



**DIPLOMARBEIT**  
**Master Thesis**

**Ansätze zur effizienten**  
**Kapazitätsausnutzung bei S-Bahnsystemen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.- Ing. Dr. techn. Norbert Ostermann  
Dipl.- Ing. Dr. techn. Andreas Schöbel

E 230 - 2

Institut für Verkehrswissenschaften  
Fachbereich für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Stefan Tanzler

0125366

Wien, am

eigenhändige Unterschrift

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir das Absolvieren des Studiums „Bauingenieurwesen“ an der TU Wien ermöglicht haben.

Ich möchte mich ganz besonders bedanken bei meinem privaten Umfeld, das mich im Laufe des Studiums zu jeder Zeit unterstützt hat und somit den erfolgreichen Abschluss dieses Studiums ermöglicht hat.

Weiters möchte ich mich bedanken beim Institutsvorsitzenden des Institut für Eisenbahnwesen der TU Wien Prof. Dr. Norbert Ostermann und bei meinem Diplomarbeitbetreuer Andreas Schöbel für die Unterstützung beim Verfassen dieser Diplomarbeit.

Auch möchte ich mich hiermit bei meinen Vorgesetzten und Kollegen der ÖBB Personenverkehr AG bedanken, die mir die Möglichkeit gegeben haben, einer studienbegleitenden, interessanten Tätigkeit nachzugehen und die zu jeder Zeit Verständnis für diese spezielle Situation aufgebracht haben.

Zum Abschluss bedanke ich mich auch bei allen, die hier nicht speziell erwähnt sind, aber meinen Weg durch das Studium begleitet haben.

Vielen Dank!

## **Zusammenfassung:**

Die Mobilität in den Städten stellt heutzutage eine große Herausforderung für die Verkehrssysteme dar. Die Eisenbahn nimmt im System des öffentlichen Schienenpersonennahverkehrs eine wichtige Rolle ein. In vielen Ballungsräumen wurden S-Bahnsysteme eingerichtet. Viele dieser Systeme sind im Laufe der Jahre in Teilbereichen an ihren Grenzen der Kapazität. Da ein Infrastrukturausbau kosten- und zeitintensiv sowie in vielen Fällen nicht mehr trivial möglich ist, müssen die vorhandenen Kapazitäten besser genutzt werden.

Um eine Analyse durchzuführen, werden die spezifischen Merkmale von S-Bahnsystemen durch einen Vergleich mitteleuropäischer Städte ermittelt. Diese hat gezeigt, dass Teile der S-Bahnnetze an den Grenzen der Kapazität mit über 600 Zügen pro Tag betrieben werden. In der Spitzenstunde belasten zwischen 18 und 30 Züge pro Richtung die Infrastruktur. Der Grund für die unterschiedlichen Zugzahlen liegt in der Nutzung der vorhandenen Kapazitäten. Die Kapazität ist durch die Homogenität der S-Bahnsysteme in erster Linie abhängig von den Zugzahlen auf dem betrachteten Abschnitt und der Stabilität.

Auf den S-Bahnstammstrecken sorgen hohe Zugzahlen für eine starke Belastung des Streckenabschnittes. Eine Analyse bringt Aufschluss über die wesentlichen Kennzahlen, deren Wirkung und deren Relevanz für S-Bahnsysteme.

Zur optimalen Nutzung der begrenzten Kapazitäten in stark belasteten Abschnitten ist ein Zusammenwirken mehrerer Faktoren erforderlich. Dies betrifft die Spezifizierung von Reserve- und Pufferzeiten in der Planungsphase, optimale Prozesse zur Betriebslenkung mithilfe der EDV und eine leistungsfähige Sicherungs- und Zugbeeinflussungsinfrastