweimal wird die Seine durch eine Brücke überwunden. Daraus resultiere eine hohe Lärmbelastung an der Oberfläche, welche durch die Umrüstung auf Gummireifen in den Jahren 1972 bis 1974 gemindert werden sollte. Die östliche Endstation ist in einer Schleife ausgeführt, die während der Hauptverkehrszeiten, auf Grund der Zeitersparnis, durchfahren wird. Ansonsten dient sie dem Abstellen von Zügen. Die westliche Endhaltestelle *Étoile* besitzt ebenfalls eine Schleife, allerdings mit nur einer Halteposition. Somit wird für längere Aufenthalte die 4-gleisige Station *Kléber* genutzt (siehe Abbildung 26). [20][23]

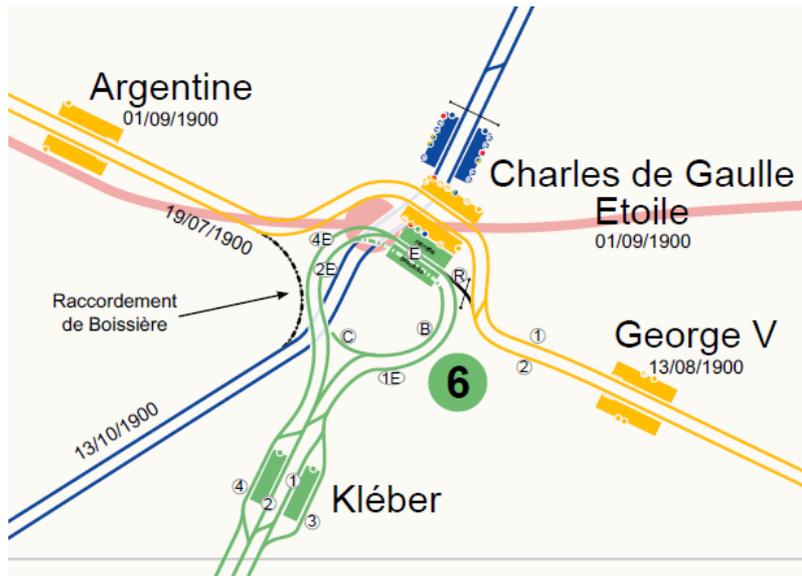


Abbildung 26: Linie 6 – Endstation u. Kléber [27]

5.3.8 Linie 7



Abbildung 27:
Linie 7 [20]

Die 22,5 km lange Linie 7 ist die längste durchgehende Strecke des gesamten Netzes. Sie liegt vollständig unterirdisch und beinhaltet mit bis zu knapp 29 m auch die am tiefsten gelegene Station der Pariser Metro (*Buttes Chaumont*). Durch diese Linie war ursprünglich geplant die nordöstlichen Bezirke von Paris zu erschließen. Die Entscheidung für die jetzige Streckenführung fiel jedoch erst nach langer Diskussion. 1910 gingen gemeinsam die ersten beiden Teile von *Porte de la Vilette* bis *Louis Blanc* und weiter bis *Opéra* in Betrieb. Die Strecke zieht sich in einem Ring gegen den Uhrzeigersinn durch die Stadt und endet mit einer mehrgleisigen Endschleife bei *Porte de la Vilette*. 1911 folgte die von *Lois Blanc* kreuzungsfrei abzweigende Schleifenstrecke bis *Pré-Saint-Gervais* (Abbildung 28). Zu dieser Zeit gab es zwei Züge, der eine führte durchgehend von *Opéra* bis *Porte de la Vilette* und der zweite von *Opéra* bis *Pré-Saint-Gervais*. Dies war die erste von drei Linienverzweigungen, die auf dem gesamten Netz der Pariser Metro zu finden sind. [20][23]

Die in Abbildung 29 dargestellte Weiterführung von *Pré-Saint-Gervais* nach *Porte Lilas* entstand 1921. Der Zug hätte südlich bei *Place des Fêtes* die Schleife verlassen bis *Porte des Lilas* und hätte sich nördlich bei *Pré-Saint-Gervais* wieder eingegliedert. Da auch die Linie 3 zu dieser Zeit bis *Porte des Lilas* verlängert wurde, ging die Strecke in dieser Art nie in Betrieb. Man führte stattdessen, in den Jahren bis zum Ausbruch des zweiten Weltkrieges, einen Pendelverkehr namens „*La Navette*“ auf der Nordstrecke ein. Der Linienbetrieb wurde noch einmal zwischen 1952 und 1956, zum Zwecke von Testfahrten mit gummibereiften Experimentierfahrzeugen, wieder aufgenommen. [20][23]

Später baute man eine kleine Betriebswerkstatt für die 1967 separierte Linie 7bis, weshalb eine durchgängige Benützung des nördlichen Gleises heute nicht mehr möglich ist. (Genauerer zur Linie 7bis wird in Abschnitt 5.3.1 erläutert.)

Das südliche Gleis mit seiner nicht fertiggestellten Station *Haxo* wurde nie in Betrieb genommen. Auch die Anbindung der Station der Linie 7 bei *Porte des Lilas* an die Linie 3bis wurde nie genutzt. Bei einer oftmals diskutierten Verknüpfung der Linie 3bis und 7bis zu einer gemeinsamen Linie 15, könnten die noch bestehenden Konstruktionen zum Einsatz kommen. [20][23]

Von *Opéra* aus wurde die Linie 7 im Jahr 1916 bis *Palais Royal* verlängert. In einem zweiten Schritt erfolgte 1926 der Ausbau bis *Pont Marie* und, auf Grund von einigen technischen Schwierigkeiten, erst vier Jahre später bis *Sully-Morland*. Für eine weitere Verlängerung wurde 1930/31, getrennt von der restlichen Strecke, auf der Südseite der Seine der Abschnitt zwischen *Place Monge* und *Porte de Choisy* errichtet. Anfänglich wurde die Strecke über ein Verbindungsstück über die Linie 10 bedient, bis nur kurz darauf 1931 der Tunnel unter der Seine vollendet werden konnte und somit der Anschluss an die Linie 7 erfolgte. Im gleichen Jahr erfolgte ebenfalls die Verlängerung bis *Porte d'Ivry*, 1946 dann bis *Mairie d'Ivry*. [20][27]

Erst in den Jahren zwischen 1979 und 1987 wurde die Linienführung weiter ergänzt. So erfolgte Richtung Norden eine Verlängerung bis *La Courneuve* und Richtung Süden wurde eine weitere kreuzungsfreie Abzweigung geschaffen. Diese führte von *Maison Blanche* ausgehend bis nach *Villejuif*. Die sich trennenden Routen bis *Marie d'Ivry* und *Villejuif* werden abwechselnd von der Linie 7 befahren. [20]

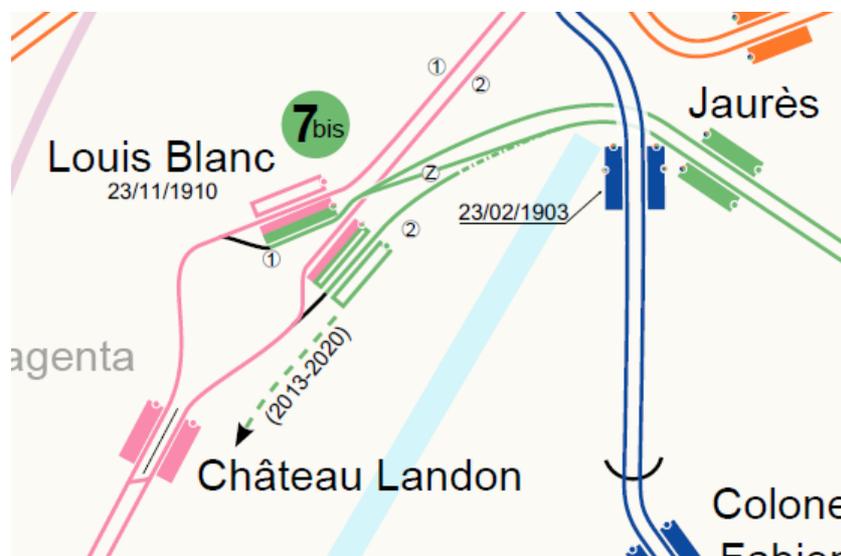


Abbildung 28: Linie 7 – Abzweigung nach *Pré-Saint-Gervais* (jetzige Linie 7bis) [27]

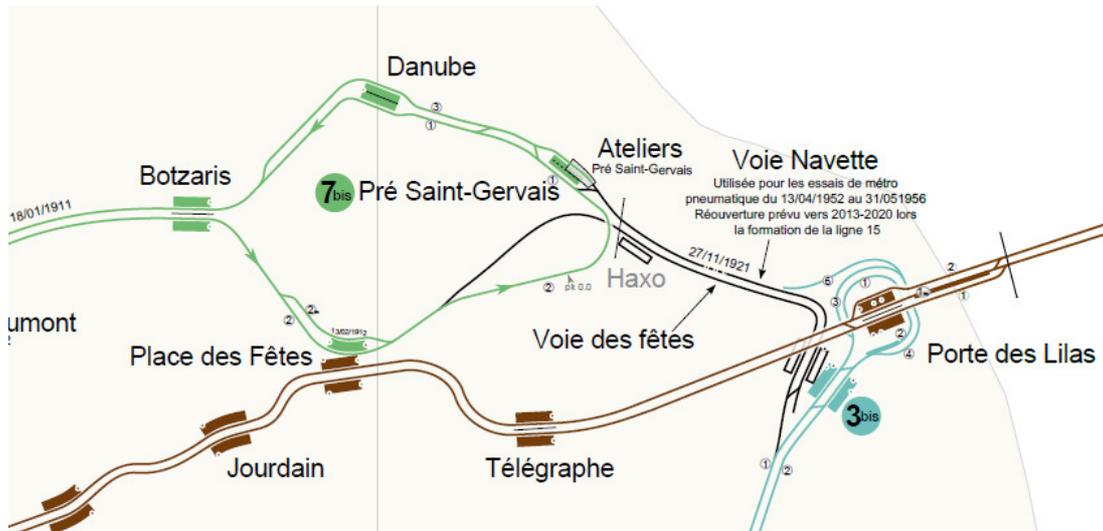
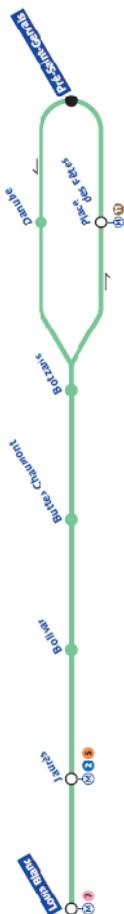


Abbildung 29: Linie 7bis (frühere Linie 7) – Weiterführung bis *Porte des Lilas* [27]

5.3.1 Linie 7bis



Die Schleife der Linie 7 über *Pré-Saint-Gervais* wurde im Jahr 1967 zu einer eigenständigen Strecke. Die Linie 7bis wurde eingeführt, um die bisherige Taktfrequenz erhöhen zu können. Zuvor fuhren die Züge der Linie 7 abwechselnd nach *Porte de la Villette* und *Pré-Saint-Gervais*. Anfänglich wurde die Station *Louis Blanc* per Sägefahrt angefahren. So wurde die eine Bahnsteigkante angefahren um die Passagiere von der Linie 7bis auf die Linie 7 umsteigen zu lassen, anschließend setzte der Zug zurück und fuhr die andere Bahnsteigkante an um ein rasches Umsteigen für die von der Linie 7 kommenden Passagiere zu ermöglichen. Die kurzen Umsteigerelationen für die Passagiere wurden zu Gunsten eines einfacheren Betriebes aufgegeben und so fährt die Linie 7bis bei *Louis Blanc* nur noch eine Stationsebene an. [20]

Abbildung 30: Linie 7bis [20]

5.3.2 Linie 8



Die heute 22,1 km lange Linie 8 war bereits in den ersten Plänen der Metro vermerkt und sollte zwischen *Opéra* und *Auteuil* verlaufen, mit einer abzweigenden Linie 8bis nach *Balard*. Noch bevor die Bauarbeiten zur Linie 8 begannen verfolgte man einen ganz anderen Plan. Zur Erweiterung des bereits bestehenden Netzes sollte die Linie 8, teilweise gemeinsam mit der Linie 9, einen inneren Metro-Ring ergeben. Teile dieser Planung sind in der heutigen Linienführung noch ersichtlich, ein durchgehender Ring wurde jedoch nie verwirklicht. Im Jahr 1913 eröffnete schrittweise der erste Teil der Linie 8 von *Opéra* bis *La Motte-Picquet-Grenelle* und weiter über einen heutigen Teil der Linie 10 nach *Charles Michel* und anschließend nach *Porte d'Auteuil*. Die Strecke beinhaltet zwei Seine-Tunnel, von denen der noch heute auf der Linie 8 befindliche mittels Schildvortrieb hergestellt wurde, wohingegen der auf der heutigen Linie 10 bestehende in Caisson-Bauweise gebaut wurde. In weiterer Folge verlängerte man im Zeitraum zwischen 1928 und 1931 die Linie Richtung Norden, entlang des ursprünglich geplanten Innenringes, nach *Porte de Charenton*. Bemerkenswert in diesem Abschnitt ist der zweistöckig gestaltete Tunnel zwischen *Richelieu-Droutot* und *République*. Dieser viergleisige Tunnel dient den Linien 8 und 9 und ermöglicht, durch die doppelstöckige Bauweise eine vollkommene Trennung der beiden Linien. Erst in der Station *République* vereinen sich die Linien zu einer gemeinsamen Station. Die detaillierte Konstruktion ist in Abbildung 32 dargestellt. [20][23][27]

1937 wurde der westliche Teil der Linie 8 an die Linie 10 übergeben. Die Linie 8 hingegen wurde bis *Balard* verlängert. Ursprünglich war dieser Abschnitt als Abzweigung geplant. In diesem Bereich befinden sich zwei erwähnenswerte Stationen. So weist *Commerce* zwei zueinander versetzte Bahnsteigkanten auf. Diese sind mit einem kurzen Tunnelstück verbunden und resultieren aus einer geringen

Abbildung 31:
Linie 8 [20]

Die Pariser Metro

Straßenraumbreite. Die Station *La Motte-Picquet-Grenelle* wurde als Verzweigungsbahnhof ausgeführt. Auch heute entspricht er noch dieser Form, wurde aber um einen vierten Bahnsteig ergänzt. Somit wird ein Umsteigen zwischen der Linie 8 und Linie 10 in gleiche Fahrtrichtung erleichtert. [20][27]

Im Osten wurde die Strecke im Jahre 1942 bis *Charenton-Écoles* und in den Jahren 1970 bis 1974 schrittweise bis *Créteil-Préfecture* erweitert. Der große Abstand der Stationen (ca. 1 km) verleiht diesem Teil der Metro einen S-Bahn-Charakter. Die Strecke an sich ist teilweise dreigleisig ausgeführt. Diese Konstruktion sollte dem Einsatz von so genannten „Fast-Lanes“ (ähnlich der U-Bahn in New York) dienen, kamen jedoch nie zum Einsatz. Heute dient das dritte Gleis lediglich dem Abstellen von Fahrzeugen. [20][23]

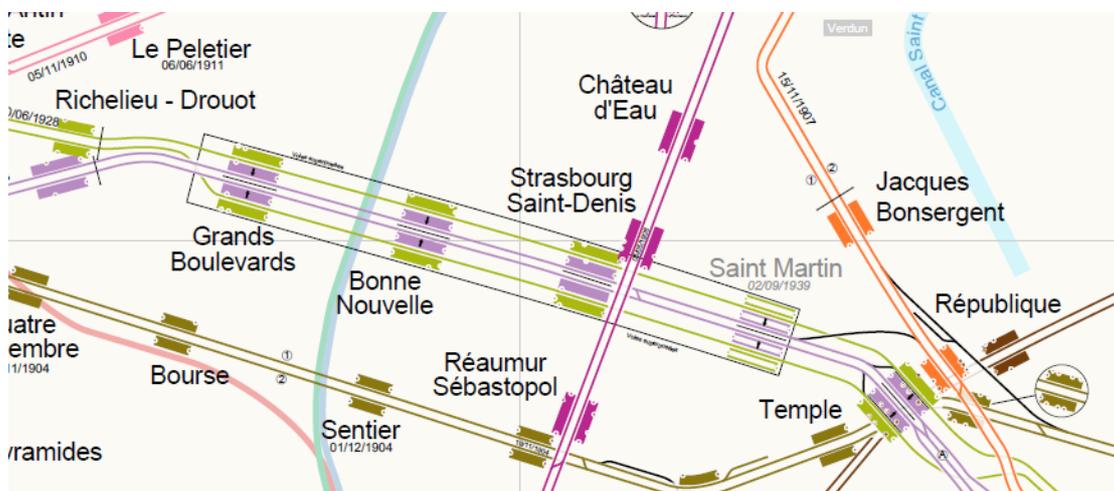


Abbildung 32: Linie 8 – viergleisiger Tunnel und die Station *République* [27]

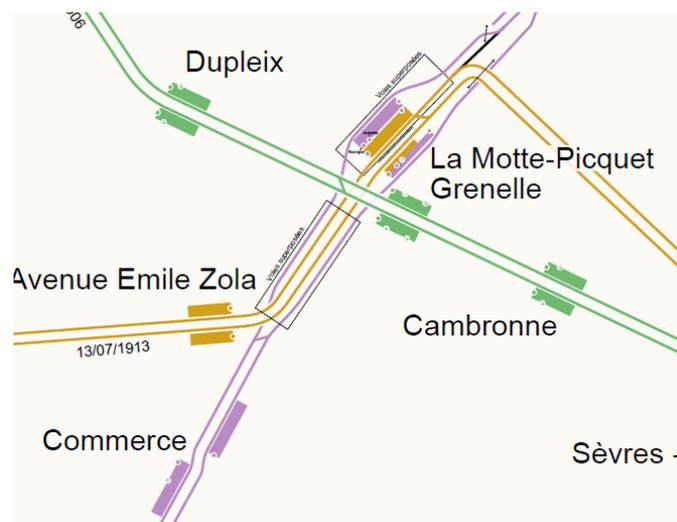


Abbildung 33: Linie 8 – *La Motte-Picquet-Grenelle* und *Commerce* [27]

5.3.3 Linie 9



Abbildung 34:
Linie 9 [20]

Die Linie 9 war ursprünglich als Abzweig der Linie 2 *Sud*, heutige Linie 6, geplant. Später beschloss man, sie weiter in die Stadt hinein zu verlängern und sie als eine Abzweigung des inneren Rings zu nutzen. Da dies jedoch den inneren Ring überlastet hätte, entschied man sich die Linie als eigenständige Linie zu eröffnen. Der Ausbruch des ersten Weltkrieges sowie seine finanziellen Folgen und Probleme bei anderen Metro-Erweiterungen führten zu einer stark verzögerten Eröffnung des ersten Abschnittes. Im Jahr 1922 konnte die Linie 9 zwischen *Exelmans* und *Trocadéro* in Betrieb genommen werden. Bereits im Jahr 1923 konnte die Linie jedoch bis *Saint-Augustin* und weiter bis *Chaussée d'Antin* verlängert werden. Richtung Süden erfolgte im gleichen Jahr die lange verzögerte Fertigstellung der Station *Porte de Saint-Cloud*. Das heutige Prinzenparkstation (*parc des princes*) sollte damals speziell bei Veranstaltungen über eine große Schleife durch die Metro angeschlossen werden. Diese verlief, wie in Abbildung 35 dargestellt, unter der Station *Jasmin* Richtung Westen über den Ring der damaligen Linie 8 und heutigen Linie 10. Über ein ausgedehntes Tunnelsystem und die Station *Porte Molitor* führte die Strecke bei *Porte de Saint-Cloud* wieder auf die Linie 9 zurück. Die Station *Porte Molitor* wurde jedoch nie mit Ausgängen an die Oberfläche versehen und auch die Verbindungsschleife wurde nie genutzt, da man beschloss die Linie 8 und 9 getrennt zu belassen. Heute werden die Tunnel zum Abstellen von Fahrzeugen der Linie 10 verwendet. Eine Verbindungsstrecke der Linie 9 zur Linie 2 von *Saint-Augustin* bis *Ternes* wurde nie verwirklicht. Zeuge dessen ist jedoch auch heute noch die extra breit angelegten Bahnsteige der einst dreigleisigen Station *Saint-Augustin*. [20][23]

Im Jahr 1928 wurde die Linie 9 zusammen mit der Linie 8 bis *Richelieu-Drouot*, auf unterschiedlichen Linien, verlängert. Ab dieser Station wurden beide Linien, auf Grund von starken Anrainerprotesten, zusammen in einem Tunnel bis *République* geführt (siehe Abbildung 32). 1933 verlängerte

Die Pariser Metro

man die Linie 9 weiter Richtung Osten bis *Porte de Montreuil* und 1937 bis zur aktuellen Endstation *Mairie de Montmartre*. Im Südwesten erreichte die Linie 1937 *Pont de Sèvres* und somit die erste Station außerhalb der Grenzen von Paris. [23]



Abbildung 35: Linie 9 – *Porte de Saint-Cloud* inkl. Anbindung an die Linie 10 [27]

5.3.4 Linie 10



Abbildung 36:
Linie 10 [20]

Die Linie 10 ist abgesehen von den Zubringern 3bis und 7bis die am wenigsten genutzte Strecke. Ihre Entstehungsgeschichte ist überaus kompliziert und belegt die unterschiedlichen Planungsschritte des Metronetzes. [20]

1923 eröffnete die Linie 10 zum ersten Mal von *Invalides* über *Duroc* nach *Croix Rouge*. *Invalides* wurde als Schleife ausgeführt und stellte eine Verbindung zur Linie 8 dar. Diese diente der Verknüpfung der beiden Linien zur Herstellung des inneren Metrorings. Der Abschnitt, der von dort aus nach *Duroc* führt, ist heute Teil der Linie 13. In *Duroc* bog die Strecke, auf einem noch heute der Linie 10 zugehörigen Streckenabschnitt, Richtung Osten ab und endete in der heute aufgelassenen Station *Croix Rouge*. In den darauffolgenden Jahren kamen einzelne Stationen hinzu, bis 1930 *Maubert Mutualité* erreicht war. Die Station *Cluny* (siehe Abbildung 38) verfügte dabei über ein bahnsteigloses Mittelgleis, das über einen Tunnel mit der Linie 4 verbunden war. Bis zum Jahr 1931 führte von *Maubert Mutualité* eine zweigleisige Verbindung zur heutigen Linie 7 über *Place d'Italie* nach *Porte de Choisy*. Als durch den Seine-Tunnel der Anschluss dieser Strecke an die Linie 7 erfolgte, ging der Abschnitt auf die Linie 7 über und die Linie 10 wurde nach *Jussieu* (siehe Abbildung 38) weitergeleitet. Somit verlief die Linie 10 auf dem für sie vorgesehenen inneren Metroring und entsprach der geplanten Strecke. Zur Vollendung des Ringes kam es jedoch nie, da der Zusammenschluss des Ringes von *Jussieu* aus nie gebaut wurde. Die Linie 10 hatte zu dieser Zeit mit sehr niedrigen Fahrgastzahlen zu kämpfen. Dies führte bereits 1930 zu einer vollkommenen Umgestaltung. [20]

Bei *Duroc* gestaltete man eine neue Station und führte die Linie 10 Richtung Westen bis *La Motte-Picquet-Grenelle*. Dort wurde an die bestehende Infrastruktur der bisherigen Linie 8 angeschlossen und die Strecke nach *Porte d'Auteuil* an die Linie 10 übergeben. Die Linie 8 wurde, wie in Abschnitt 5.3.2 erläutert, nach *Balard* umgelegt. [20]

Die seit 1913 genutzte eingleisige Schleife bei *Porte d'Auteuil* (siehe Abbildung 37) wurde gegen den Uhrzeigersinn befahren. Die Schleife öffnet sich in einer recht eigenwilligen Konstruktion bei der Station *Mirabeau*. So wird diese Station nur von stadteinwärts fahrenden Zügen angefahren. Stadtauswärts befindet sich keine Station, sondern die Gleise führen über eine Rampe in die Schleife. Diese kuriose Bauweise entstand auf Grund der nahe gelegenen Kirche „*Église de Auteuil*“, deren Fundamente nicht beeinträchtigt werden sollten. Seit 1922 quert die Linie 9 diese Schleife und verkomplizierte somit die Umsteigerelationen. [20]

Bei der Umstrukturierung 1937 entstand aus dem übrigen Abschnitt der Linie 10 zwischen *Duroc* und *Invalides* eine eigenständige Linie mit der Nummer 14. Zudem wurde diese über *Durac* hinaus bis *Porte de Vanves* nach Süden verlängert. Heute entspricht diese Strecke der Linie 13. [20]

Im Osten erreichte die Linie 10 im Jahre 1939 ihre jetzige Endstation bei *Gare d'Austerlitz*. Erst 1980 folgte die westliche Verlängerung bis *Boulogne Pont de Saint-Cloud*. Dies verkomplizierte den Betrieb der Schleife zusehends. Nach einer anfänglichen Trennung in Züge, die bis zur Endstation fahren und Züge, die die Schleife wie gehabt durchfahren, ist man heute zu der Lösung gekommen, dass alle Züge bis zur Endstation durch fahren. [20]

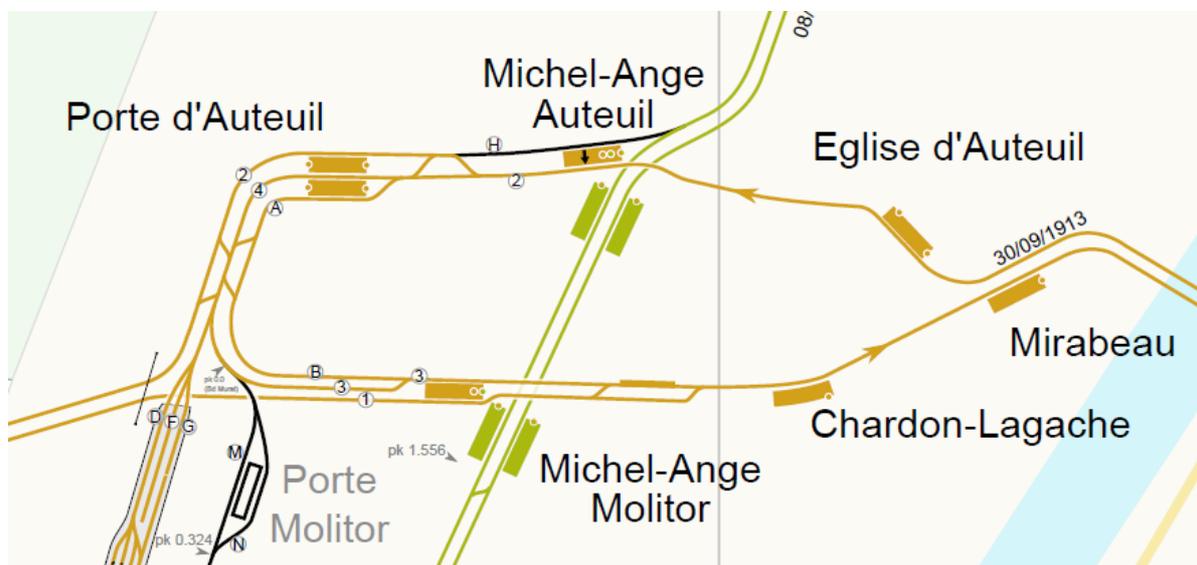
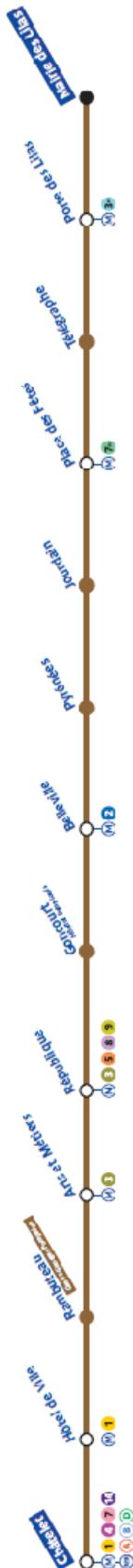


Abbildung 37: Linie 10 – Schleife von *Porte d'Auteuil* [27]



Abbildung 38: Linie 10 – *Cluny* und die Abzweigung nach *Jussieu* [27]

5.3.5 Linie 11



Die 6,3 km lange Linie 11 ist in ihrer Entwicklung recht unkompliziert im Vergleich zu den meisten anderen Metrolinien. Geplant wurde sie 1922 und 1935 wurde ihr erster Abschnitt von *Châtelet* bis *Porte des Lilas* eröffnet. 1937 wurde sie bis *Mairie des Lilas* verlängert. Die kurvenreiche Strecke verläuft von Südwesten nach Nordosten quer durch die Stadtmitte. Auf Grund ihres späten Baus musste sie meist unter den bereits bestehenden Linien durch geführt werden. Diese Linienführung und die geringe Frequentierung machte sie für spätere Testbetriebe ideal. So wurden 1956 auf der Linie 11 erstmals mit Gummi bereifte Fahrzeuge eingesetzt. 1999 wurden die Züge wieder auf Stahlräder umgestellt. Zwischen 1967 und 1969 wurden auch die ersten automatischen Züge auf dieser Strecke zu Testzwecken eingesetzt. [23]

Abbildung 39:
Linie 11 [20]

Die Pariser Metro

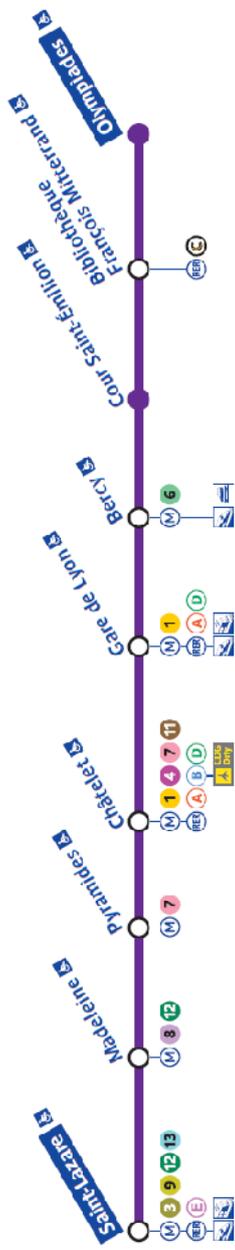
1973 die Verlängerung der Linie 13 Richtung Süden bis *Miromesnil*, 1975 bis *Champs-Élysées – Clemenceau* und 1976 der Lückenschluss bis *Invalides*. Seit 1976 werden die beiden mittels eines Caisson隧NELS verbundenen Strecken als Linie 13 bezeichnet. Diese ist technisch gesehen zwar eine Metro, erfüllt allerdings eigentlich die Verbindungsfunktion für das RER-Netz.

In den darauf folgenden Jahren wurden noch einige Verlängerungen eröffnet. Im Jahr 1976 erfolgte die Erweiterung Richtung Norden bis *Saint-Denis* und Richtung Süden bis *Châtillon – Montrouge*. 1980 erreichte die Linie 13 im Nordwesten *Gabriel Péri* und letztlich 2008 die aktuelle Endstation *Asnières – Gennevilliers – Les Courtilles*. Weitere Neubauten sind bis 2020 geplant. 1998 wurde die Strecke von *Saint-Denis* aus um die Station *Saint-Denis Université* ergänzt. [20][27]

Die Linie 13 ist heute deutlich überlastet, was von der großen Bedeutung dieser Strecke zeugt. [20]



Abbildung 42: Linie 13 – *La Fourche* [27]

5.3.8 Linie 14 – „Météor“ Abbildung 43:
Linie 14 [20]

Der Linie 14 kommt eine ganz besondere Bedeutung zu. Ihr Betriebssystem und ihre Handhabung zählen weltweit zu den ersten dieser Art. Mit der Eröffnung im Jahr 1998 ging seit dem Jahr 1935 die erste vollkommen neue Linie in Betrieb. Dieser große zeitliche Abstand zu dem Bau der anderen Metrolinien wird sowohl in der Architektur, als auch in der technischen Ausstattung deutlich. Die Expresslinie, die den östlichen mit dem westlichen Teil von Paris verbindet, wird auf Grund ihrer Funktion, als „*Métro Est-Ouest Rapide*“ kurz „*Météor*“ bezeichnet. Um diese Expressfunktion zu ermöglichen wurde unter anderem der Stationsabstand im Vergleich zu den anderen Linien deutlich erhöht. Mit einem durchschnittlichen Stationsabstand von etwas mehr als einem Kilometer liegt dieser Wert weit über den in Paris üblichen 500 bis 700 m. Dies spiegelt sich vor allem in der durchschnittlichen Geschwindigkeit wieder, die im Gegensatz zu den restlichen Linien statt bei 25 km/h bei 40 km/h liegt. Daraus resultiert eine um 33% gesteigerte Leistungsfähigkeit. Wird die Leistung der Linie 14 voll ausgeschöpft, so wird sie im Stande sein 40.000 Passagiere pro Stunde zu befördern. [20][23]

Auslöser für den Bau der Linie 14 war das Erreichen der maximalen Leistungsfähigkeit der Linie A der RER. Auch das neue automatische Zugsteuerungs- und Sicherungssystem SACEM konnte das Problem nur verringern, jedoch nicht lösen. Im Jahre 1988 wurden zum ersten Mal die Pläne für die Linie 14 vorgestellt. Trotz anfänglicher Befürchtungen eines Aufschubs des Projektes, es sollte dem Bau der Linie E der RER der Vorzug gegeben werden, beschloss Premierminister Michel Rocard am 7. Februar 1989 den Bau der *Météor*. [23]

Der optimistische Plan bis 1996 eine Strecke zwischen *Maison-Blanche* und *Saint-Lazare* um 4,4 Milliarden Franks zu errichten, musste bald revidiert werden. Das Budget wurde auf 5,75 angehoben und die Strecke auf den Bereich zwischen *Bibliothèque François Mitterrand* verkürzt. 1992 wurde mit dem Bau der Linie 14 begonnen und schon bald wurde deutlich, dass eine Fertigstellung bis 1996 unmöglich sein würde. Ende 1996

waren zwar die meisten Bautätigkeiten abgeschlossen, doch auch zu Beginn der Fußball-Weltmeisterschaft im Sommer 1998 konnte die Linie noch nicht zur Abwicklung des Verkehrs beitragen. Nach dem erfolgreichen Abschluss des Testbetriebes wurde die Linie am 15. Oktober 1998 von Präsident *Jacques Chirac* feierlich eröffnet. [23]

Der 7,1 km lange erste Abschnitt der Linie 14 kostete schlussendlich 6,1 Milliarden Franks. 30% davon wurden von der Regierung übernommen, 18,3% finanzierte die RATP über ein niedrig verzinstes Darlehen und die Differenz für den Abschnitt zwischen *Gare de Lyon* und *Bibliothèque François Mitterrand* steuerte die Stadt und Region Paris bei. [23]

2003 erfolgte eine Erweiterung Richtung Norden bis nach *Saint-Lazar* und 2007 Richtung Süden bis *Olympiades*. Darüber hinaus stehen in den kommenden Jahren weitere Verlängerungen der Strecke an. [27]

5.3.9 Einbettung des Metro-Netzes in das ÖV-Netz von Paris (Ergänzung durch Straßenbahn, Bus, und RER)

Das Herz des öffentlichen Verkehrs in Paris stellt die Metro dar. Ergänzt wird sie durch die RER-Linien (*Réseau express régional*) sowie das Straßenbahnnetz und den Bus. Das RER stellt dabei das regionale Schienenverkehrssystem dar und dient im Gegensatz zur U-Bahn nicht rein der Abwicklung des innerstädtischen Verkehrs, sondern verknüpft vor allem auch die Vorstädte von Paris miteinander. Das Netz besteht aus den Linien A, B, C, D und E und verkehrt in der Innenstadt von Paris wie eine Metro in 25 m Tiefe. Die Linien A und B werden zusammen von der RATP und der SNCF betrieben, die übrigen drei Linien unterliegen ausschließlich der SNCF. Betrieblich unterscheidet sich die RER von der Metro, da sie nach einem fixen Fahrplan verkehrt. Im innerstädtischen Bereich verfügt sie über ein Sicherungssystem welches dem einer U-Bahn sehr ähnlich ist (*Sacem*). [12] Der Linienplan der RER ist in Abbildung 3 zu sehen.

Die Straßenbahn spielt in Paris eine ganz besondere Rolle. In der Nachkriegszeit wurde sie auf Grund der allgemeinen Euphorie für das Automobil rückgebaut. Man war damals der Ansicht, dass das Auto das zukunftsweisende Verkehrsmittel sei und man auf die Straßenbahn verzichten könnte. Der zunehmende Verkehr und das steigende Verantwortungsgefühl für die Umwelt veranlasste die Pariser im Jahr 1992 die erste Linie der Straßenbahn neu zu eröffnen. Das sich gerade im Aufbau befindende Netz soll die Metro und RER-Linien durch Ringlinien ergänzen und somit den Verkehr zwischen den Vorstädten bereits außerhalb der Innenstadt abwickeln. Aktuell sind vier Straßenbahnlinien im Einsatz. Diese verkehren hauptsächlich auf eigenen, begrünten

Trassen und finden großen Zuspruch. Ausweitungen des Netzes bis auf sieben Linien sind bereits im Gange. Bis 2015 sollen die Linie T5, T6 und T7 verwirklicht sein. [28][29]

Also letzte Komponente des öffentlichen Verkehrs dienen die insgesamt 351 Buslinien der RATP, die in Paris und den Vorstädten verkehren. Darunter befinden sich auch 31 Nachtbuslinien. Das Busnetz erschließt vorrangig die 200 Vorstädte und Dörfer die zum Großraum Paris zählen. [21]

5.3.10 Le Grand Paris

„*Le Grand Paris*“ ist ein Entwicklungskonzept für den Großraum Paris, das von Nicolas Sarkozy ins Leben gerufen wurde. Neben einem städteplanerischen Konzept beinhaltet das Vorhaben auch die verkehrstechnische Zielsetzung für Paris. Mittels großer Metroringe soll vor allem der Verkehr zwischen den Vororten abgehandelt werden. Die Entscheidung dafür basiert auf einer Studie, die zeigte, dass 70% aller täglichen Wege in der *Ile-de-France* zwischen den Vororten passieren. 32,4 Milliarden Euro (exklusive der Kosten für die Fahrzeuge) sollen investiert werden, um bis 2017 die in Abbildung 44 dargestellten U-Bahnlinien zu verwirklichen und somit eine tägliche Reduktion von 150.000 Fahrzeugen auf den Straßen zu erreichen. Das neue U-Bahnnetz soll, wie schon die „*Météor*“, fahrerlos und vollkommen automatisch verkehren. [21]

Die Pariser Metro

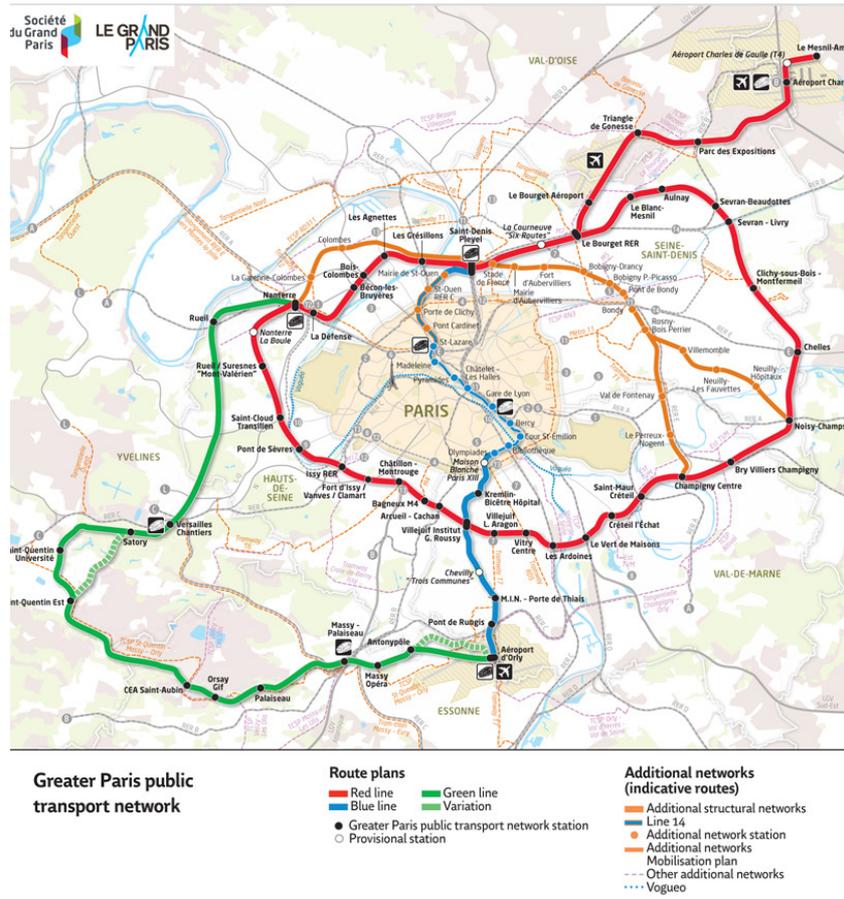


Abbildung 44: Le Grand Paris [21]

6 Bauweisen und Trassierung

6.1 Tunnel

Die Tatsache, dass viele Metros in Tunnelsystemen verkehren hat großen Anteil an ihrer weitreichenden Verbreitung. Der Tunnel verfügt im Vergleich zu anderen Systemen über den höchsten Grad an Unabhängigkeit gegenüber externen Einflüssen. Durch ihn ist eine U-Bahn von anderen Verkehrsteilnehmern abgeschlossen und im Vergleich zu Hochbahnen zusätzlich gegen Wettereinflüsse und große Temperaturschwankungen geschützt. Diese Gegebenheiten implizieren einen hohen Grad an Funktionsfähigkeit und Sicherheit des Betriebes. Ebenso werden die Instandhaltungstätigkeiten positiv beeinflusst. Die Baukosten sind hingegen sehr hoch und führen zu einer starken Beeinträchtigung der Umgebung. Nach Fertigstellung des Projektes geht der Einfluss der Umgebung quasi gegen Null. Alleinig Erschütterungen umliegender Gebäude sind vereinzelt ein Thema. [7]

Ganz nach dem Ausspruch von *Hewett* und *Johanneson* „Jeder Tunnel ist anders“ sind die Methoden einen Tunnel zu bauen überaus vielseitig und stark von den geologischen Voraussetzungen abhängig. Nicht selten werden die unterschiedlichen Bauweisen innerhalb eines Bauvorhabens gemischt oder für die bestehenden Verhältnisse adaptiert. In diesem Unterkapitel soll ein kurzer Überblick der bestehenden Verfahren geschaffen werden.

Man unterscheidet zwischen zwei grundlegenden Tunnelarten, dem oberflächennahen Tunnel und dem tief liegenden Tunnel. Beide unterscheiden sich maßgebend in ihren benötigten Bauverfahren sowie der Trassierungsmöglichkeit. Der oberflächennahe Tunnel bedingt eine offene Bauweise während der tiefliegende Tunnel nach einem geschlossenen Bauverfahren verlangt. [7]

6.1.1 Offene Bauweise

Tunnel, die in offener Bauweise hergestellt werden, liegen bis zu 20 m unter der Oberfläche. Die Trassierung ist durch die Herstellungsart stark an Straßenzüge oder nicht bebaute Flächen gebunden. Die großen Vorzüge dieser Bauweise ergeben sich gerade durch die geringe Tiefenlage des Tunnels. Sie steigert die Akzeptanz der Passagiere durch den geringen Höhenunterschied, der zum Erreichen der Stationen überbrückt werden muss. Die Stationen können somit auch anderweitig genutzt werden, wie für Geschäfte, Fußgängerunterführungen von Kreuzungen oder Zugänge zu Gebäuden. Die

Baukosten des Verfahrens werden nur in einem sehr geringen Maß durch die Dimensionen des Tunnels beeinflusst. Die Ausmaße des Tunnels und der Stationen sind somit relativ flexibel zu verwirklichen. Die Nachteile dieser Methode bei der starken Beeinflussung der Umgebung durch die Baugrube liegen klar auf der Hand. Auch für Flussquerungen, der Untertunnelung von Gebäuden oder bei stark hügeligem Gelände müssen spezielle Lösungen gefunden werden. [7]

6.1.1.1 Cut-and-cover (konventionelle Methode)

Die offene Bauweise hatte ihre Wurzeln in London. Bei dieser ursprünglich, als „*cut-and-cover*“ bezeichneten Methode wird, nach entsprechender Vorbereitung des Baugrundes, eine Baugrube ausgehoben. Die Baugrubensicherung kann durch mehrere Verfahren erfolgen wie z.B. Bohrpfähle oder Spundwände. Diese dienen der Aufnahme des Erddrucks und ermöglichen das Arbeiten in großer Tiefe. In der gewünschten Lage wird das Tunnelprofil aus Beton hergestellt und anschließend wieder mit Aushubmaterial bedeckt. [7] Das grundlegende Schema dieses Verfahrens ist in Abbildung 45 veranschaulicht.

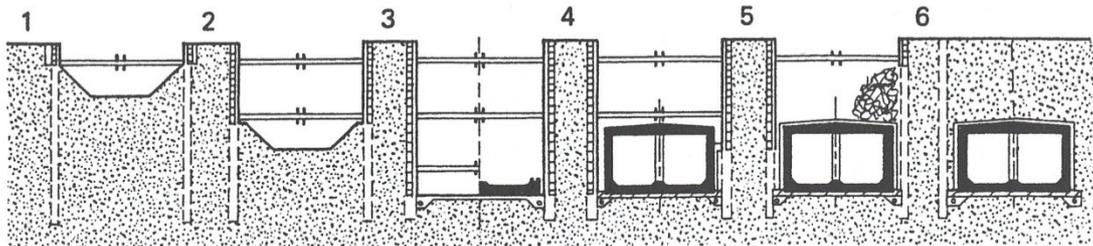


Abbildung 45: *Cut-and-cover* [7]

6.1.1.2 Deckelbauweise

Der Vorteil der Deckelbauweise gegenüber der konventionellen offenen Bauweise liegt in der deutlich kürzeren offenen Baugrube. Somit kann die Fläche schnell wieder anderweitig genutzt werden, was vor allem in städtischen Gebieten von großer Bedeutung ist. Bei diesem Verfahren wird nach dem Einbringen von Bohrpfählen oder einer Schlitzwand, die als Tunnelwände dienen, die Decke des Tunnelprofils in der entsprechenden Höhenlage hergestellt. Die Baugrube kann bereits nach diesem Schritt wieder verfüllt werden. Anschließend wird unter der Tunneldecke der Aushub vollendet und die Sohle des Tunnels hergestellt (siehe Abbildung 46). Der Nachteil dieser Methode sind die deutlich höheren Baukosten, die durch das komplexe Verfahren entstehen. [7][30]

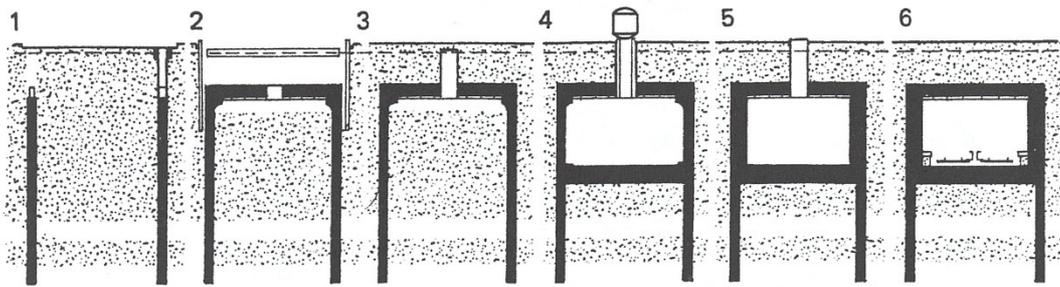


Abbildung 46: Deckelbauweise [7]

6.1.2 Einschwimm- und Absenkermethode

Dieses Verfahren, das auch als Caissonverfahren bezeichnet wird, dient vorrangig der Herstellung von Tunneln in offenen Gewässern oder zur Unterquerung von Flüssen. Dabei werden Abschnitte des Tunnelprofils an der Oberfläche hergestellt und anschließend an der entsprechenden Stelle abgesenkt. Spezielle Anwendungen dieser Technik findet man z.B. beim Bau der Metro in Amsterdam. Auf Grund des hohen Sandanteiles des Bodens war eine entsprechende Stabilität nicht gegeben. Somit entschied man sich den Tunnel mittels eines angepassten Caissonverfahrens, wie in Abbildung 47, herzustellen. Das Tunnelprofil wurde an der entsprechenden Stelle positioniert und durch ein schrittweises Ausheben des Sandes auf die gewünschte Tiefe abgesenkt. [7][30]

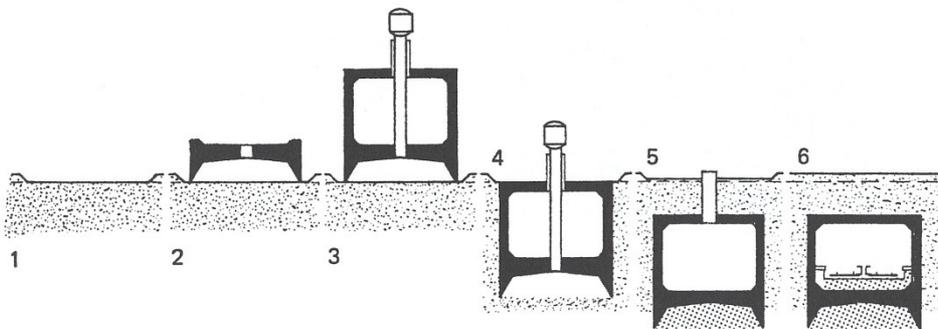


Abbildung 47: Caissonverfahren der Metro in Amsterdam [7]

6.1.3 Geschlossene Bauweise

Die geschlossene Bauweise ermöglicht eine Trassierung unabhängig der bestehenden Straßenzüge oder offenen Flächen. Der Tunnel liegt bis zu 60 m tief und besitzt somit keinen Konnex zu den darüber liegenden Bauwerken. Gerade für eine U-Bahn kann der tief liegende Tunnel jedoch einen Nachteil mit sich bringen, da er für kurze Wegstrecken nur selten genutzt wird. Dies resultiert aus den langen Wegen, die zur Überwindung des großen Höhenunterschiedes aufgewendet werden müssen. [7]

Die Verfahren der geschlossenen Bauweise sind vielfältig und ihr Einsatz ist von den geologischen Gegebenheiten sowie der Länge und den Dimensionen des Tunnels abhängig. Der Vortrieb einer geschlossenen Bauweise kann im Sprengvortrieb, Baggervortrieb, mittels Tunnelbohrmaschinen oder im Schildvortrieb erfolgen. Der Sprengvortrieb kann sowohl im harten wie auch weichen Felsgestein angewendet werden. Wirtschaftlich sinnvoll einsetzbar ist dieser Verfahren jedoch bei hartem Gestein, kurzen Tunneln und großen Tunnelquerschnitten. Der Baggervortrieb spielt eine eher untergeordnete Rolle. Zur Unterstützung der anderen Vortriebsarten sowie zur Nachprofilierung kommen Bagger hingegen durchwegs zum Einsatz. Tunnelbohrmaschinen und der Schildvortrieb sind, infolge der hohen Kosten für den Transport der Maschine selbst, erst ab einer Tunnelänge von 3 bis 4 km wirtschaftlich einsetzbar. Für kürzere Abschnitte und Tunnel mit speziellen Dimensionen kommen diese Verfahren grundsätzlich nicht zur Anwendung. Dabei dienen Teilschnittmaschinen dem Einsatz im Festgestein, wohingegen Vollschnittmaschinen im Lockergestein gute Dienste erweisen. [31][32]

6.1.4 Der Tunnelbau der Pariser Metro

Die Strecken der Pariser Metro folgen vorrangig bestehenden Straßenzügen. Die ersten Tunnel wurden in geringer Tiefenlage mittels der Belgischen Bauweise oder auch „Unterfangungsbauweise“ [33] errichtet. Dabei wird ein Firststollen ausgehoben, der durch ein Gerüst gestützt wird. Anschließend kann ein Gewölbe in der Kalotte hergestellt werden. Unter der durch ein Gerüst gestützten Kappenwölbung kann der Aushub für das Wiederlager erfolgen. Die Tunnelwände und die Wiederlager können in Folge sukzessiv hergestellt werden. (siehe Abbildung 48) Das Standardprofil der Tunnel in Paris ist somit ein elliptisches Profil mit einer Höhe über Schienenoberkante von 4,52 m und einer Breite von 7,10 m. Erst seit dem Jahr 1970 wurde die Offene Bauweise bevorzugt. [12][20]

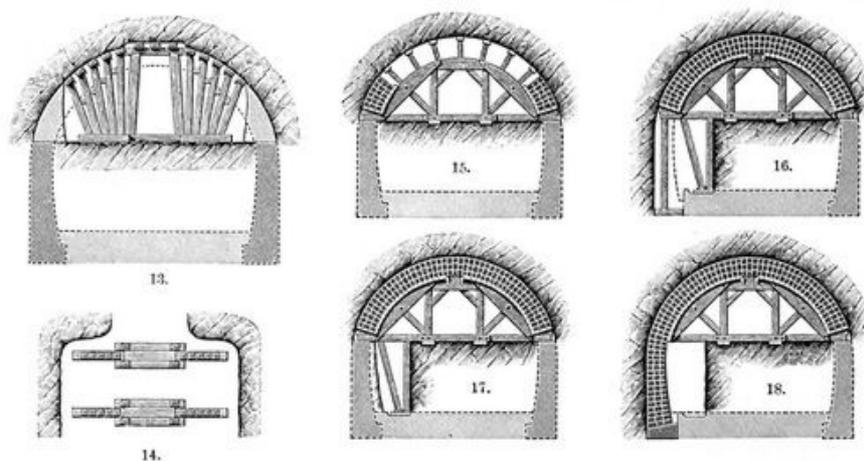


Abbildung 48: Die Belgische Tunnelbaumethode [34]

Die Unterquerung der Seine stellte die Bauer der Metro anfänglich vor Probleme. Aus diesem Grund wurden die meisten Kreuzungen der Seine durch Brücken verwirklicht. Später konnte dann die Caissonbauweise erfolgreich eingesetzt werden (siehe Abbildung 49). Heute stellen der Schildvortrieb, sowie die Bohrpfahlmethode und die Schlitzwandbauweise die üblichen Methoden dar. [12][20]

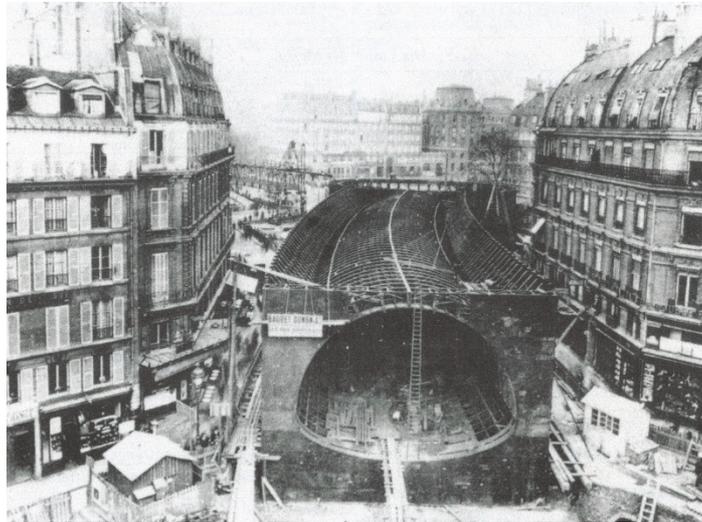
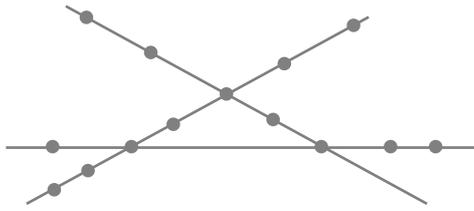


Abbildung 49: Anwendung der Caissonmethode bei der Unterquerung der Seine in *St.Michel* [12]

6.2 Netzformen

Die Netzformen einer Metro sind nur schwer zu kategorisieren. Die Entstehung eines Netzes ist meist an die bestehende Ausprägung einer Stadt sowie frühzeitig entstandene Festpunkte einer Verkehrsquelle gebunden. Um ein Maximum an Fahrgastzahlen zu bewirken, müssen die bereits vorgegebenen Verkehrsströme und die Verknüpfung mit anderen Verkehrsmitteln in die Gestaltung mit einfließen. Bei einer wirtschaftlichen Planung der Bauausführung trägt auch das Straßennetz maßgeblich zur Netzgestaltung bei. Durch eine entsprechende Ausrichtung an den Hauptachsen der Straße kann eine offene Bauweise gewählt werden, die generell die Baukosten senkt und eine vielfältige Gestaltung des Tunnelquerschnittes ermöglicht. Trotz aller Vielseitigkeit in der Ausführung von Metronetzen können diese auf ein paar einfache Strukturen (siehe Abbildung 50) reduziert werden. Rein rechnerisch ergeben sich auf Basis mathematischer Modelle aus den Systemen Vor- und Nachteile hinsichtlich der Reisezeiten oder Umsteigevorgängen. Hierbei kristallisiert sich ein Ring-Radialen-Netz als das günstigste bezüglich der vorher genannten Punkte heraus. [2]

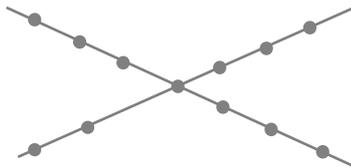
Bauweisen und Trassierung



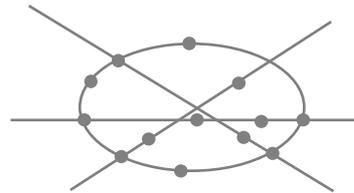
Sekantennetz
z.B.: Kujibischew, Leningrad, Minsk



X-förmiges Netz
z.B.: Lyon, Oslo, San Francisco



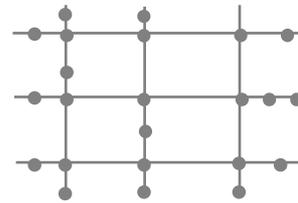
Kreuz
z.B.: Kyoto, Sapporo, Phjôngjang



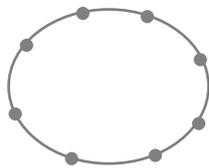
Ring-Radialen-Netz
z.B.: Moskau, Newcastle, Wien



Fischblasennetz
z.B.: Mailand, Nowosibirsk



Vermaschtes Netz
z.B.: Chicago, London, Paris



Ringnetz
z.B.: Glasgow



Durchmesserlinie
z.B.: Athen, Baltimore, Helsinki

Abbildung 50: Netzformen der Metro [2]

6.3 Oberbau

Einen der wichtigsten Bestandteile einer U-Bahn stellt die Fahrbahn dar. Zwischen den verschiedenen Metros herrschen bei der Ausgestaltung des Oberbaus jedoch große Unterschiede. Die als Standardform angesehene Variante stellt der Schotteroberbau dar. Auf Grund der vorwiegenden Tunnellage einer U-Bahn kommt auch oft eine feste Fahrbahn zum Einsatz. Trotz der damit verbundenen um durchschnittlich 20% höheren Investitionskosten können durch dieses System, gerade auf stark befahrenen Strecken, wie U-Bahnlinien, Instandhaltungskosten deutlich verringert werden. Neben dem Schotteroberbau und der festen Fahrbahnen findet man auch einige Bahnen besonderer Bauart, die auf Grund ihrer Unabhängigkeit zu anderen Verkehrssystemen ebenfalls als U-Bahn definiert werden (siehe Unterkapitel 1.1). Hierzu zählen unter anderem Monorail Bahnen, Schwebbahnen oder Magnetschwebbahnen. [1][5][35]

In Folge soll der Fokus jedoch primär auf Bahnen mit einem Schotteroberbau oder einer festen Fahrbahn gelegt werden. Bahnen besonderer Bauart werden nicht detailliert in Betracht gezogen.

Bei der Pariser Metro findet man als Standardbauweise den konventionellen Schotteroberbau. Als die Linie 1 eröffnet wurde, kamen 15 m lange Breitfußschienen mit einem Gewicht von 52 kg/m zum Einsatz. Beim Bau der Linie 2 wurden bereits 18 m lange Breitfußschienen verwendet. Diese Schienen des Typs V52 mit der Schienenhärte R260 [36] stellen den heutigen Standardoberbau dar. Die Schienen liegen auf Schwellen, die in einem Abstand von 750 mm verlegt sind. [23]

Bei einer Spurweite von 1435 mm weisen die Gleise der Pariser Metro ein Spurspiel von 11 – 13 mm auf. Die Einbauneigung der Schienen beträgt 1:20. In engen Bögen (Radius < 75 m) sind Spurerweiterungen von 10 – 15 mm zu finden. Die Neigung wird bei der Pariser Metro mit 50‰ für den Betrieb mit Stahlräderfahrzeugen und mit 61‰ für Gummireifenfahrzeuge beschränkt. Die maximale Überhöhung beträgt 160 mm. [12][36]

Die Nord-Sud-Gesellschaft entschied sich bei der Eröffnung ihrer Linien, auf Grund der kleinen Radien, für eine elastischere Konstruktion. Sie setzte eine Doppelkopfschiene ein, welche 165 mm hoch war. Die bei der Pariser Metro als Standard geltende Breitfußschiene weist im Vergleich dazu eine Höhe von 150 mm auf. Die Stöße werden mittels eines Stoßbleches hergestellt. Zwischenlagen aus Linoleum mit einem Kern aus Kork dienten der zusätzlichen Steigerung der Elastizität. Der Schwellenabstand betrug 1,40 m. Der Oberbau erwies sich jedoch nicht als besonders haltbar. Die Zwischenlagen zerbröckelten und führten zu einem starken Auftreten von Riffeln. Mit der Übernahme der Strecken durch die CMP 1930 wurde auch der Oberbau der Nord-Sud-Linien mit dem

Standardoberbau der Metro versehen. Heute ist der damalige Oberbau nur mehr am dritten Gleis der Station Porte de Versailles zu bewundern. [5][23]

Erst 1960 beschloss man die bisherigen Stoßbleche durch Schweißstöße zu ersetzen. Grund dafür war der damals noch große Zeitaufwand. Nach der erfolgreichen Einführung auf der Linie 1, wurden innerhalb kürzester Zeit beinahe alle Stöße angepasst. Eine Ausnahme bilden dabei Stöße in Bögen sowie Kreuzungen. Auf den in Hochlage befindlichen Abschnitten der Linie 2 und 6 kommen Dilatationsstöße zur Anwendung, um eine übermäßige Belastung der Brückenpfeiler zu vermeiden. [23]

Der Oberbau der neueren Erweiterungen wurde bereits als feste Fahrbahn mit Gummi-einlagen ausgeführt. Diese wirken sich positiv auf den Körperschall und die Stabilität der Gleislage aus. Auch die Herstellung der Fahrbahn stellt sich als wesentlich einfacher und günstiger dar. [23]

6.4 Trassierung

Bei der Trassierung wurde auf eine möglichst kreuzungsfreie Ausführung der Strecke sowie eine geringe Anzahl von Überleitstellen geachtet. Abgesehen von den Stationsbereichen ist dies, auf Grund des direkt verlaufenden Betriebes zwischen den Endstationen, grundlegend gelungen. Nur vereinzelt sind Kreuzungen auf der Strecke zu finden. Diese befinden sich auf der Linie 7 bei *Maison Blanche*, auf der Linie 10 bei *Auteuile* und auf der Linie 13 bei *La Fourche*. Alle drei Kreuzungen sind als Überwerfungsbauwerk ausgeführt um den Betrieb geringstmöglich zu beeinflussen. Die Anordnung der Weichen wurde so gestaltet, dass der Betrieb vorzugsweise auf dem Stammgleis abgehandelt wird. Darüber hinaus liegt die Priorität auf spitzbefahrenen Weichen. Stumpf befahrene Weichen kommen im Gegensatz dazu eher seltener vor. Das PCC (siehe Unterkapitel 9.6) verfügt über die Möglichkeit fast alle Weichen elektrisch zu stellen. Vereinzelt bestehen auf untergeordneten Abschnitten noch manuell bedienbare Weichen, die ebenfalls der Aufsicht des PCC unterliegen. [23]

6.5 Spurweite

Die Normalspur von 1435 mm ist die am weitesten verbreitete Spurweite und auch jene, die bei der Pariser Metro zu finden ist. Oft entspricht die Spurweite einer Metro allerdings den Standards der Eisenbahn des entsprechenden Landes. So setzte sich zum Beispiel in Russland eine Spurweite von 1524 mm, in Brasilien von 1600 mm und in Japan von 1067 mm durch. In einigen Fällen unterscheidet sich die Spurweite einer U-Bahn jedoch

von jener des Landes. Beispiele hierfür sind in Madrid, San Francisco oder Glasgow zu finden. [1][20]

Die Unterschiede der Spurweiten entwickelten sich meist aus zwei verschiedenen Gründen heraus. Entweder man entschied sich für eine andere Spurweite aus rein technischen Gründen, da die Spurweite das Fahrverhalten einer Bahn beeinflusst, oder die Konkurrenz anderer Betreiber ist Auslöser für eine solche Handlung. So verhinderte man bereits beim Bau einer U-Bahn, durch die Unterscheidung der Spurweiten, dass die Infrastruktur von anderen Gesellschaften, wie zum Beispiel den Landesbahnen genutzt wird. [5]

In Paris löste man dieses Problem auf eine andere Weise. Nach langer Diskussion entschied man sich zwar gegen eine Meterspur und für eine Normalspur, konstruierte jedoch den Querschnitt des Tunnels in einer Dimension, die die Benützung für Eisenbahnfahrzeuge unmöglich machte. Bis heute wird dadurch die Eigenständigkeit der Pariser Metro garantiert. [20]

6.6 Stromversorgung

Die Stromversorgung bei U-Bahnen erfolgt meist über eine Stromschiene. Hierbei wird über eine dritte Schiene die Stromzufuhr mit einer Spannung von 600 bis 825 Volt gewährleistet. Die Stromschiene befindet sich meist auf einer der beiden Außenseiten der Führungsschienen und wird auf Isolatoren gelagert. Die Stromabnahme erfolgt mittels eines am Schienenfahrzeug befestigten Schleifschuhs. Der Kontakt des Schleifschuhs und der Schiene kann sowohl von der Oberseite als auch von der Unterseite der Schiene erfolgen. Abhängig ist dies von der Ausführung eines isolierend wirkenden Schutzes über der Stromschiene. [1][35]

Der Rückstrom erfolgt entweder über den Radsatz und die Führungsschienen oder mittels einer vierten, in Gleismitte verlegten Schiene. Durch den Einsatz der vierten Schiene kann der Erdschluss minimiert werden, die Kosten, davon vorrangig die Investitionskosten, steigen dagegen durch die Verwendung einer zusätzlichen Schiene. [1][35]

U-Bahnen mit Gummireifen, wie in Paris, nützen ihre zwei Stahlschienen lediglich zur Absicherung bei einem Druckverlust der Reifen und um das Fahrzeug sicher durch Weichen zu führen. Als Stromschienen werden die beiden außen liegenden Stahlschienen eingesetzt, die zusätzlich die Horizontalkräfte bei einer Bogenfahrt aufnehmen. Somit steht ein herkömmliches U-Bahnsystem mit 3 Schienen einem System mit 6 benötigten Schienen gegenüber. Zur Veranschaulichung dient die Abbildung 44. [1]



Abbildung 51: Oberbau mit sechs Schienen der Pariser Metro [37]

Bei der Pariser Metro liegen die zwei auf Isolatoren gelagerten Stromschienen jeweils auf der Außenseite der Stahlschienen auf den Schwellen. Auf den ersten Strecken diente zu Beginn der Metro eine Doppelkopfschiene mit 38 kg/m als Stromschiene. Schon bald wurde diese durch eine deutlich schwerere Breitfußschiene ersetzt. Heute gilt eine 52 kg/m schwere T-förmige Schiene als Standardausführung. Der Stromabnehmer des Fahrzeuges befindet sich mittig im Drehgestell und bestreicht die Schiene von der Innenseite her. Die Schiene an sich führt 750 V Gleichstrom und verfügt über keine isolierende Schutzabdeckung. Der Rückfluss des Stroms erfolgt durch Bürsten an der Unterseite des Drehgestells über die Führungsschienen. [12][23]

Eine andere Möglichkeit der Stromzufuhr stellt die Oberleitung dar. Der Vorteil der Stromschiene gegenüber dieser liegt in der geringeren benötigten Höhe, welche für eine im Tunnel geführte U-Bahn erheblich ist. Auf Grund der Sicherheitsproblematik, die eine Stromschiene mit sich bringt, wird sie bei der Eisenbahn in dieser Form kaum eingesetzt. Im geschlossenen Tunnelsystem einer U-Bahn und dem von anderen Verkehrsträgern abgegrenzten Fahrweg stellt dies hingegen nur ein sehr geringes Problem dar. Jedoch findet man auch Metros bei denen die Traktionsstromzufuhr über eine Oberleitung erfolgt. Durch die Führung der Stromleitung in sicherer Höhe und einem Wegfall der Beeinflussung der für eine Stromschiene benötigten Isolatoren, kann die Spannung auf durchschnittliche 1500 Volt erhöht werden. In sehr kleinen Tunnelprofilen wird statt des Fahrdrabtes oft eine starre Oberleitung, welche aus einer Stromschiene besteht, angewendet. Beispiele für Metros mit Oberleitung findet man in Madrid, Hong Kong, Rom oder Seoul. [1]

6.6.1 Bereitstellung des Stroms

In den Anfängen der Pariser Metro wurde versucht den benötigten Strom eigenständig zur Verfügung zu stellen. Dieses Unterfangen scheiterte jedoch. Das dafür herangezogene Kraftwerk in *Bercy* konnte erst ein Jahr nach Eröffnung der Metro in

Betrieb gehen. Das Kraftwerk lieferte die folgenden 26 Jahre einen Teil des benötigten Stroms für die Metro. 1927 wurde die Produktion in *Bercy* eingestellt. Der größte Teil des benötigten Stromes wurde bereits schon damals von privaten Anbietern bezogen. Diese lieferten Dreiphasen-Wechselstrom mit 10.000 Volt an die entsprechenden Umspannwerke. In den Umspannwerken wurde der Strom in Gleichstrom mit 600 Volt für die Metro bzw. 1.500 Volt für die RER Linie B umgewandelt. [23]

Zwischen 1958 und 1971 wurde die Stromversorgung der Metro auf 750 Volt angepasst. 1978 bis 1979 erweiterte man das Netz. Im Zuge dessen wurde das Versorgungsnetz in das Metronetz inkludiert um eine Eigenständigkeit garantieren zu können. [23]

Die Umspannwerke sind in einem Abstand von rund 3 km positioniert. Auch bei einem Ausfall eines Umspannwerkes kann der Strombedarf somit von den anderen gedeckt werden. [23]

7 Der Fuhrpark

Das heutige optische Erscheinungsbild und die technische Gestaltung von Metrofahrzeugen sind das Resultat einer jahrzehntelangen Entwicklung. Die vielseitigen Ausführungen von U-Bahnfahrzeugen sind nur schwer zu verallgemeinern. Auf Grund der unterschiedlichen existierenden Oberbauten sowie Tunnelprofile und Stromversorgungen gibt es weltweit eine Vielzahl verschiedenster Fahrzeuge. Durch Erweiterungen des Netzes und Modernisierungen der Fahrzeuge wird der Fuhrpark einer Metro ständig ergänzt und erneuert. Dies kann auch innerhalb eines Netzes zu einer Vielzahl von Fahrzeugtypen führen. Die Pariser Metro, als historisch gewachsenes Netz, ist geradezu prädestiniert als Veranschaulichungsobjekt dieser Tatsache. Sie vereint in sich heute nicht nur die jeweiligen modernisierten Modelle, sondern zusätzlich zwei unterschiedliche Systeme, die konventionellen Stahlradfahrzeuge und die Gummireifenfahrzeuge.

7.1 Fahrzeuggröße

Einer der kleinsten Wagen verkehren auf dem Kleinprofil der Berliner U-Bahn. Mit 2,3 m Breite und einer Höhe von 3,1 m zählen die Wagen zu den kleineren Ausführungen eines U-Bahn-Wagens [38]. Im Gegensatz dazu besitzt die U-Bahn in San Francisco überdurchschnittlich große Wagen. Diese sind 3,2 m breit und haben eine Länge von fast 23 m. Sowohl die Abmessungen der Wagen der Berliner U-Bahn, als auch die der U-Bahn in San Francisco stellen Extremwerte dar und entsprechen nicht dem Durchschnitt. [1]

7.2 Platzbedarf eines Passagiers

Auch bei der bedachten Fläche für einen stehenden oder sitzenden Passagier findet man deutliche Unterschiede. Der angedachte Platz für einen sitzenden Passagier reicht von 0,27 m² bis 0,53 m². Für einen stehenden Fahrgast werden durchschnittlich 0,25 m² bemessen. Extrema findet man hierbei in London mit einem Wert von 0,3 m² sowie in Moskau mit einem sehr niedrigen Wert von 0,2 m² zu Stoßzeiten. [1]

7.3 Fahrgastraum

Die Ausgestaltung des Fahrgastraumes wird sehr unterschiedlich gehandhabt. Abhängig ist dieser von Faktoren wie der Anzahl der Passagiere und der Länge der Wegstrecke die diese zurücklegen. Ebenso entscheidend ist die Anzahl der Türen, der Bedarf eines durchgehenden Mittelgangs und in Einzelfällen sogar der Platzbedarf der Achsen, die den

Fahrgastbereich einschränken (z.B. London „tube“-Strecken). So findet man auf Strecken im innerstädtischen Bereich, die eine hohe Auslastung haben und hauptsächlich für kurze Wege genutzt werden, meist Wagen mit einem prozentuell sehr niedrigen Anteil an Sitzplätzen. In Rio de Janeiro findet man zum Beispiel einen Sitzplatzanteil von gerade einmal 18%. Bedient eine Metrolinie die Randgebiete eines Ballungsraums, so dominieren meist längere Wegstrecken, wodurch die Sitzplätze an Bedeutung gewinnen. Der Anteil der Sitzplätze kann dabei, wie bei der *London Underground*, teilweise auf bis zu 56% der Gesamtkapazität ansteigen. Neben den Überlegungen zur bestmöglichen Auslastung eines Wagens kann der Anteil der Sitzgelegenheiten auch von anderen Faktoren abhängen. In Amerika wird zum Beispiel die Strategie verfolgt generell den Anteil an Sitzplätzen gering zu halten, um Obdachlosen nicht den Anreiz zu bieten für längere Zeit in einer U-Bahn zu verweilen. [1]

Auch die Anordnung der Sitzgelegenheiten passt sich den Gegebenheiten an. So findet man bei einem niedrigen Prozentsatz meist eine in Längsrichtung verlaufende Anordnung entlang der Wagenwände. In diesem Fall dominiert der Mittelgang zwischen den beiden Sitzreihen das Erscheinungsbild des Fahrgastraumes. Durch einen höheren prozentuellen Anteil an Sitzgelegenheiten wird eine Anordnung in Querrichtung unumgänglich. [1]

7.4 Fahrzeugtüren

Die Anordnung und Konstruktion der Türen eines U-Bahnwagens variiert genauso wie deren Anzahl. Zu unterscheiden ist dabei eine Anordnung von zwei bis fünf Türen pro Wagenseite, die entweder ein- oder zweiflügelig gestaltet sein können. Auch für den Öffnungsmechanismus existieren verschiedene Varianten. Die Türen können beim Öffnen in einer Aussparung verschwinden, als Schwenkschiebetüre an der Außenseite des Wagens zum Liegen kommen, oder als Falttür konstruiert sein. Ob die Wagentüren in der Station automatisch geöffnet werden, oder nur auf Anforderung, hängt von den klimatischen Bedingungen ab. Wird eine Klimatisierung oder Beheizung des Innenraumes benötigt, so dominiert das Öffnen der Türen mittels Anforderung des Passagiers. [1]

7.5 Zugzusammenstellung

Die Anzahl der Wagen pro Zug wird von dem Verkehrsaufkommen, der Taktfrequenz und der Größe bzw. Kapazität der Wagen bestimmt. Auf eher gering frequentierten Netzen können zwei oder drei Wagen ausreichend sein, während die New Yorker U-Bahn mit bis zu elf Wagen fährt. Ob eine kapazitative Anpassung der Zuglänge an das über den Tag schwankende Fahrgastaufkommen erfolgt, ist von Unternehmen zu Unternehmen

verschieden. Jedoch muss dafür auf jeden Fall eine entsprechende Infrastruktur und Technik vorhanden sein. [1]

7.6 Beschleunigungs- / Bremsvermögen

Auch bei der Motorisierung finden sich Unterschiede. Wie groß die Motorleistung bei einem Triebfahrzeug ist und wie viele Triebfahrzeuge ein U-Bahnzug beinhaltet hängt von den betrieblichen Anforderungen, dem Gewicht des Zuges sowie der Trassierung ab. Große Stationsabstände fordern eine hohe Endgeschwindigkeit, wohingegen bei kurzen Stationsabständen ein gutes Beschleunigungsverhalten von Vorteil ist. Die durchschnittliche Beschleunigung eines Metrofahrzeuges liegt zwischen $1,1$ und $1,3 \text{ m/s}^2$. Spitzenleistungen liefert dabei die U-Bahn in Caracas, welche ein Beschleunigungsverhalten von $1,48 \text{ m/s}^2$ aufweist. Sehr geringe Beschleunigungsleistungen zeigen im Vergleich die Züge in Seoul mit $0,7 \text{ m/s}^2$. Ebenso wie das Beschleunigungsverhalten ist auch die Bremsleistung maßgebend für den Betrieb. Durchschnittlich wird eine Bremsleistung von $1,2 - 1,35 \text{ m/s}^2$ erreicht. Bei einer Notbremsung wird die Geschwindigkeit hingegen mit oft mehr als 2 m/s^2 verringert. Bei der Art der Bremsen kann es sich sowohl um eine Nutzbremse (Rekuperation), als auch um eine elektropneumatische Klotz- oder Scheibenbremse handeln. Zur Unterstützung der Bremsleistung bei einer Notbremsung, kann eine Magnetschienenbremse zum Einsatz kommen. Ebenfalls findet man Kombinationen aus mehreren Bremssystemen. [1]

7.7 Fahrzeuge der Pariser Metro

Die Fahrzeuge der Pariser Metro teilen sich in zwei Gruppen auf. Die konventionellen Fahrzeuge mit Stahlrädern werden mit MF (*Matériel Fer*) und die Fahrzeuge mit Gummibereifung mit MP (*Matériel Pneu*) bezeichnet. [23]

Heute sind von beiden Fahrzeugtypen mehrere Ausführungen in Betrieb. Diese werden, neben der Unterteilung in MP und MF, mit den Jahreszahlen des Entwicklungsjahres bezeichnet. Von den Fahrzeugen mit Stahlreifen sind die Serien MF67, MF77, MF88 und MF01 im Einsatz. Bei den Fahrzeugen mit Gummibereifung findet man aktuell die Serien MP59, MP73, MP89 (in unterschiedlicher Ausführung für den Betrieb der Linie 1 und der Linie 14) und die Serie MP05. Die Fahrzeugserien unterscheiden sich nicht nur durch eine Modernisierung des Designs, sondern auch die technischen Daten weichen geringfügig voneinander ab. Die Kenngrößen der Fahrzeuge sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Technische Daten der Wagen der Pariser Metro [21][23][39]

| | MP56 (MP59) | MP73 | MP89CC | MP89CA | MP05 | MF67 | MF77 | MF88 | MF01 |
|--------------------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|----------------------|--------|--------|---------|
| eingesetzt auf Linie | 4,11 | 6,11 | 1,4 | 14 | 1 (14) | 3,3bis,5, 9,10,12 | 7,8,13 | 7bis | 2,5,(9) |
| Jahr der Inbetriebnahme | 1963 | 1973 | 1997 | 1998 | 2010 | 1968 | 1979 | 1989 | 2007 |
| Leistung [kW] | 1760 | - | 2800 | 2000 | 2400 | 1272 | 1500 | 840 | 1200 |
| Wagen pro Zug | 6* | 5 | 6 | 6 | 6 | 5** | 5 | 3 | 5 |
| Anzahl der Wagen | 72 | 46 | 52 | 21 | 53 | 291 - 39 | 196 | 9 | 161 |
| Triebwagen | | | | | | | | | |
| Kuppellänge [m] | 15,615 | 15,615 | - | - | - | 15,615 | 15,470 | 15,500 | - |
| max. Breite [m] | 2,480 | 2,480 | - | - | - | 2,420 | 2,460 | 2,440 | - |
| Höhe*** [m] | 3,485 | 3,485 | - | - | - | 3,430 | 3,460 | 3,480 | - |
| Anzahl Sitze | 24 | 24 | - | - | - | 24 | 22 | 20 | - |
| Anzahl Klappsitze | 28 | 28 | - | - | - | 28 | 23 | 26 | - |
| Steuerwagen | | | | | | | | | |
| Kuppellänge [m] | - | - | 15,380 | 15,380 | 15,380 | 15,615 | - | - | 14,800 |
| max. Breite [m] | - | - | 2,448 | 2,448 | 2,440 | 2,420 | - | - | 2,400 |
| Höhe*** [m] | - | - | 3,471 | 3,471 | 3,480 | 3,430 | - | - | 3,444 |
| Anzahl Sitze | - | - | 18 | 24 | 24 | 24 | - | - | - |
| Anzahl Klappsitze | - | - | 15 | 12 | 12 | 28 | - | - | - |
| Mittelwagen | | | | | | | | | |
| Kuppellänge [m] | 14,790 | 14,790 | - | - | - | 14,790 | 15,500 | 15,500 | - |
| max. Breite [m] | 2,480 | 2,480 | - | - | - | 2,420 | 2,460 | 2,440 | - |
| Höhe*** [m] | 3,485 | 3,485 | - | - | - | 3,430 | 3,460 | 3,480 | - |
| Anzahl Sitze | 24 | 24 | - | - | - | 24 | 28 | 24 | - |
| Anzahl Klappsitze | 30 | 30 | - | - | - | 30 | 24 | 28 | - |
| Triebfahrzeug ohne Führerraum | | | | | | | | | |
| Kuppellänge [m] | 14,790 | 14,790 | 14,880 | 14,880 | 14,880 | 14,790 | 15,500 | - | 15,700 |
| max. Breite [m] | 2,480 | 2,480 | 2,448 | 2,448 | 2,440 | 2,420 | 2,460 | - | 2,400 |
| Höhe*** [m] | 3,485 | 3,485 | 3,471 | 3,471 | 3,480 | 3,430 | 3,460 | - | 3,444 |
| Anzahl Sitze | 24 | 24 | 28 | 24 | 24 | 24 | 28 | - | - |
| Anzahl Klappsitze | 30 | 30 | 16 | 12 | 12 | 30 | 24 | - | - |
| Zusätzliche Daten | | | | | | | | | |
| max. Geschwindigkeit [km/h] | 70 | 70 | 80 | 80 | 80 | 80 | 100 | 80 | 70 |
| Zuglänge [m] | 90,390 | 75,600 | 90,280 | 90,280 | 90,280 | 74,400 | 77,440 | 46,440 | 75,600 |
| Türöffnungswerte [m] | 1,300 | 1,300 | 1,650 | 1,650 | ? | 1,300 | 1,575 | 1,576 | - |
| Anzahl Sitze pro Zug | 144 | 120 | 148 | 144 | 144 | 120 | 128 | 64 | - |
| Anzahl stehende Passagiere | 556 | 455 | 540 | 578 | 578 | 455 | 446 | 282 | - |
| Gesamtanzahl Personen pro Zug | 700 | 575 | 688 | 722 | 722 | 575 | 574 | 346 | 577 |
| Leergewicht Zug [t] | 126,4 | 111,2 | 140 | 140 | ? | 115 - 119 | 121,5 | 74,2 | 127,5 |

*4 Wagen auf Linie 11

**3 Wagen auf Linie 3bis

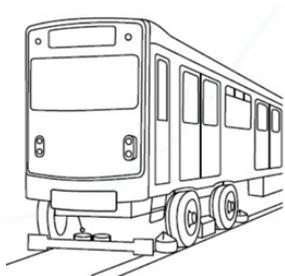
*** von Schienenkopf aus gemessen

In der Tabelle 2 ist zu erkennen, dass die max. Geschwindigkeit des Fahrzeugtyps MF77 mit 100 km/h etwas über den üblichen Werten von 70 oder 80 km/h liegt. Diese Anpassung erfolgte auf Grund des priorisierten Einsatzes der Wagenklasse MF77 auf in Vororten verlaufenden Strecken mit einem größeren Stationsabstand. Die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit der Pariser Metro beträgt 25 km/h. [12]

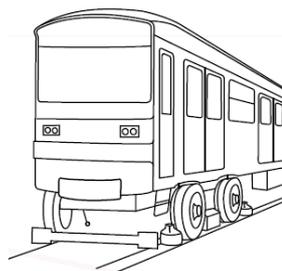
Die Anfahrtsbeschleunigung der Fahrzeuge mit Stahlrädern beträgt $0,85 \text{ m/s}^2$. Bei einer Notbremsung kann mit $1,2 \text{ m/s}^2$ verzögert werden. Gummibereiften Fahrzeugen weisen ein Beschleunigungs- und Bremsvermögen von $1,3 \text{ m/s}^2$ auf. Bei einer Notbremsung kann dieser Wert sogar auf bis zu $2,5 \text{ m/s}^2$ erhöht werden. Die Fahrzeuge mit konventionellen Stahlrädern werden mittels Druckluftbremsen oder einer elektrischen Widerstandsbremse zum Stillstand gebracht. Die neuen Fahrzeuge der MP Serien nutzen im Betrieb eine Rekuperationsbremse. Dabei fungiert der elektrische Motor als Generator. Durch das Antreiben des Generators wird Energie verbraucht und somit eine Bremswirkung erzeugt. Die durch den Bremsvorgang gewonnene Energie wird wieder in das Netz eingespeist. Früher erfolgte die Betriebsbremsung mittels Klotzbremsen auf der Lauffläche des zylindrischen Sicherheitsrades (siehe Abbildung 53 und Abbildung 54). Diese Methode wird heute nur mehr für die Unterstützung der Bremsleistung bei einer Notbremsung oder bei einem Ausfall der Rekuperationsbremse eingesetzt. [12] [23] [39] [40]

Der Fuhrpark

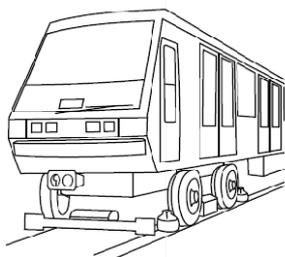
MP56



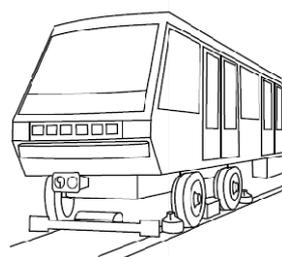
MP73



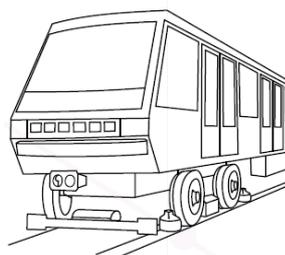
MP89CC



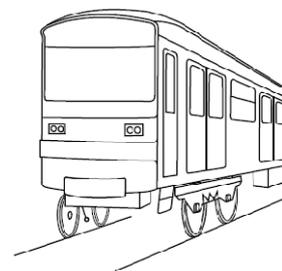
MP89CA



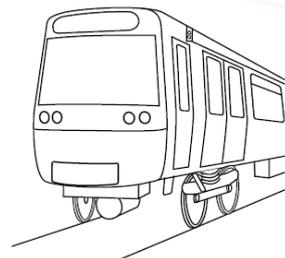
MP05



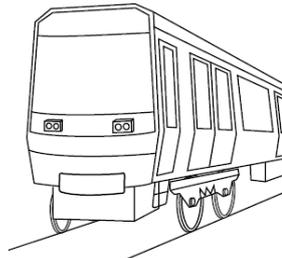
MF67



MF77



MF88



MF01

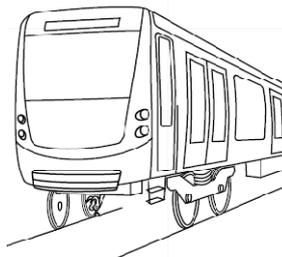


Abbildung 52: Fahrzeugtypen der Pariser Metro [27]

7.7.1 Vergleich der Systeme von Gummireifen und Stahlspurkranzrädern

Das System der Gummireifen hat insbesondere in Paris eine große Bedeutung. In den 1960er Jahren stellte man, vor allem durch den Einfluss der Firma Michelin, die Linien 1, 4, 6 und 11 auf gummibereitete Fahrzeuge um. Der Grund hierfür war die damalige Überlegenheit der Fahrzeuge gegenüber Stahlrädern in Bezug auf Beschleunigung, Fahrzeuglauf und Lärmentwicklung. Als die Linie 6 im Jahre 1974, als vorläufig letzte Strecke, auf den Betrieb mit Gummireifen umgerüstet war, verzichtete man bei den restlichen Linien auf weitere Schritte. Zu diesem Zeitpunkt hatte der konventionelle Betrieb mit Stahlrädern bereits bedeutende Fortschritte gemacht, welche den langwierigen Umbau nicht mehr rechtfertigten. [7][20]

Erst im Jahr 1998 entschied man sich die neue Linie 14 wieder mit Gummireifen auszustatten. Ausschlaggebend für diesen Beschluss war das bessere Bremsvermögen gegenüber Stahlradfahrzeugen, welches vor allem im automatischen Betrieb und einem Fahren mit minimalen Zugfolgezeiten Vorteile mit sich bringt. Weitere Gründe waren das gute Beschleunigungsvermögen, der Fahrkomfort sowie die limitierte Übertragung von Körperschall an das umliegende Erdreich. In diesem Zusammenhang sollte nicht unerwähnt bleiben, dass auch die gleichzeitige Erneuerung der Fahrzeuge für die Linie 1 einen Einfluss auf die Entscheidung hatte. Die neu entwickelten Züge der Wagenklasse MP89CC konnten ohne großen Aufwand für die Linie 14 adaptiert werden. Die Wagen der Linie 14 (MP89CA) sind somit fast ident mit den Wagen der Linie 1 (MP89CC) (siehe Tabelle 2). [40]

Neben weiteren französischen Städten wie Lyon und Marseille findet man das System der Gummireifen vorrangig dort, wo französische Ingenieure bei der Planung der U-Bahn hinzugezogen wurden. Beispiele hierfür sind Montréal, Santiago de Chile und Mexico-Stadt. [7][20]

Ein Fahrzeug mit Gummirädern hat denselben Wagenkasten wie Fahrzeuge mit konventionellen Stahlrädern. Der Unterschied besteht in der Ausführung der Drehgestelle. Wie in Abbildung 53 und Abbildung 54 zu erkennen ist, besteht dieses aus vier Laufrädern aus Gummi, vier horizontal angeordneten Gummi-Führungsrädern und vier Stahlsicherheitsrädern auf der Innenseite. Diese sind auf Grund der Brandgefahr nicht mit Luft, sondern mit Stickstoff befüllt. [7][12]

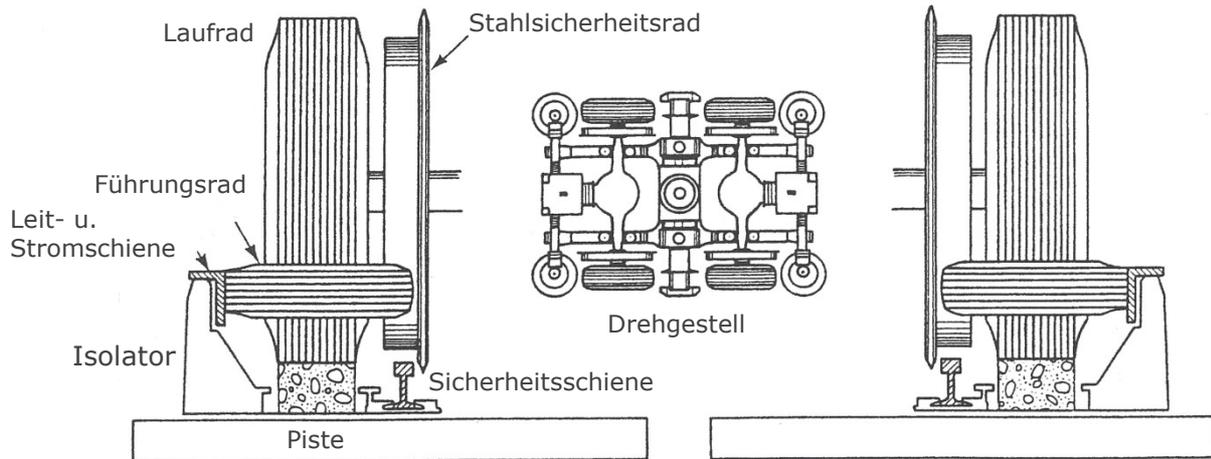


Abbildung 53: Kontakt Rad-Schiene/bzw. Piste bei Fahrzeugen mit Gummirädern [7]



Abbildung 54: Drehgestell eines gummibereitigen Fahrzeuges [23]

Die Laufräder werden auf einer Piste geführt. Diese bestand anfänglich aus Holz, heute jedoch aus Stahl oder Beton. Die Führungsräder dienen der Aufnahme der horizontalen Beschleunigung und stützen sich gegen die an der Außenseite liegenden Leitschienen ab, welche ebenso als Stromschiene dienen. Die zusätzlichen Stahlsicherheitsräder werden aus zwei Gründen benötigt. Einerseits dienen sie der Durchfahrt der Weichen und andererseits fangen sie den Wagen sicher auf, falls es zu einem Druckverlust in einem der Reifen kommen sollte. [7]

Auf Grund dieser technischen Konstruktion erkennt man schnell einen bedeutenden Nachteil dieses Systems. Pro Wagen werden 16 Gummireifen und acht Stahlräder benötigt, wohingegen ein konventionelles Fahrzeug nur acht Stahlräder braucht.

Aus dieser komplizierten Konstruktion resultieren die folgenden Unterschiede zwischen den beiden Systemen:

Die Haftreibung ist bei Gummireifen deutlich erhöht. Begründet wird dies durch den materialbedingten hohen Reibbeiwert und die größere Kontaktfläche. Dies hat vor allem einen Einfluss auf das Beschleunigungsvermögen, und die Fähigkeit größere Steigungen zu überwinden. Heutzutage ist die Beschleunigung allerdings meist nicht auf Grund der technischen Machbarkeit begrenzt, sondern um einen entsprechenden Fahrkomfort gewährleisten zu können und um die Motorleistung niedrig zu halten. Einen positiven Einfluss hat die erhöhte Haftreibung auch heute noch beim Anfahren in Steigungen und einem höheren Bremsvermögen für Notbremsungen. [7]

Sowohl Stahlradfahrzeuge als auch Gummireifenfahrzeuge reagieren empfindlich auf Nässe, da diese die Haftung zwischen Rad und Schiene bzw. Reifen und Fahrbahn verringert. Während der Stahl-Schiene-Kontakt generell durch das Streuen von Sanden verbessert wird, sind Gummireifen profiliert um ein Aufschwimmen der Reifen zu verhindern. Bei Eis oder Schnee besteht die Gefahr des Verlustes der Bodenhaftung und der deutlichen Verlängerung des Bremsweges. Auf Grund der vorwiegenden Tunnellage von U-Bahnen stellt dies nur ein geringes Problem dar. Liegen Abschnitte jedoch im Freien, so müssen, vorrangig bei dem System mit Gummireifen, komplexe Heizungen verwendet werden, um die Fahrbahn schneefrei zu halten. Zusätzlich verfügen einige Fahrzeuge über Bürsten, welche die Piste vor allem im Haltestellenbereich schneefrei halten. Dies bedeutet eine komplizierte Anlage und erhöhte Kosten von Investition und Betrieb. [41]

Durch den erhöhten Reibbeiwert müssen nicht alle Achsen eines Gummireifenfahrzeuges angetrieben werden. Somit werden weniger Motoren benötigt, die im Gegenzug jedoch größer ausgestaltet werden müssen um die nötige Zugkraft zu erzeugen. Die aufzubringende Zugkraft muss bei Gummireifenfahrzeugen meist größer sein, da der Rollwiderstand größer ist, als bei Stahlradfahrzeugen. Auch das Gewicht hat einen Einfluss auf die zusätzlich benötigte Zugkraft. Wissenschaftliche Abhandlungen zeigen keinen deutlichen Gewichtsvergleich von Gummirad- und Stahlradfahrzeugen. Vukan R. Vuchic geht jedoch davon aus, dass Gummiradfahrzeuge auf keinen Fall leichter sind als Stahlradfahrzeuge. [40]

Das Rollgeräusch bei Gummireifen ist im Vergleich zu früheren Fahrzeugen mit Stahlrädern deutlich leiser. Stellt man jedoch heutige Standards der beiden Systeme gegenüber ist die Lärmentwicklung in etwa gleich groß. Seit den Fahrzeugen der Serie MF67 werden die Drehgestelle besonders geräuscharm ausgeführt. Eine Ausnahme bilden enge Kurven. Hier weisen die Gummireifen einen deutlich leiseren Betrieb auf. Dies wird

durch die Vibrationen begründet, die Stahlräder während einer Bogenfahrt erzeugen. [7]
[23]

Durch das Tragverhalten der Gummiräder sind das Gewicht und damit die Größe der Wagen beschränkt. In großen Städten ist eine U-Bahn mit Gummireifen somit nur wenig geeignet, da Wagen wie die in Atlanta, Toronto oder San Francisco schlichtweg zu schwer für dieses System sind. [7]

Der Energieverbrauch wird bei Gummireifen bis zu 35% höher angenommen als bei einem konventionellen System. Die Ursache dafür findet sich in dem größeren Widerstand auf Grund der größeren Kontaktfläche. [7]

Ebenso wie der Energieverbrauch liegen auch die Instandhaltungskosten rund 20% über denen eines Fahrzeuges mit Stahlrädern. Begründet wird dies durch das komplexe und wartungsanfällige System. [7]

Aus dem hohen Rollwiderstand und dem Energieaufwand resultiert eine große Wärmeentwicklung, die gerade im Tunnel problematisch sein kann. Abhilfe muss zum Beispiel durch Ventilatoren geschaffen werden. [7]

Schlussendlich ist auch die Brandgefahr bei Gummireifen deutlich höher. Der Grund hierfür ist, dass bei einem Platzen des Reifens ein Lichtbogen überschlagen kann und den leicht brennbaren Gummi entflammen kann. Vorfälle wie diese gab es bereits bei einigen Bahnen. [7]

Wie wirtschaftlich Fahrzeuge mit Gummireifen tatsächlich sind legen nur wenige Studien dar. Zu erkennen ist, dass frühe Studien in Frankreich zu deutlich positiven Erkenntnissen kommen. Spätere Betrachtungen sprechen hingegen von merklich höheren Investitions-, Instandhaltungs- und Betriebskosten. [7]

Betrachtet man alle diese Punkte als ein Gesamtes, so kommt man zu dem Schluss, dass Luftgummireifen deutliche Nachteile aufweisen. Vereinzelt können Luftgummireifen jedoch eine gute Lösung darstellen. Betrachtet man die Pariser Metro, so stellt sich ihr Netz als prädestiniert für den Betrieb mit Gummireifen dar. Ein sehr hoher Prozentsatz der Linien liegt im geschlossenen Tunnel. Die bestehenden kleinen Radien, sowie das Nichtvorhandensein einer lärmdämmenden Unterlage machen die Gummireifen besonders leise im direkten Vergleich mit Stahlrädern. Auch durch die großen bestehenden Steigungen konnte der Betrieb durch die Umrüstung zu Gummireifen im Bezug auf Fahrzeiten verbessert werden. Ein weiteres sinnvolles Einsatzgebiet können Hochbahnen sein, welche nur mit großen finanziellen Mitteln schallgedämmt werden können. [7]

8 Betriebskonzept

8.1 Netzdichte/Haltestellenabstand

Die Netzdichte ist ausschlaggebend dafür, wie stark eine U-Bahn angenommen und genutzt wird. Gerade im innerstädtischen Bereich ist ein dichtes Netz von Vorteil. Durch den geringen Stationsabstand kann die Metro auch für kurze Wegstrecken effektiv genutzt werden. Die Pariser Metro weist im städtischen Bereich einen mittleren Stationsabstand von 500 m auf [12]. Damit zählt die Metro zu einem der dichtesten U-Bahnnetze weltweit. Je weiter eine U-Bahn zu den Randgebieten eines Ballungsraumes kommt, umso weiter gestreut können die Haltestellen sein. Dies hat den positiven Effekt, dass die Gebiete ausreichend erschlossen sind und die Fahrzeit ins Zentrum verringert wird. Die Pariser Metro weist in den Vororten einen Stationsabstand von 800 bis 1000 m auf [12].

8.2 Zugfolgezeiten

Die Zugfolgezeit bezeichnet die zeitliche Distanz von zwei hintereinander fahrenden Zügen. Bei U-Bahnen ist diese von großer Bedeutung, da sie ein ausschlaggebender Faktor für die Leistungsfähigkeit ist. So hat bei der Pariser Metro eine Reduktion der minimalen Zugfolgezeit von 1min 50s auf 1min 35s eine Steigerung der Leistungsfähigkeit von 15 – 20% bewirkt [23]. Durch eine Automatisierung, wie bei der Linie 1 oder 14, können heutzutage Zugfolgezeiten von 85s erreicht werden [41]. Betrachtet man den dafür nötigen technischen Aufwand, so ist eine Steigerung der Leistungsfähigkeit verhältnismäßig unkompliziert zu verwirklichen.

Die Einhaltung dieser Zugfolgezeiten wird auf den durch ATO beeinflussten Linien, während der Fahrt auf freier Strecke automatisch gesteuert (siehe Unterkapitel 9.5). Die Aufenthalte in den Stationen werden hierbei möglichst gering gehalten. Dies wird durch ein System ermöglicht, dass dem Fahrer die geforderte Abfahrtszeit anzeigt und die Haltezeiten seit 1969 optimieren konnte. Es konnte eine Steigerung der Leistungsfähigkeit um 15 – 20% erreicht werden. [23]

8.3 Wartung und Abstellen der Fahrzeuge

Für die Wartung und Kontrolle der Fahrzeuge der Metro in Paris stehen Depots zur Verfügung. Jede Linie hat ein eigenes Depot um Reparaturarbeiten durchzuführen. Das Abstellen der Fahrzeuge während der Nacht, oder im Nichtgebrauch erfolgt in den Stationen, oder nicht genutzten Gleisen. Die bestehenden Depots werden im Folgenden näher behandelt. [23]

Ateliers de Fontenay (Linie 1): Das *Ateliers de Fontenay* liegt östlich der Endstation *Chateau de Vincennes* und ging im Jahr 1934 in Betrieb. Für die Einführung der Wagen MP89 wurde die Anlage zwischen 1996 und 1998 grundlegend erneuert. *Fontenay* hat über eine Eisenbahnkreuzung eine direkte Verbindung zur Linie A der RER. [23][27]

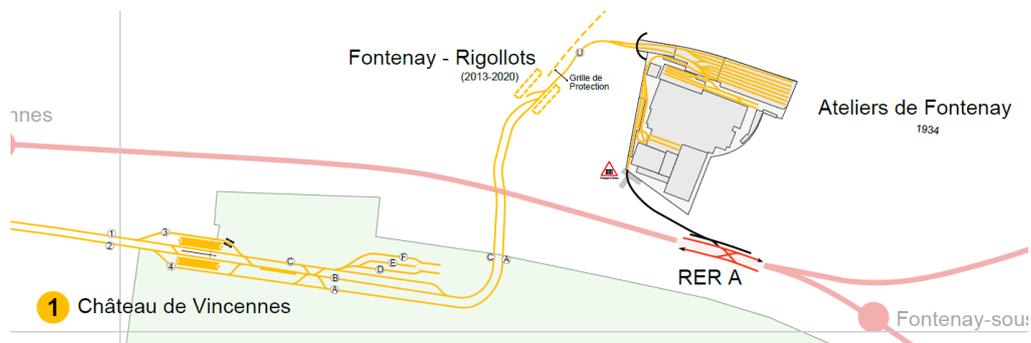


Abbildung 55: *Ateliers de Fontenay* [27]

Ateliers de Charonne (Linie 2): Das *Ateliers de Charonne* liegt im Osten der Endstation *Nation* und war das erste Depot der Metro Paris. Es wurde im Juli 1900 eröffnet und bediente damals die Linie 1 und die Linie 2 bis zur Eröffnung von *Fontenay* im Jahre 1934. Eine damals bestehende Gleisverbindung zur RER-Linie A wurde mittels einer Rampe mit einer Steigung von 15% ausgeführt. Diese wurde jedoch nach Erbauung der Verbindung bei *Fontenay* wieder rückgebaut. In den 1980er Jahren sowie 2007 wurde das Depot runderneuert. Die Verbindung zwischen der Linie 2 und dem Depot stellt die einzige Eisenbahnkreuzung des sich in Betrieb befindenden Netzes dar. Sie wird jedoch nur ohne Passagiere überquert. [23][27]

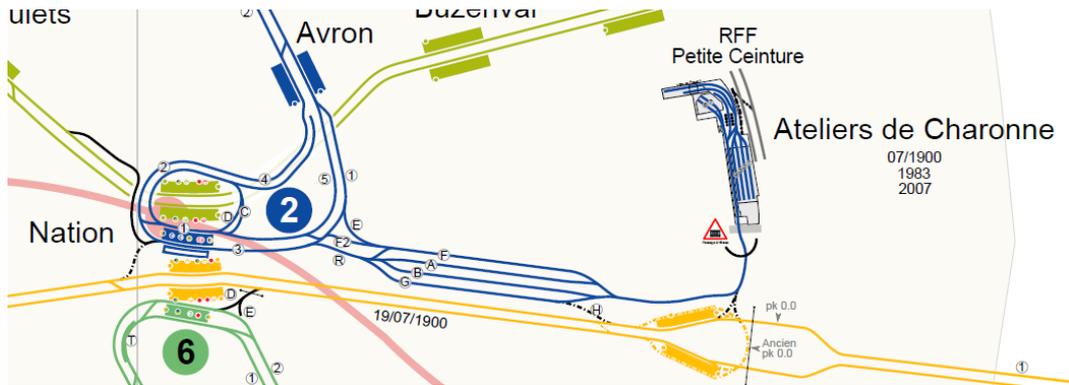


Abbildung 56: *Ateliers de Charonne* [27]

Ateliers de Saint-Fargeau (Linie 3): Das Depot *Saint-Fargeau* wurde im Jahr 1904 eröffnet. Das Gebäude steht mittlerweile unter Denkmalschutz. [23][27]

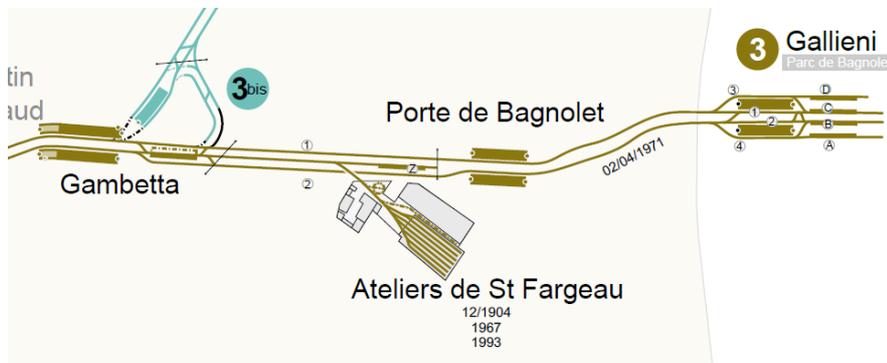


Abbildung 57: *Ateliers de St. Fargeau* [27]

Ateliers de Saint-Ouen (Linie 4): Das Depot *Saint-Ouen* befindet sich nördlich der Station *Porte de Clignancourt* und wurde im Jahr 1908 eröffnet und 2009 restauriert. [23][27]

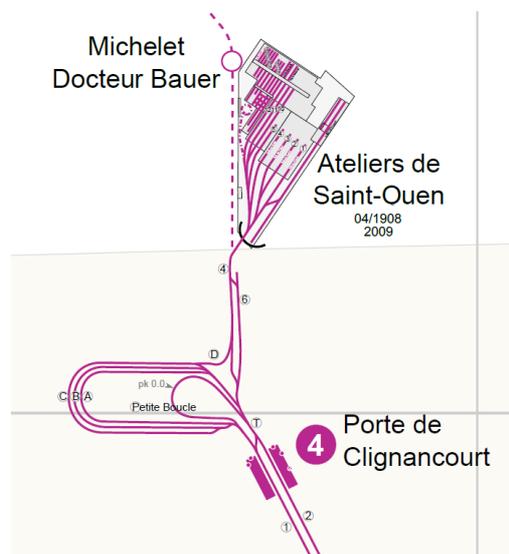


Abbildung 58: *Ateliers de Saint-Ouen* [27]

Ateliers de Bobigny (Linie 5): Das 1988 eröffnete Depot ist zwischen den beiden *Bobigny* Stationen situiert. Es dient zusätzlich der Instandhaltung der Fahrzeuge der Straßenbahnlinie 1. [23][27]

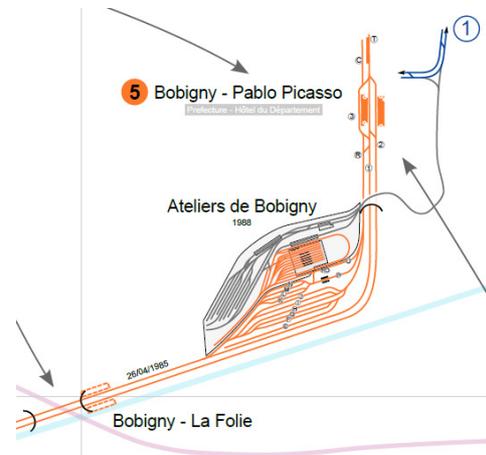


Abbildung 59: *Ateliers de Bobigny* [27]

Ateliers d'Italie (Linie 6): Das Depot der Linie 6 schließt an die Station *Place d'Italie* an und wurde im Jahr 1906 eröffnet. Auch zur Linie 5 besteht eine direkte Verbindung. [23][27]

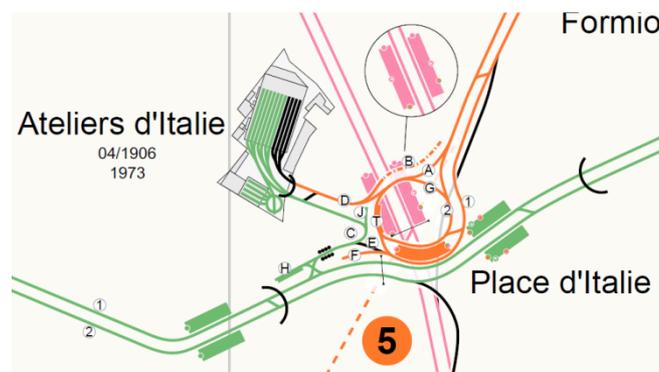
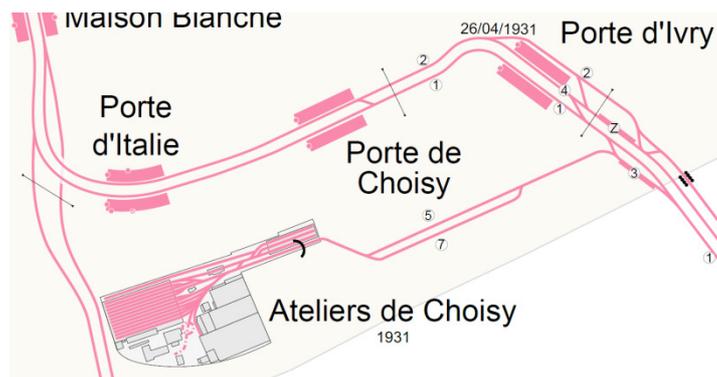
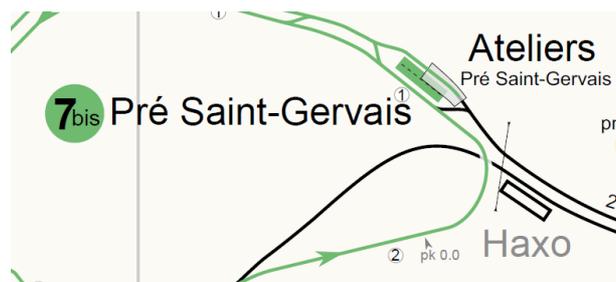


Abbildung 60: *Ateliers d'Italie* [27]

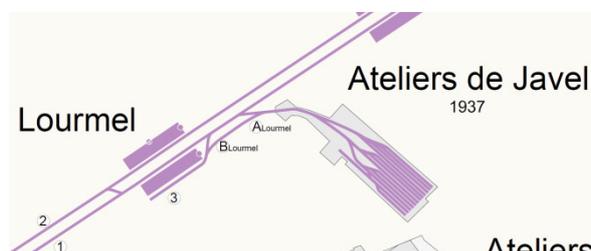
Ateliers de Choisy (Linie 7): Die Gleisverbindung zu dem *Ateliers de Choisy* verläuft südlich der Station *Porte d'Ivry*. Mit der Eröffnung im Jahr 1931 wurde *Villette* aufgelassen und gesamte Wartung der Fahrzeuge der Linie 7 ging auf das *Ateliers de Choisy* über. [23][27]

Abbildung 61: *Ateliers de Choisy* [27]

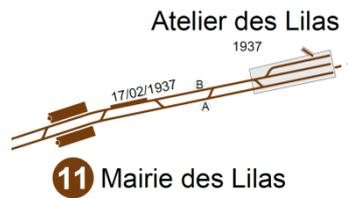
Ateliers Pré-Saint-Gervais (Linie 7bis): Der Bahnsteig, der für den früher dort bestehenden Pendlerverkehr eingerichtet wurde, ist heute vom Betrieb der Linie 7bis entkoppelt und wurde 1994 als eingleisiges Depot eröffnet. Im *Ateliers Pré-Saint-Gervais* werden ausschließlich kleine Reparaturen des Wagenklasse MF88 durchgeführt. Für größere Wartungen dient das Depot bei *Saint-Fargeau* der Linie 3. [23][27]

Abbildung 62: *Ateliers Pré Saint-Gervais* [27]

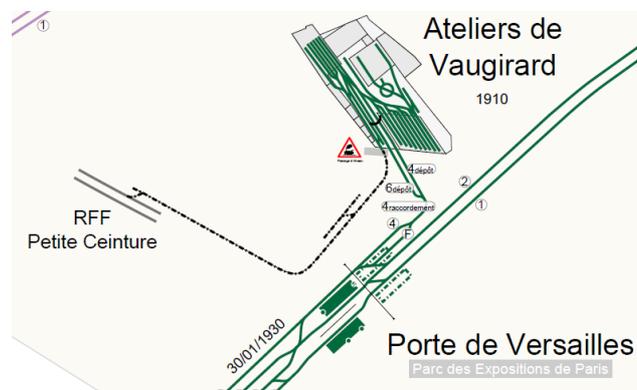
Ateliers de Javel (Linie 8): Das *Ateliers de Javel* wurde im Jahr 1934 eröffnet und ist über die Station *Lourmel* zu erreichen.[23][27]

Abbildung 63: *Ateliers de Javel* [27]

Ateliers de Boulogne (Linie 9): Über die Endstation *Pont de Sèvres* gelangt man in das *Ateliers de Boulogne*. Es wurde im Jahr 1934 eröffnet und wird seit 2010 bis voraussichtlich 2012 runderneuert. [23][27]

Abbildung 66: *Atelier des Lilas* [27]

Ateliers de Vaugirard (Linie 12): Das *Ateliers de Vaugirard* wurde 1910 eröffnet. Über eine Eisenbahnkreuzung, welche händisch gesichert werden muss, bestand eine Gleisverbindung mit dem Netz der RFF. Dieser wurde jedoch bereits in der Vergangenheit aufgelassen. [23][27]

Abbildung 67: *Ateliers de Vaugirard* [27]

Ateliers de Pleyel (Linie 13): Das *Ateliers de Pleyel* wurde im Jahr 1968 eröffnet und ist über die Station *Carrefour Pleyel* erreichbar. [23][27]

Ateliers de Châtillon (Linie 13): Als Unterstützung für das *Ateliers de Pleyel* wurde 1998 das *Ateliers de Châtillon* eröffnet. Nötig wurde dies auf Grund der Verlängerung der Linie 13. Das Depot befindet sich am südlichen Ende der Linie 13 nach der Station *Châtillon Montrouge*. [23][27]

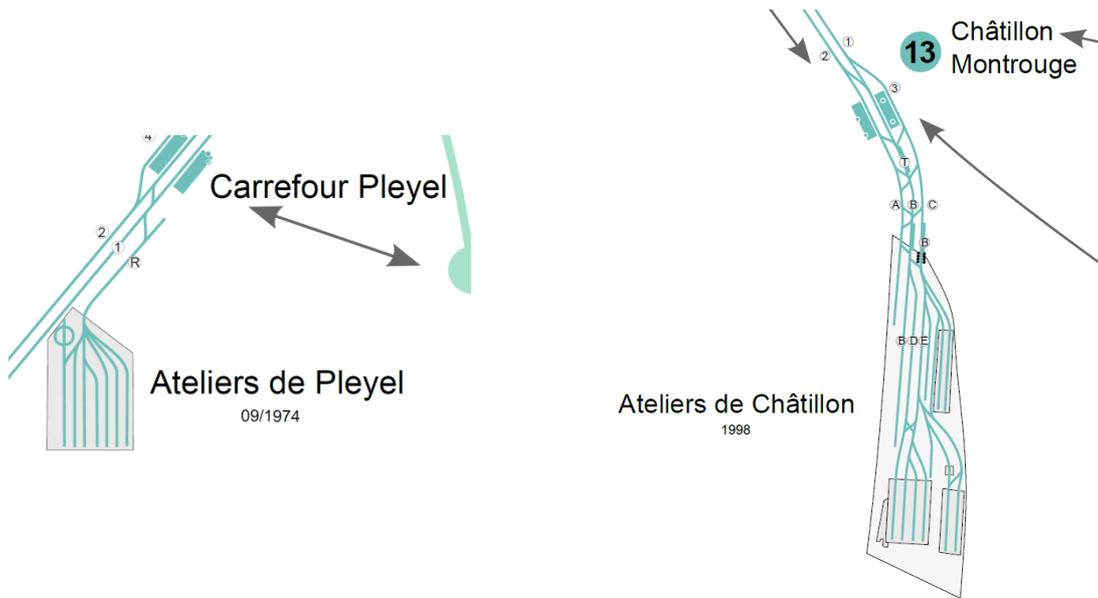


Abbildung 68: *Ateliers de Pleyel* [27]

Abbildung 69: *Ateliers de Châtillon* [27]

Ateliers de Tolbiac Nationale II (Linie 14): Am südlichen Ende der Linie 14 befindet sich das *Ateliers de Tolbiac Nationale II*. Das Depot befindet sich genau an der Stelle, an die in Zukunft die Station *Olympiades* verlegt werden soll. Zusammen mit der Errichtung der neuen Station wird auch das Depot weiter Richtung Süden verlegt. [23][27]

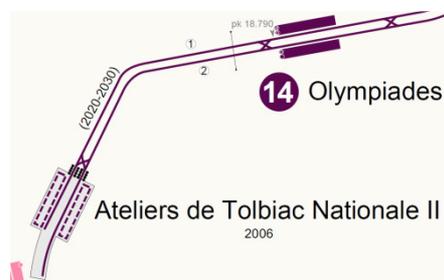


Abbildung 70: *Ateliers de Tolbiac Nationale II* [27]

Ateliers de la Villette: Zur Wartung der Betriebsfahrzeuge dient das Depot bei *Porte de la Villette*. Bis 1931 diente es noch der Instandhaltung der Fahrzeuge auf der Linie 7. [23][27]



Abbildung 71: *Ateliers de la Villette* [27]

9 Sicherungstechnik

Die Sicherungstechnik gewährt den problemlosen und sicheren Betrieb einer U-Bahn. Sowohl das Signalsystem, als auch das Zugleitsystem zählen zur Sicherungstechnik. Aufgabe dieser beiden Komponenten ist es, eine Kollision von Zügen zu verhindern. Dies ist vor allem bei Weichen oder Kreuzungen, sowie an Stationen von Bedeutung. Doch nicht nur der Sicherheitsaspekt spielt hierbei eine große Rolle. Auch die Leistungsfähigkeit soll durch Zugleitsysteme maximal genutzt werden. [1]

9.1 Fahren im Zeitabstand

In den Anfängen der U-Bahn wurde die Zugfahrt ausschließlich manuell durch den Zugführer gesteuert und basiert auf seinen visuellen Erkenntnissen und daraus resultierenden Entscheidungen. Deren Sicherungstechnik beruhte in Folge dessen auf dem Prinzip des Fahrens im Zeitabstand. Die Linie 1 der Pariser Metro wurde noch im Jahr der Eröffnung auf den Stellwerksbetrieb umgerüstet. Diese Tatsache verdeutlicht sehr gut, dass die entsprechenden Anforderungen einer U-Bahnlinie durch dieses System auf Grund der hohen Zugzahlen sowie der Komplexität der Gleispläne nicht erfüllt werden. [40]

9.2 Stellwerksbetrieb (Nichtselbsttätiger Streckenblock)

Bei dem System des Nichtselbsttätigen Streckenblocks obliegt die Bedienung von sicherungstechnischen Einrichtungen der Bedienung des örtlichen Betriebspersonals. Hierzu zählt neben der Betätigung der Weichen auch die Bedienung der Signale. [5]

Zur Zeit der ersten U-Bahnnetze lag die Steuerung von Weichen und Signalen noch in menschlicher Hand. Innerhalb der letzten Jahrzehnte hat sich die Sicherungstechnik von U-Bahnen, resultierend aus der steigenden benötigten Leistungsfähigkeit, grundlegend verändert. Dem mechanischen Stellwerk folgte bald die Einführung des elektromechanischen Stellwerkes wodurch nicht nur das automatische Stellen einer gesamten Fahrstraße ermöglicht wurde, sondern auch die lokalen Weichenstellwerke nicht mehr gebraucht wurden. [1]

9.3 Fahrgesteuerter Betrieb

Die Fahrgesteuerte Betrieb stellt die herkömmliche manuelle Betriebsart dar. Hierbei wird ein Blockabschnitt mittels eines Signals automatisch gesichert und die Zugfolge damit geregelt. Die Größe und Position des Blockabschnitts wird somit durch die Auslegung der Infrastruktur definiert und deshalb als Festblocksystem bezeichnet [42]. Bei der manuellen Zugsicherung durch Signale unterscheidet man zwei Varianten: Entweder kann das Überrollen eines „Halt“ zeigenden Signals ohne Folgen sein, oder das Ignorieren eines Signals löst eine Notbremsung aus und bringt somit den Zug zum Stehen (Punktförmige Zugbeeinflussung). [5][40]

9.3.1 Signalsysteme

Mit zunehmender Beliebtheit des Verkehrssystems U-Bahn steigerten sich auch die Zugzahlen. Diese Steigerung der Leistungsfähigkeit bedingte die Einführung eines Signalsystems um die Abstände zwischen zwei Zügen regeln zu können. Signale ermöglichen dem Zugführer zu erkennen, ob der kommende Abschnitt (Block) einer Strecke von anderen Zügen belegt ist. Die technische Ausgestaltung der Signale kann sehr unterschiedlich sein und hat sich seit den Anfängen der U-Bahn deutlich weiterentwickelt.

Erschwerend war die Tatsache der Tunnellage, da die Entwicklung von Lichtsignalen erst in den Anfängen steckte. Heute stellt das standardmäßig am häufigsten eingesetzte Signalsystem der Selbstblock mit ortsfesten Lichtsignalen dar. Die Tendenzen gehen hingegen immer mehr in Richtung Führerstandssignalisierung. [1]

Die Pariser Metro vereint in ihrer Historie eine Vielzahl an Entwicklungen im Bereich der Signaltechnik. Als Ursache dafür sind sowohl die frühe Entstehung wie auch die anfängliche Unterteilung in mehrere Betreiber zu nennen. Auch heute vereint die Metro innerhalb eines Netzes unterschiedliche Stufen der Entwicklung. Der geschichtliche Abriss wird im Folgenden erläutert:

Als die Linie 1 der Metro in Paris 1900 eröffnet wurde verfügte diese über keinerlei Signale zur Zugsicherung. Bereits im Jahr 1900 führte man auf Grund von einer deutlichen Verringerung der Zugfolgezeiten ein Blocksystem der „Hall Signal Company“ ein. Bei diesem System wurde durch den vorbeifahrenden Zug das Signal durch einen elektromagnetischen Kontakt umgestellt. Das Signal bestand aus einem schwarzen Korpus aus Holz und einer Lampe. Die unterschiedliche Farbgebung des Lichts entstand durch Signalscheiben, die sich, ausgelöst durch den elektromagnetischen Impuls, vor die Lampe schoben. Die Signalscheiben bestanden aus einem Aluminiumrahmen, der mit farbiger Seide bespannt war. Das grüne Signal signalisierte dabei dem nachfolgenden

Zug, entgegen der heutigen Geltung, dass der Abschnitt nur mit verminderter Geschwindigkeit befahren werden durfte. Gleichzeitig wurde auch der vorherige Abschnitt durch das Umschalten auf ein weißes Signal wieder frei gegeben. Die Hall-Signalgebung führte bereits nach nur einem Monat zu einer Kollision, als ein Zug zurücksetzte und somit mit dem nachfolgenden Zug kollidierte, der sich auf einem für ihn als „frei“ signalisierten Abschnitt befand. Auf Grund dessen passte man die Signalgebung entsprechend an, indem zusätzlich ein rotes Signal eingeführt wurde. Dieses signalisierte das absolute Verbot einer Einfahrt in den folgenden Blockabschnitt. Wurde ein rotes Signal von einem Zug übersehen, so wurde in der nächsten Station ein akustisches und visuelles Signal für das Bahnpersonal ausgelöst. Diese zusätzliche Sicherung wurde aufgegeben, als später das Bahnpersonal auf Bahnsteigen eingestellt wurde. [23][43]

Mit Eröffnung der Linie 2 wurde auch das Signalsystem adaptiert. Um eine Verwechslung mit dem weißen Licht der Straßenlaternen zu vermeiden, zeigten die Signale dauerhaft Rot. Erst bei Annäherung des Zuges schalteten die Signale kurzfristig auf Weiß um. Zur Signalisierung auf oberirdisch verlaufenden Streckenabschnitten dienten Formsignale. Mittels einer dauerhaften Instandhaltung leisteten die Hall-Signale gute Dienste. Die Kontaktstelle zwischen Fahrzeug und Signal war jedoch sehr störungsanfällig. Dies veranlasste die Konstrukteure dazu, dass die Linie 3 die letzte Strecke war, die mit diesem System ausgerüstet wurde. [23]

Die darauf folgenden Linien 4 bis 8 wurden mit einem automatischen Selbstblocksystem versehen. Zur Betätigung der Signale befand sich parallel zu den Führungsschienen eine ca. fünf Meter lange Stange. Bei der Vorbeifahrt eines Zuges wurde durch einen Schleifschuh ein elektrischer Impuls übermittelt. Dieser beeinflusste anschließend das entsprechende Signal. Nach einer erfolgreichen Bewährungsphase wurde auch das Signalsystem der Linien 1, 2 und 3 adaptiert. [23]

Die Nord-Süd Gesellschaft setzte hingegen auf ein Signalsystem basierend auf Gleisstromkreisen und Relais. Bei diesem System sind die Blockabschnitte durch Isolierstöße voneinander getrennt. Befindet sich ein Zug in einem Abschnitt, so wird der Ruhestromkreis durch den Radsatz unterbrochen und das Signal für diesen Blockabschnitt schaltet für den nachfolgenden Zug auf Rot. Bei der Einfahrt in eine Station signalisierte ein grünes Licht die Erlaubnis zur Einfahrt mit reduzierter Geschwindigkeit. Dieses erleuchtete sobald der vorherige Zug die Station verlassen hatte. Die Ausfahrt aus der Station wurde durch mehrbegriffige Farblichtsignale geregelt. Diese zeigten durch ein weißes und zwei rote Lichter die Besetzung der kommenden Blockabschnitte an. Erlischt eines der beiden roten Lichter, so signalisiert dies dem Zugführer, dass der vorangegangene Zug gerade den kommenden Blockabschnitt verlassen hat und somit ein Ausfahren aus der Station gestattet ist. Der Vorteil dieser

Signalgebung war eine Verringerung der Blockabschnittslänge. Durch die beiden roten Lichter hatte der Zugführer die Information, dass der folgende Abschnitt frei ist, das darauf folgende Signal hingegen noch „Halt“ zeigt. Bei der Übernahme durch die CMP führte man auch auf den eigenen Linien diese Art der Signalgebung ein. Das System der Gleisstromkreise der Nord-Sud-Gesellschaft wurde hingegen bereits 1932 von den CMP abgeschafft. [23]

Auch die CMP verwirklichte auf ihrem Netz ab 1921 Gleisstromkreise zur Signalschaltung. Startend mit der Linie 9, wurden bis 1942 alle Linien der CMP auf das Selbstblocksystem umgerüstet. Im Gegensatz zu Nord-Sud-Gesellschaft arbeiteten diese jedoch mit Wechselstrom und nicht mit Gleichstrom. Was das frühe Blocksystem der CMP und das System der *Nord-Sud*-Gesellschaft vereinte, war, dass die Signale grundsätzlich eine Freigabe des Blockabschnittes zeigten. Erst durch das Passieren eines Zuges wurden die Signale auf „Halt“ geschaltet. Ab 1928 wurden zusätzlich Relais zur doppelten Absicherung installiert. [23]

In der Nachkriegszeit musste das gesamte Signalsystem erneuert werden. Im Zuge dessen stellte man auf die internationale „Rot-Gelb-Grün“-Signalisierung um. Die Signalisierung einer freien Strecke erfolgte nicht mehr durch ein weißes, sondern durch ein grünes Licht. Durch die Einführung der durchgehend verschweißten Schienen kamen statt den konventionellen Gleisstromkreisen Tonfrequenzgleisstromkreise zum Einsatz.[23]

Das heutige Signalsystem der Pariser Metro arbeitet mit zweibegriffigen Lichtsignalen, die durch ein grünes und ein rotes Licht die Freigabe eines Blockabschnittes signalisieren. Vor hoch frequentierten Stationen dient ein dreibegriffiges Signal mit einem zusätzlichen gelben Licht zur Verkürzung der Zugfolgezeiten. Das Signal zeigt Gelb, sobald der vorangegangene Zug die Station gerade verlassen hat. Das Einfahren mit reduzierter Geschwindigkeit wird gestattet. An einigen Stationen findet man zu dem dreibegriffigen Signal auch noch ein vorgestelltes Signal, welches bereits ein Anfahren erlaubt, sobald die Hälfte des ersten Zuges den Bahnsteig verlassen hat. Somit gelangt der nachfolgende Zug genau dann zum Einfahrtssignal für die Station, wenn dieses auf Gelb schaltet. In unübersichtlichen Kurvenbereichen findet man zusätzlich zu den Blocksignalen noch Wiederholungssignale. Diese können jedoch nur Gelb oder Grün zeigen. Abgesehen von den speziellen Lösungen an Stationen, folgen hinten einem Zug immer zwei rote Signale. [23]

Bei der Pariser Metro findet man auch einige Rangiersignale. Bereiche, in denen diese benötigt werden, sind vollkommen frei von Blocksignalen. Dies resultierte aus einem Unfall im Jahr 1949 bei dem bei *Porte des Lilas* zwei Züge kollidierten. Der Unfall

geschah, da ein Zugführer ein Blocksignal mit einem Rangiersignal verwechselte und das Rot zeigende Blocksignal überrollte. Zusätzlich sind Rangiersignale zur besseren Unterscheidung rechteckig und horizontal statt vertikal angeordnet. [23]

Auch an Weichen und Kreuzungsweichen sind rechteckige Signale angeordnet. Dem Hauptgleis wird grundsätzlich Grün signalisiert und dem Nebengleis Gelb. Schalten die Signale um, so zeigen beide Signale für einen kurzen Moment Rot. [23]

Weiters sind Signale und Schilder für Geschwindigkeitsangaben zu finden. Diese sind immer dann zu finden, wenn auf Grund von kurzen Stationsabständen oder technischen Voraussetzungen ein Fahren der maximalen Geschwindigkeit von 70 km/h (80 km/h auf Linie 14) nicht möglich ist. Gültig sind diese bis zur nächsten Geschwindigkeitsbegrenzung oder Station. Auch Geschwindigkeitserhöhungen können möglich sein. [23]

Die Signalisierung an Endstationen, sowie die Schaltung der Weichen zum Ein- und Ausfahren der Züge wird durch einen so genannten „*Chef de Manœuvre*“ geregelt. Dieser hat sein Büro direkt an der Endstation um den Überblick zu behalten und kann mittels altmodischen Hebeln oder Drucktasten in den Betrieb eingreifen. [23]

9.4 Die Automatisierung des Zugbetriebs

Das Festblocksystem des fahrgesteuerten Betriebs mit Farblichtsignalen zählt heute zu den am meisten verbreiteten Systemen. Seiner Leistungsfähigkeit sind jedoch Grenzen gesetzt. Durch eine Verkleinerung des Blockabstandes kann eine Verringerung der Zugfolgezeiten erreicht werden. Die höchste Effizienz zeigt aktuell jedoch das System des beweglichen Blocks. Mittels einer dauerhaften Überwachung der Position, der Geschwindigkeit, sowie Brems- und Beschleunigungsverhalten des Zuges kann der Blockabstand für eine spezifische Situation festgestellt werden. Durch eine Automatisierung des Betriebs kann, mit Hilfe des beweglichen Blocks, der Abstand zwischen zwei Zügen auf ein Minimum herabgesetzt werden. Der Automatisierungsgrad (GoA – *Grade of Automation*) wird dabei in vier Stufen eingeteilt:[44]

9.4.1 GoA1 – Teilautomatischer Betrieb

Der teilautomatische Betrieb entspricht dem geringsten Grad der Automatisierung einer U-Bahn. Dem Fahrer obliegt die gesamte Handhabung der Steuerung der U-Bahn. Während der Fahrt wird die Geschwindigkeit der Bahn jedoch mittels eines Zugsicherungssystems kontinuierlich überwacht. Der Fahrer erhält zusätzlich unterstützende Informationen wie beispielsweise aktuelle Fahraufträge. [44]

9.4.2 GoA2 – Halbautomatische Zugsteuerung

Bei einer halbautomatischen Zugsteuerung löst der Fahrer die Ausfahrt des Zuges aus der Station mittels eines Knopfdrucks aus. Die Fahrt zwischen den Stationen und das Öffnen der Türen laufen, über ein computergesteuertes System, automatisch ab. Der Fahrer kontrolliert ausschließlich den Aufenthalt in der Station. [44][45]

9.4.3 GoA3 – Fahrerloser Betrieb

Der fahrerlose Betrieb erfolgt ohne menschliche Unterstützung. Die Fahrt und der Halt in den Stationen laufen automatisch ab und werden durch eine externe Zentrale (Leitstelle) überwacht, wobei für Notfälle ein Zugbeleiter anwesend ist. Dieser kann bei Bedarf in den Ablauf eingreifen und den Zug manuell bedienen. Zusätzlich benötigte Züge können per Knopfdruck in Betrieb genommen werden und somit den Takt verdichten. [44]

In den 1980er Jahren eröffneten in Lille (Frankreich) und in Kobe (Japan) die ersten Systeme mit fahrerlosem Betrieb. Die Vorteile dieses Betriebssystems liegen im personalunabhängigen Einsatz von Zügen sowie der daraus resultierenden flexiblen Anpassung an Spitzenstunden des Passagieraufkommens. Auch die Zugfolgezeiten können durch die automatisierte Zugsteuerung optimiert werden. Zugfolgezeiten von 90 Sekunden gelten heute bereits als Standard bei fahrerlosen U-Bahnen. [1][45] Seitens des Passagiers steigert die verbesserte Pünktlichkeit die Attraktivität der U-Bahn. [46]

Die Investitionskosten für einen fahrerlosen Zugbetrieb liegen deutlich höher als die des konventionellen Betriebs. Ausschlaggebend dafür ist neben dem benötigten elektronischen Equipment und zusätzlichen Sicherheitseinrichtungen auch die Gestaltung der Stationen. Die Gleise müssen gegen die Bahnsteigkanten abgesichert werden. Dies gelingt mittels Bahnsteigtüren, welche sich erst nach Stillstand des Zuges, zusammen mit den Wagentüren, öffnen. Die Bahnsteiggleise werden elektronisch überwacht. Fällt eine Person in den Gleisbereich, betritt jemand unangemeldet das Gleis oder läuft er in den Tunnel, so wird die automatische Eindringungsüberwachung aktiviert. Diese registriert den Abstand des herannahenden Zuges zu dem Hindernis und leitet eine der Situation angepasste Bremsung ein. Auch andere, sich auf der Strecke befindenden Züge, werden in den Stationen angehalten. Die Bahnsteige und Bahnsteiggleise werden darüber hinaus videoüberwacht. Im Betrieb gilt die fahrerlose U-Bahn als günstiger als das herkömmliche System. Begründet wird dies mit einer energieeffizienten Abwicklung des Betriebs und einer optimalen Anpassung an den Bedarf, eine Verringerung des Verschleißes und reduzierten Personalkosten. [44][46]

9.4.4 GoA4 – unbegleitete automatische Zugführung

Der unbegleitete Betrieb stellt den aktuell höchsten Grad der Automatisierung dar. Wie beim fahrerlosen Betrieb erfolgen der Ablauf der Fahrt und der Halt in den Stationen vollkommen automatisch. Beim unbegleiteten Betrieb entfällt jedoch zusätzlich die Kontrolle durch einen Zugbegleiter. Auch die Zusammenstellung und das Abstellen der Züge erfolgt vollkommen ohne manuellen Eingriff. [44]

9.5 ATO Betrieb bei der Pariser Metro

Die ersten Tests für einen automatischen Fahrbetrieb starteten im Jahr 1951 zusammen mit den Versuchen für die Gummireifenfahrzeuge. Auf der damaligen Teststrecke „*La Navette*“ (siehe Abschnitt 5.3.8) lief der Testbetrieb zwischen 1952 und 1956 problemlos. Für eine tatsächliche Realisierung auf einer viel befahrenen Strecke konnte das System jedoch nicht überzeugen. Erst im Jahr 1967 wurde die Linie 11, als erste Linie, zuerst testweise und bis 1969 ganzheitlich, mit dem automatischen Fahrbetrieb ausgestattet. Bis zum Jahr 1979 wurden systematisch alle Linien mit ATO (*Automatic Train Operation*) ausgestattet. Die Ausnahme bilden die Linien 10, 3bis und 7bis. [23]

Der automatische Fahrbetrieb wird mittels einer induktiven Leitung verwirklicht, die zwischen den beiden Gleisen an den Schwellen fixiert ist. Die mit Strom durchflossenen, mittels Kunststoff isolierten, Leiter sind in Mäandern verlegt. Über zwei Kollektoren, die im mittleren Wagen positioniert sind, kann das Signal an den Zug übermittelt werden. Durch dieses System, das einer Linienzugbeeinflussung entspricht, werden die Beschleunigung und das Bremsverhalten des Zuges kontrolliert. Doch auch heute wird der Betrieb bei Zugfolgezeiten unter vier Minuten händisch gehandhabt. [23]

Das Beibehalten des konventionellen Systems auf den Linien 10, 3bis und 7bis wird durch die zu großen Zugfolgezeiten begründet. Eine Umrüstung auf einen automatischen Zugbetrieb würde somit keine nennenswerten Vorteile mit sich bringen. Diese drei Linien laufen somit mit manueller Triebfahrzeugführung. Der Zug ist alleine durch den Fahrer besetzt und wird durch eine Totmanneinrichtung kontrolliert. [23]

Die aktuellste Neuerung findet man auf der Linie 5 der Pariser Metro. Diese arbeitet mit einer Führerstandssignalisierung und einem „*moving block*“. In Zukunft soll dieses System auch für die Linie 9 adaptiert werden. [48]

9.6 Zentrale Überwachungsstelle - *Poste de Comman de Centralisée* (PCC)

Die Zugfolgezeiten haben sich über die Jahrzehnte stark reduziert, womit die Anzahl der Züge erhöht werden konnte. In Folge dessen stiegen auch die Verspätungen deutlich an. Bei Betriebsstörungen regelten Mitarbeiter der betroffenen Linie eigenständig die Behebung der Probleme. Zu Spitzenzeiten führte dies zu einer Verspätung der Züge der Linie 1 von bis zu 22 Minuten. Die Einführung der zentralen Fahrdienststelle ermöglichte ein Zusammenwirken aller Linien. Bei Betriebsstörungen können Informationen an die Passagiere, wie auch die Zugführer weitergeleitet werden. Auf einer großen Wand werden alle Linien und die darauf verkehrenden Züge dargestellt. Dies ermöglicht den Mitarbeitern sich einen Überblick über die bestehende Situation zu verschaffen. Wird es notwendig, so kann auch die Stromversorgung der Abschnitte von Linien beeinflusst werden. Die Zentrale befindet sich bei *Boulevard Bourdon* und besteht aus zwei runden Räumen. Über diese werden bis auf die Linie 14 alle verkehrenden Züge überwacht. Die Linie 14 wird über eine eigene Zentrale bei *Bercy* kontrolliert. [23]

10 Abfertigung der Fahrgäste

Auch die Abfertigung der Fahrgäste kann den Betrieb einer Metro schwerwiegend beeinflussen. Durch sie steht und fällt der gewünschte kurze Aufenthalt in Stationen sowie die Anzahl des benötigten Personals.

Um den Ein- und Ausstiegsvorgang möglichst effektiv abzuwickeln, wird ein Ankommen der Passagiere an mehreren Stellen ermöglicht. Somit wird erreicht, dass sich die Personen gleichmäßig über den Bahnsteig verteilen. Beim Aussteigen werden die Passagiere möglichst direkt zu ihren Umsteigerelationen oder den entsprechenden Ausgängen geleitet. Das Ausweisen der Wege hat dabei eine besonders große Bedeutung. Je schneller der gewünschte Weg erkannt wird, umso zügiger erfolgt die Abwicklung der Fahrgäste.

Der Zugang zu den Stationen wird bei den meisten U-Bahnen über ein Ticketsystem geregelt. In den Anfängen der Metros, erhielt man Zugang zu den Stationen durch das Einwerfen einer Münze. In der U-Bahn in New York erfüllte diese Zugangsregelung für lange Zeit gute Dienste. Der Nachteil lag in der Bindung des Preises an den Wert einer Münze. Dies führte zur Umstellung auf Ticketsysteme. Ob der Vorgang beim Zugang zu Stationen von Personal kontrolliert wird, ist von Stadt zu Stadt unterschiedlich. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass eine Reduktion von Personal oft keinen Vorteil mit sich bringt. Gerade in Paris hat man erlebt, dass die Kriminalität und der Vandalismus durch diesen Entschluss stark angestiegen sind [1]. Bei vielen U-Bahnen geht man deshalb mittlerweile den Schritt das Personal an Stationen und in Zügen wieder zu erhöhen um präventiv gegen Vandalismus und Kriminalität vorzugehen. Auch der Einsatz von Videokameras wird immer stärker forciert. In einigen U-Bahnen wird die Gültigkeit eines Tickets nicht durch Zugangssperren an den Zugängen geregelt, sondern die Kontrolle erfolgt durch Bahnpersonal in den Zügen. Wird bei einer Kontrolle festgestellt, dass kein Fahrschein vorhanden ist, so wird dies mit Geldstrafen geahndet. Auch das Verlassen einer Station ist bei einigen Netzen nur mit einem gültigen Ticket möglich. Neben dem positiven Effekt der doppelten Kontrolle können dadurch Daten bezüglich des Wegeverhaltens der Passagiere dokumentiert werden.

Eine der größten Neuerungen der letzten Jahre im Bahnsteigbereich stellen Bahnsteigtüren dar. Durch die räumliche Trennung des Gleisbereichs vom Bahnsteig kann die Sicherheit der Passagiere deutlich erhöht werden. Sowohl ein unabsichtliches, als auch ein absichtliches Betreten der Gleise wird somit verhindert. Die Warteraumfläche kann, durch den Wegfall der Gefahren durch einen vorbeifahrenden Zug, maximal genutzt werden. Bei räumlich vollkommen abgeschlossenen Systemen kann der

Wartebereich zusätzlich klimatisiert werden. Diese Tatsache hat nicht nur einen positiven Einfluss auf das Wohlbefinden der Passagiere, sondern senkt auch den Energiebedarf. Somit ergeben sich für die Investition von Bahnsteigtüren Amortisationszeiten von nur wenigen Jahren. Weiters werden der störende Luftzug sowie die Staubbelastung und die Lärmbelästigung deutlich verbessert. Das Resultat ist eine Steigerung des Komforts für die Fahrgäste im Wartebereich. Neben der verbesserten Situation für die Passagiere, bieten Bahnsteigtüren auch noch deutliche Vorteile für den Zugbetrieb. Die Züge können mit einer höheren Geschwindigkeit ein- bzw. ausfahren, wodurch die Leistungsfähigkeit der U-Bahn maximal genutzt werden kann. [47]

11 Die Zukunft der U-Bahn

11.1 Entwicklungspotential der U-Bahn

Abschließend stellt sich die Frage nach dem Zukunftspotential des Systems U-Bahn. Der Bereich des öffentlichen Verkehrs nimmt in Städten eine immer größere Rolle ein. Angesichts der steigenden Bevölkerungszahlen sowie der generellen Landflucht wird in Zukunft vor allem eine Steigerung der Leistungsfähigkeit von bestehenden U-Bahnen zum zentralen Thema. In diesem Kapitel soll auf Grund dessen hinterfragt werden, ob die U-Bahn auch in den kommenden Jahrzehnten noch anpassungsfähig sein wird und ausreichend Potential bietet, um die immer größer werdenden Verkehrsströme abzuwickeln.

11.1.1 Leistungsfähigkeit

Die Weltbevölkerung wächst stetig und im Zuge dessen wird vor allem der Trend der steigenden Urbanisierung die kommenden Jahrzehnte prägen. Eine immer wichtigere Rolle nimmt dabei die Frage nach Mobilität ein. Mobilität ist für den Menschen besonders ausschlaggebend, da sie eine Voraussetzung für ein soziales Leben darstellt sowie unentbehrlich für die wirtschaftliche Kraft eines Landes ist. Gerade die heutigen Bevölkerungszahlen legen nahe, dass der öffentliche Verkehr eine unabdingbare Maßnahme zum Erhalt der Mobilität darstellt. Im Jahr 2011 lebten weltweit bereits über 52% [48] der Weltbevölkerung im urbanen Bereich. Laut Schätzungen soll sich diese Zahl bis zum Jahr 2050 auf 69% [49] erhöhen. Die Zahl der Millionenstädte lag 2010 bereits bei 449 [48]. Diese Daten machen deutlich wie stark auch die Verkehrsströme innerhalb einer Stadt in Zukunft ansteigen werden, wodurch die Frage nach der Abwicklung dieses Verkehrs aufkommt.

Diese Masterarbeit zeigt in den vorangegangenen Kapiteln deutlich auf, welche bedeutende Rolle die Einführung der U-Bahn im vergangenen Jahrhundert einnahm. Die daraus resultierende drastische Steigerung der Leistungsfähigkeit im öffentlichen Verkehr führte zu einer vollkommen veränderten Städtestruktur. Ferner wurde das enorme Wachstum von Ballungsräumen, unter anderem durch die Möglichkeit mit der U-Bahn größere Distanzen zu überwinden, eingeleitet. Die Frage die sich nun stellt ist, wie anpassungsfähig die Metro in Bezug auf die stetig steigenden Bevölkerungszahlen sein wird. Mit welchen technischen Neuerungen kann die Leistungsfähigkeit bestehender U-Bahnnetze noch erhöht werden? Eine Betrachtung der auf die Kapazität und in Folge

dessen auf die Leistungsfähigkeit wirkenden Faktoren und deren Beeinflussbarkeit lässt Trends abschätzen.

11.1.1.1 Kapazitätssteigerung durch Adaption der Fahrzeuge

Einen ganz offensichtlichen Einfluss auf die Kapazität einer U-Bahn hat die Ausführung der Fahrzeuge. Dabei ist nicht nur die tatsächliche Größe der Wagen, sondern auch die Gestaltung des inneren Raumes ausschlaggebend. Wie bereits in Kapitel 7 behandelt wurde, hängt die Anzahl und Anordnung von Sitzgelegenheiten stark von den zu befördernden Passagierzahlen ab. Die Möglichkeit einer Erhöhung der Passagierzahlen pro Wagen ist somit zwar gegeben, hat allerdings einen tatsächlich nur geringen Einfluss auf eine Kapazitätssteigerung von bestehenden Wagen, da dieser Faktor weitestgehend ausgereizt ist. Bei bereits bestehenden U-Bahnen ist somit die einzige Option zur Erhöhung der Passagierzahlen eine tatsächliche Vergrößerung der Fahrzeuge. Auf Grund der vorwiegenden Tunnellage von Metros ist eine Erweiterung des Querschnittes nicht nur mit enormen Kosten verbunden, sondern stellt vor allem an Kreuzungspunkten mehrerer Linien ein großes Problem dar. Bei sehr dichten Netzen würden die Kosten einer solchen Adaption ins Unermessliche steigen. Eine weitere Möglichkeit bietet die Verlängerung von Zügen. Diese wäre technisch und finanziell gesehen wohl die einfachste Möglichkeit. Das Anhängen weiterer Wagen würde fahrzeugseitig eine, technisch ohne Zweifel machbare, Erhöhung der Zugkraft bedingen. Seitens der Infrastruktur würden daraus eine höhere Belastung des Fahrweges sowie die Notwendigkeit der Verlängerung der Bahnsteigkanten resultieren, was wiederum bei unterirdischen Stationen problematisch ist.

11.1.1.2 Steigerung der Leistungsfähigkeit durch Erhöhung der Reisegeschwindigkeit

Eine Erhöhung der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit würde die Leistungsfähigkeit einer U-Bahn erhöhen. Einfluss auf die Reisegeschwindigkeit haben Faktoren wie das Beschleunigungs- und Bremsvermögen, die maximale Geschwindigkeit, der Haltestellenabstand und die Dauer der Stationsaufenthalte. Betrachtet man diese Faktoren getrennt voneinander, so erkennt man schnell, dass die Möglichkeiten zur Steigerung der Leistungsfähigkeit beschränkt sind.

Das Beschleunigungs- und Bremsvermögen kann nicht endlos erhöht werden, da dies den Fahrkomfort negativ beeinflussen würde. Betrachtet man den Einfluss auf das Sicherungssystem, so kann durch ein erhöhtes Bremsvermögen zwar der Blockabstand verringert werden, jedoch muss auch hier der Effekt auf die Insassen bedacht werden. Neben dem Sinken des Fahrkomforts ist auch der zusätzliche Verschleiß ein nicht zu vernachlässigender Faktor.

Die technischen Möglichkeiten um die maximale Geschwindigkeit zu erhöhen sind ohne weiteres gegeben. Aus einer Erhöhung der Geschwindigkeit resultiert allerdings eine Vergrößerung des Blockabstandes. Somit existiert ein Optimum zwischen der Erhöhung der Leistungsfähigkeit aus einer Geschwindigkeitssteigerung und einem Verlust der Selben aus dem daraus entstehenden vergrößerten Bremsabstand. Geht man rein vom Durchsatz an einem einzelnen Querschnitt aus und lässt alle übrigen Faktoren außer Acht, so würde sich überschlägig eine optimale Geschwindigkeit von rund 30 km/h ergeben. Bei dieser Abschätzung bleiben der Stationsaufenthalt, der Stationsabstand sowie die Fahrzeit jedoch unbedacht. Eine wahllose Erhöhung der maximalen Geschwindigkeit hätte somit kaum die gewünschte Steigerung der Leistungsfähigkeit zur Folge, da eine höhere Geschwindigkeit auf Grund des oft sehr kurzen Stationsabstandes nur selten umzusetzen ist.

Der Haltestellenabstand ist ein einschlägiges Kriterium für die Leistungsfähigkeit von U-Bahnnetzen, da ein größerer Haltestellenabstand die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit erhöht. Die Wahl des Haltestellenabstandes ist jedoch nicht vollkommen frei wählbar. Dies begründet sich neben den geometrischen Bedingungen auch durch den Einfluss auf die Attraktivität eines Systems. Auf Grund dessen bietet auch dieser Faktor nur kaum Potential zur Optimierung. Eine Zwischenlösung dieser Problematik liefert zum Beispiel die New Yorker Subway. Wie in Abschnitt 3.2.3 betrachtet, wurden dort Expresszüge geschaffen, welche nicht in jeder Station halten und somit eine höhere durchschnittliche Reisegeschwindigkeit erreichen. Voraussetzung dafür ist die Bereitstellung einer entsprechenden Infrastruktur.

Die Dauer der Stationsaufenthalte ist ein Thema, das gerade in den letzten Jahren an Aufmerksamkeit gewonnen hat. In einigen Städten, wie in Paris und Moskau, ist die Dauer der Stationsaufenthalte auf ein Minimum beschränkt. Nach Ablauf der vorgegebenen Zeit schließen die Wagentüren automatisch, unabhängig von der Anzahl der Personen, die noch einsteigen möchten. Das Resultat ist eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit. Das einzige Potential zur Verkürzung des Stationsaufenthaltes bietet eine Optimierung des Fahrgastwechsels.

11.1.1.3 Steigerung der Leistungsfähigkeit durch Verringerung der Zugfolgezeiten

Die Zugfolgezeit stellt einen ganz bedeutenden Faktor für die Leistungsfähigkeit dar. Je knapper zwei Züge hintereinander fahren können, umso größer ist diese. Bei modernen, automatisierten U-Bahnnetzen ist eine Zugfolgezeit von 85 bis 90 Sekunden aktuell umsetzbar. Die Entwicklung des beweglichen Blocks macht diesen knappen Takt möglich. Wie kann jedoch eine weitere Verringerung der Zugfolgezeit in Zukunft erreicht werden?

An Hand des Beispiels der Linie 14 der Pariser Metro soll im Folgenden das bestehende Potenzial einer Steigerung der Leistungsfähigkeit durch die Verringerung der Zugfolgezeiten veranschaulicht werden.

Beispiel Zugfolgezeit Metro Paris (Linie 14):

Auf der Linie 14 der Pariser Metro verkehren Fahrzeuge der Wagenklasse MP89CA. Wie in Kapitel 7 erläutert wurde, weisen diese Fahrzeuge eine Beschleunigung bzw. Verzögerung von $1,3 \text{ m/s}^2$ auf. Bei einer Notbremsung kann dieser Faktor auf bis zu $2,5 \text{ m/s}^2$ gesteigert werden. Die Züge sind $90,280 \text{ m}$ lang und erreichen eine maximale Geschwindigkeit von 80 km/h . In diesem Beispiel soll die theoretische minimale Zugfolgezeit zwischen zwei aufeinander folgenden Zügen berechnet werden. Nicht einkalkuliert werden dabei Sicherheitsabstände bzw. eine verzögerte Ansprechzeit des Zugleitsystems.

Als kritischer Punkt wird das Aufeinanderfolgen von zwei Zügen in einer Station betrachtet. Durch das Anhalten des ersten Zuges, findet man in diesem Moment die größte benötigte Zeitlücke zwischen zwei Zügen. In der Realität würde der nachfolgende Zug, bereits bevor der Bremsvorgang eingeleitet wird, eine so genannte „Auslaufphase“ einleiten. Dadurch wird die Geschwindigkeit bereits vor der Bremsphase unter 80 km/h fallen. Da die Dauer dieser Auslaufphase jedoch frei wählbar ist, wird auch diese in der Berechnung nicht bedacht.

$$t_{\text{Betriebsbremsung}} = \frac{v}{a} = \frac{80 \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right]}{1,3 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]} = 17,1 \text{ [s]}$$

Aus dem Zusammenhang $t = \frac{v}{a}$ ergibt sich die Zeit für eine Betriebsbremsung bei $a = 1,3 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$ mit $17,1$ Sekunden.

Annahme 1: Nach dem Bremsvorgang von Zug A folgt ein Aufenthalt in der Station von $t_A = 30 \text{ [s]}$. Nach dieser Zeit beschleunigt Zug A mit $a = 1,3 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$ wieder auf die gewünschte maximale Geschwindigkeit von $80 \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right]$. Die kürzeste Zugfolgezeit ergibt sich dann, wenn der Bremsvorgang genau so eingeleitet wird, dass der nachfolgende Zug B den Zug A gerade nicht berührt. Würde man den Bremsvorgang so berechnen, dass die Spitze des Zuges B am Bahnsteig zu stehen kommt, wenn das Heck von Zug A gerade die Station verlassen hat, dann wäre diese Annahme falsch. Die Begründung liegt in der nicht linearen Brems- bzw. Beschleunigungskurve. Somit würde es bereits vor diesem Zeitpunkt zu einer Kollision kommen. Da die Beschleunigung und der Wert der Verzögerung ident

sind, findet sich der Berührungspunkt der beiden Kurven genau in der Hälfte der Zuglänge nach $\frac{l_{\text{Zug}}}{2} = \frac{90,280}{2} = 45,14 \text{ [m]}$. Aus dieser Erkenntnis resultiert die Zeit, die für das Zurücklegen dieses Weges benötigt wird.

$$45,14 = \frac{1,3 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * t^2}{2}$$

$$\rightarrow t = 8,33 \text{ [s]}$$

Die Geschwindigkeit zu diesem Zeitpunkt ergibt sich zu:

$$v_{A=B} = 8,33 * 1,3 = 10,83 \text{ [m/s]} = 38,99 \text{ [km/h]}$$

Die Zeitlücke zwischen Zug A und Zug B errechnet sich folge dessen zu:

$$t_{\text{Lücke}} = 30 \text{ [s]} + 2 * 8,33 \text{ [s]} = 46,66 \text{ [s]}$$

Annahme 2: Geht man nun davon aus, dass Zug A die Station nicht planmäßig verlassen kann, so muss die verbleibende Zeit noch groß genug sein, damit Zug B rechtzeitig zum Stillstand kommt. Sind die 30 Sekunden für den Haltevorgang in der Station abgelaufen, so befindet sich der nachfolgende Zug bereits im Bremsvorgang. Seine Geschwindigkeit zu diesem Zeitpunkt ergibt sich aus:

$$46,66 - 17,1 = 29,56 \text{ [s]}$$

$$30 - 29,56 = 0,44 \text{ [s]}$$

$$t_x = \frac{v_1 - v_2}{a} \rightarrow v_2 = v_1 - t_x * a$$

$$v_2 = 80 \text{ [km/h]} - 0,44 \text{ [s]} * 1,3 \text{ [m/s}^2\text{]} = 21,65 \text{ [m/s]} = 77,94 \text{ [km/h]}$$

Sollte, wie in diesem Beispiel angenommen, der erste Zug nicht aus der Station wieder ausfahren können (zum Beispiel aus technischen Problemen), so würde bei dem nachkommenden Zug bei $v = 77,94 \text{ [km/h]}$ eine Notbremsung eingeleitet werden. Diese erfolgt mit $a = 2,5 \text{ [m/s}^2\text{]}$. Die Zeit, die Zug B somit bis zum Stillstand benötigt ergibt sich zu:

$$t_{\text{Notbremsung}} = \frac{v}{a} = \frac{77,94 \text{ [km/h]}}{2,5 \text{ [m/s}^2\text{]}} = 8,66 \text{ [s]}$$

Für diese Notbremsung benötigt Zug B einen Bremsweg von:

$$s_{\text{Notbremsung}} = \frac{v^2}{2 * a} = \frac{21,65^2}{2 * 2,5} = 93,74 \text{ [m]}$$

Somit ergibt sich der Abstand der beiden Fahrzeuge zueinander, nach Abschluss der Notbremsung, zu:

$$s_{\text{Betriebsbremsung}} = \frac{22,22^2}{2 * 1,3} = 189,93 \text{ [m]}$$

$$s = 90,280 + (22,22 * 0,44 + \frac{1,3 * 0,44^2}{2}) + \frac{2,5 * 8,66^2}{2} = 193,67 \text{ [m]}$$

$$s_{\text{Abstand}} = 189,93 - 193,67 = -3,74 \text{ [m]}$$

Dieses Ergebnis zeigt, dass bei einer Zugfolgezeit von 46,66 Sekunden ein rechtzeitiges Anhalten in Folge einer Notbremsung nicht mehr möglich wäre, falls Zug A die Station nicht planmäßig verlassen kann. Nach einer entsprechenden Iteration ergibt sich eine minimale Zugfolgezeit von 47 Sekunden. Dieser Wert ist jedoch als theoretisch zu betrachten, da sich unter den getroffenen Annahmen die Züge ohne Sicherheitsabstand gerade nicht berühren. Zusätzlich zu beachten wäre ein Sicherheitsabstand zwischen Zug A und Zug B, eine Reaktionszeit für das System, sowie ein Puffer für die Aufenthaltszeit in der Station. Die Erkenntnis aus dieser Berechnung ist, dass eine Verringerung der aktuellen Zugfolgezeiten von 85 bis 95 Sekunden nur in einem geringen Ausmaß möglich wäre. Eine überschlägige Betrachtung macht dies deutlich (Werte basieren auf Annahmen):

Theoretische Zugfolgezeit = 47 Sekunden

Sicherheitszuschlag für den Aufenthalt in der Station = 30 Sekunden

Reaktionszeit des Zugleitsystems = 3 Sekunden

Sicherheitszuschlag für Distanz zwischen zwei Zügen = 5 Sekunden

$$\sum = 47 + 30 + 3 + 5 = 85 \text{ Sekunden}$$

Eine grafische Aufbereitung des Ergebnisses ist in Abbildung 72 zu finden.

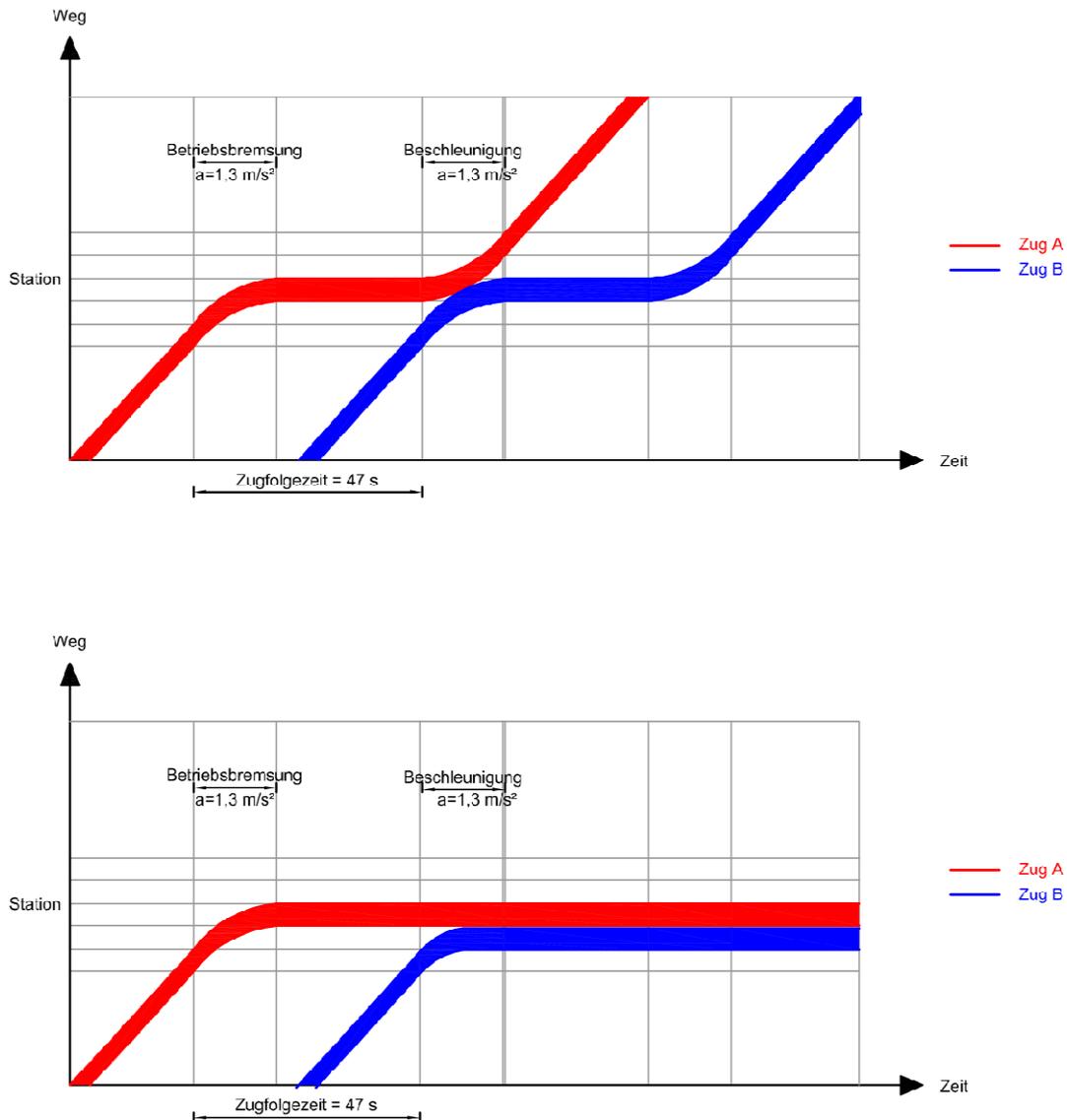


Abbildung 72: Theoretische Mindestzugfolgezeit Metro Paris

11.1.1.4 Erhöhung der Leistungsfähigkeit durch Infrastrukturausbau

Eine weitere Option zur Steigerung der Leistungsfähigkeit bei bestehenden Linien stellt die Erweiterung der Infrastruktur dar und somit die Schaffung zusätzlicher Gleise bzw. Haltestellen für eine Linie. Das Problem, das hierbei meist auftritt, ist ein Platzproblem nicht nur in vertikaler, sondern auch in horizontaler Richtung (vorrangig im Stationsbereich). Bei Neuplanungen wird es daher in Zukunft von immer größerem Interesse sein, schon im Vorhinein eine mögliche Erweiterung des Netzes in Betracht zu ziehen.

Betrachtet man nicht nur die Leistungsfähigkeit einer Linie, sondern die des gesamten Netzes, so bietet sich bei bestehenden U-Bahnen die Möglichkeit neue Linien hinzuzufügen. Bei sehr dicht vermaschten U-Bahnen, wie der in Paris, muss eine Erweiterung zwangsläufig durch einen Ausbau in die Tiefe erfolgen. Ein zusätzlicher positiver Effekt könnte durch eine möglichst effiziente Anpassung dieser Linien an die bestehenden Verkehrsströme erreicht werden. So könnte man den Haltestellenabstand und in Folge dessen die Reisegeschwindigkeit dieser Linien erhöhen, da eine flächenmäßige Abdeckung bereits durch das Bestandsnetz erfolgt (ähnlich den Expresslinien der U-Bahn in New York – siehe Abschnitt 3.2.3). Breits heute wird eine solche Erweiterung des Netzes bei der U-Bahn in London realisiert. Durch Expresslinien, die unter dem bestehenden Netz angeordnet werden, soll die Leistungsfähigkeit des Systems verbessert werden.

11.1.2 Sicherheit

Legt man sein Augenmerk auf Berichte über die Sicherheitsproblematik von U-Bahnen, so wird schnell deutlich, dass heutzutage die meisten Unfälle durch ins Gleis gefallene Personen verursacht werden. Aktuell sind im Zuge der Automatisierung von U-Bahnen klare Verbesserungen auf diesem Sektor zu erkennen. Für Neubauten von U-Bahnen gelten Bahnsteigtüren und Bahnsteiggleissicherungsanlagen als Stand der Technik. Zusätzlich kommt meist eine flächendeckende Videoüberwachung der Bahnsteige sowie zusätzliches Sicherheitspersonal zum Einsatz. Die Entwicklung geht immer mehr zur lückenlosen Überwachung.

11.1.3 Instandhaltung

Die Instandhaltung bei U-Bahnen wird zu einem immer größeren Thema. Anlass dafür ist der oft gewünschte durchgehende Betrieb auch während den Nachtstunden. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Stadt Wien. Im Jahr 2010 entschied sich die Bevölkerung für eine Umsetzung des Nachtbetriebes der Wiener U-Bahn an Wochenenden. Der Wegfall aller Nachtstunden (auch von Montag bis Freitag) würde für den Betreiber ein Problem darstellen, da sämtliche Instandhaltungsarbeiten während der Nacht abgewickelt werden. Eine Instandhaltung im laufenden Betrieb ist undenkbar.

11.1.4 Kosten

Legt man ein Augenmerk auf die Wirtschaftlichkeit sowie die Kosten einer U-Bahn, so wird deutlich, dass sich eine Metro unter den derzeitigen Randbedingungen (keine Anrechnung externer Kosten) kaum eigenständig finanzieren kann. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass die Einnahmen generell unter den Kosten liegen. Somit wird deutlich,

dass der Bau und Betrieb einer U-Bahn in einer öffentlichen Hand liegen muss. Somit sind die Kosten für eine U-Bahn, wie in jedem von öffentlicher Hand finanzierten Projekt, immer ein ganz besonderes Thema. Die hohen Kosten des öffentlichen Verkehrs müssen allerdings in Verbindung mit dem volkswirtschaftlichen Nutzen gesehen werden. So ist, neben dem in Kapitel 4 behandelten niedrigen Energiebedarf einer Metro im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern, auch das niedrigere Unfallrisiko beim Benützen eines schienengebundenen öffentlichen Verkehrsmittels ein bedeutender Faktor. In Europa geht man davon aus, dass die Metro um das 20- bis 25-fache sicherer ist als das Auto. Der daraus resultierende volkswirtschaftliche Nutzen darf nicht außer Acht gelassen werden. Die aktuelle Entwicklung des automatisierten U-Bahnbetriebes begünstigt diese Faktoren zusätzlich. Der Energieverbrauch und die Sicherheit können dadurch optimiert werden. Wird die Kostenwahrheit im Verkehr realisiert, hat die U-Bahn somit enormes Potenzial.

11.2 Schlussfolgerung

Seit den 1950er Jahren hat sich die Anzahl von U-Bahnen von 17 auf 184 [4] erhöht. Diese Zahlen zeigen deutlich das wachsende Interesse und Potential am Neubau einer U-Bahn. Für die Überlegungen zum Bau einer Metro sind neben der Bevölkerungszahl noch weitere Faktoren ausschlaggebend. Ebenso wichtig ist zum Beispiel die Bevölkerungsdichte einer Stadt. Je höher diese ist, umso wirtschaftlicher kann eine U-Bahn betrieben werden. Die Begründung hierfür liegt in der Personenzahl, die das Metronetz pro Streckenkilometer auch tatsächlich nutzen kann. Weiters hat der Kfz-Bestand einen großen Einfluss auf die Nutzung des öffentlichen Verkehrs. Dabei darf auch nicht außer Acht gelassen werden, wie stark der Individualverkehr in einer Stadt forciert wird. Die politische Handhabung und die entsprechende Förderung des Modal Split gehen somit Hand in Hand mit einer erfolgreichen Verlegung des Individualverkehrs auf den öffentlichen Verkehr. Um eine U-Bahn attraktiv zu gestalten, sind sowohl die Ausdehnung des Netzes, wie auch die Beförderungsqualität von großer Bedeutung. Die Metro muss für die Bevölkerung effizient und komfortabel nutzbar sein, ansonsten fällt die Verkehrsmittelwahl vorrangig auf den privaten Pkw.

Betrachtet man die ökologischen Faktoren einer Metro, so erkennt man, dass kaum ein anderes Verkehrsmittel ähnliche Vorteile bietet. Der Platzverbrauch stellt, vor allem bei Metros, die unterirdisch verlaufen, ein absolutes Minimum dar. Die große Stärke der U-Bahn liegt klar in der elektrischen Traktion. Während ein Stadtbus Treibstoff zur Energiegewinnung einsetzt, kann zur Stromerzeugung einer Metro jede beliebige Energiequelle verwendet werden. Ein Gegenargument würde die Nutzung von Oberleitungsbussen darstellen. Betrachtet man jedoch Millionenstädte wie zum Beispiel New

York, so wird schnell deutlich, dass die Passagierzahlen eines so großen Netzes nicht mehr über ein Bussystem gehandhabt werden können. Auch in Bezug auf Beförderungsgeschwindigkeit steht die U-Bahn außer Konkurrenz im Vergleich zu anderen öffentlichen Verkehrsmitteln in Ballungsräumen.

Auch die Handhabung der Stadtentwicklung ist im Wandel begriffen. Auf Grund der steigenden Bevölkerungszahlen sowie dem Wunsch nach ökologisch und ökonomisch möglichst sinnvoll nutzbaren Stadtstrukturen, geht die Entwicklung in die Richtung einer deutlich besseren Vorausplanung. Dies wird vor allem sichtbar, wenn man Städteprojekte wie Masdar City in den Vereinigten Arabischen Emiraten betrachtet. Bei diesem Projekt zeigt sich, dass eine effiziente städtebauliche Struktur, in Kombination mit Bahnsystemen, aktuell eine gute Möglichkeit bietet, um Verkehr auf einer ökologisch sinnvollen Ebene anzubieten.

Als stärkste Konkurrenz zur U-Bahn wird heute die Straßen- oder Stadtbahn gesehen. Beide Systeme stellen sich als deutlich günstiger in der Anschaffung dar. Die Stadtbahn bedient zusätzlich auch die peripheren Stadtgebiete. Ohne Zweifel sind diese Systeme für einige Ballungsräume der sinnvollste Weg. Geht man hingegen von den Bevölkerungsentwicklungszahlen für das Jahr 2025 aus, so wird die Zahl der Millionenstädte auf 668 [48] gestiegen sein und allein die Anzahl der Städte mit mehr als fünf Millionen Einwohnern bei 96 [48] liegen. Die benötigte Leistungsfähigkeit des Verkehrssystems und die Reisegeschwindigkeit in solchen Millionenstädten werden ohne ein abgetrenntes Verkehrssystem kaum zu handhaben sein.

Die neusten Entwicklungen von U-Bahnen, wie zum Beispiel der fahrerlose Betrieb, zeigen, dass bei Metros das Potential zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Optimierung des Systems noch nicht ausgereizt ist. Durch eine Verringerung der Zugfolgezeit kann auch bei einem bestehenden Netz noch eine deutliche Steigerung der Leistungsfähigkeit erreicht werden.

Aktuelle Innovationen wie das „*Personal Rapid Transit*“-System könnten eine sinnvolle Ergänzung zur U-Bahn darstellen, ob es hingegen als Ersatz dienen kann sei dahingestellt. Bei dieser Art von persönlichem Nahverkehr handelt es sich um ein Netz, auf dem einzelne fahrerlose Kabinen eine Gruppe von maximal sechs Personen, zwischen festgelegten Stationen transportieren können. Die Wagen gliedern sich auf so genannten Schleifen ein. Über diese kann das Fahrzeug dann an den frei wählbaren Zielort gelangen und gliedert sich dort wieder aus der Schleife aus, um ein störungsfreies Ein- und Aussteigen zu garantieren. Dabei kann der reibungslose Betrieb der restlichen Fahrzeuge aufrechterhalten bleiben. [50] Die Leistungsfähigkeit einer U-Bahn kann jedoch mit

einzelnen Kabinen nicht erreicht werden. Zusätzlich ist das Netz nur schwer in bestehende Städte zu integrieren.

Betrachtet man nun all diese Komponenten, dann stellt sich die U-Bahn als eine Verkehrslösung dar, die kaum in Konkurrenz zu anderen Verkehrsmitteln steht. Im innerstädtischen Bereich ist die Metro als Massenverkehrsmittel ideal und ist durch die elektrische Traktion vollkommen unabhängig von energiepolitischen Entscheidungen. Diese Tatsachen lassen vermuten, dass die Metro im 21. Jahrhundert noch an Bedeutung gewinnen wird. Sowohl die Erweiterung von bestehenden U-Bahnnetzten als auch der Neubau werden eine tragende Rolle in der zukünftigen Stadtentwicklung einnehmen.

Literaturverzeichnis

- [1] Garbutt, P. (1997) *World Metro Systems*, second edition, Capital Transport Publishing, Singapore
- [2] Schleife, H.-W. (1992) *Metros der Welt*, 2. bearbeitete und ergänzte Auflage, transpress, Berlin
- [3] Transport for London (2012) abgerufen am 22.02.2012 von <http://www.tfl.gov.uk>
- [4] Metrobits (2012) abgerufen am 22.02.2012 von <http://mic-ro.com/metro/>
- [5] Fiedler, J., Scherz, W. (2012) *Bahnwesen - Planung, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, S-, U-, Stadt- und Straßenbahnen*, 6. Auflage, Werner Verlag, Deutschland, Frankfurt am Main
- [6] Handbuch zur Projektgestaltung (2012) abgerufen am 22.02.2012 von <http://www.ivv-aachen.de/psv/html/psv19.htm>
- [7] Vuchic, V. R. (2007) *Urban Transit - Systems and Technology*, JohnWoley&Sons, New Jersey
- [8] Bennett, D. (2005) *Metro - Die Geschichte der Untergrundbahn*, 1. Auflage, transpress, Stuttgart
- [9] Digitalisierung des Polytechnischen Journals (2012) abgerufen am 23.02.2012 von <http://dingler.culture.hu-berlin.de/article/pj014/ar014078>
- [10] The Brunel Museum (2012) abgerufen am 23.02.2012 von <http://www.brunel-museum.org.uk/>
- [11] SPT (2012) abgerufen am 23.02.2012 von <http://www.spt.co.uk/subway>
- [12] Hinkel, W. j., Treiber, K., Valenta, G., Liebsch, H. (2004) *U-Bahnen gestern-heute-morgen von 1863 bis 2012*, Schmid Verlag, Wien
- [13] Metro4 (2012) abgerufen am 05.10.2012 von www.metro4.hu
- [14] Moskau abgerufen am 16.10.2012 von www.moscow.me.uk/de_metro_history.html
- [15] Moskau Metro (2012) abgerufen am 16.10.2012 von mosmetro.ru/html/

- [16] Zimmermann, H., Henke, K.-D., Broer, M. (2011) *Finanzwissenschaft*, 10. Auflage, Verlag Vahlen, München
- [17] Energy Conservation and Emission Reduction Strategies (2012) abgerufen am 22.10.2012 von www.vtpi.org/tdm/tdm59.htm
- [18] wienerlinien (2012) abgerufen am 01.08.2012 von <http://www.wienerlinien.at/>
- [19] France (2012) abgerufen am 07.08.2012 von Frankreichs offizielle Seite: <http://www.france.fr/>
- [20] Groneck, C. (2006) *Metros in Frankreich*, Vol. 3, Robert Schwandl Verlag, Berlin
- [21] RATP (2012) abgerufen am 07.08.2012 von www.ratp.fr/
- [22] Urbanrail (2012) abgerufen am 09.08.2012 von <http://www.urbanrail.net/>
- [23] Hardy, B. (1999) *Paris Metro Handbook*, Third edition, Capital Transport Publishing, Middlesex
- [24] stif.info (2012) abgerufen am 25.10.2012 von www.stif.info
- [25] Tramway (2009) abgerufen am 08.08.2012 von www.tramway.at
- [26] Siemens (2012) abgerufen am 08.08.2012 von http://www.siemens.com/innovation/de/news/2012/inno_1208_1.htm
- [27] Carto Metro abgerufen am 09.08.2012 von <http://carto.metro.free.fr/metro-paris/>
- [28] Spiegel online (2006) abgerufen am 09.10.2012 von www.spiegel.de/reise/staedte/strassenbahn-comeback-in-paris-vive-la-tram-a-454054.html
- [29] Prolongement du tram (2012) abgerufen am 09.10.2012 von www.tramway.paris.fr
- [30] Eber, W. (2009) Bauprozessmanagement LB - Bauverfahren - Tunnelbau, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, Technische Universität München, München

- [31] Tunnelbau - Sprengvortrieb, Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Zenrum Geotechnik
- [32] Liebherr, (2009) Spezialgeräte für den Tunnelbau, Deutschland
- [33] Schubert, W. (1997) *Grundlagen der NATM*, Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität Graz, Graz
- [34] Zeno abgerufen am 04.10.2012 von <http://www.zeno.org/Meyers-1905/B/Tunnel>
- [35] Railway Technical Web Pages (2012) abgerufen am 27.08.2012 von <http://www.railway-technical.com>
- [36] UITP-Umfrage, (2012)Wiener Linien
- [37] Sleepycity abgerufen am 15.09.2012 von <http://sleepycity.net/posts/252/Demolition-of-the-Paris-Metro>
- [38] Berliner Untergrundbahn abgerufen am 23.09.2012 von <http://www.berliner-untergrundbahn.de/>
- [39] Alstrom (2012) abgerufen am 02.10.2012 von <http://www.alstom.com/>
- [40] Münchner Verkehrs- und Tarifverbund (2012) abgerufen am 31.10.2012 von www.mvv-muenchen.de
- [41] Guriec, D. (RATP) nach E-Mail vom 29.10.2012
- [42] Vuchic, V. R. nach E-Mail vom 03.10.2012
- [43] Siemens, (2011) *Infrastructure & Cities Sector Mobility and Logistica Division- Siemens rüstet Paris mit fahrerloser U-Bahn aus*, Siemens AG, München
- [44] Elektronikpraxis abgerufen am 23.09.2012 von [www.elektronikpraxis.vogel.de/automotive/articles\(375131/\)](http://www.elektronikpraxis.vogel.de/automotive/articles(375131/))
- [45] Bianculli, A. J. (2003) *The American Railroad in the Nineteenth Century, Bridges and Tunnels - Signals*, Volume 4, Rosemont Publishing & Printing Corp., England
- [46] Siemens, (2012) *Fact Sheet - Wie funktioniert eine fahrerlose U-Bahn*, Siemens, München

- [47] Siemens, (2010) *Trainguard MT - The scalable automatic train control system for maximum flexibility in modern mass transit*, Siemens AG, Germany
- [48] Siemens, (2012) *Sicherheit und Effizienz für Nahverkehrsbahnen - Bahnautomatisierung von Siemens auf einen Blick*, Siemens AG, Germany
- [49] Cartier, N. (RATP) nach E-Mail vom 29.10.2012
- [50] Kaba (2012) abgerufen am 17.10.2012 von www.kaba.com
- [51] United Nations (2012) abgerufen am 08.10.2012 von esa.un.org
- [52] Bundeszentrale für politische Bildung (2009) abgerufen am 22.10.2012 von www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/globalisierung/52705/verstaedterung
- [53] Technology Review (2009) abgerufen am 09.10.2012 von www.heise.de/tr/artikel/Persoenlicher-Nahverkehr-276078.html

WISSEN ▪ TECHNIK ▪ LEIDENSCHAFT



Institut für Eisenbahnwesen
und Verkehrswirtschaft
Technische Universität Graz
Rechbauerstrasse 12/II
8010 Graz
+43 316 873 6216
office.ebw@tugraz.at
▶ www.ebw.tugraz.at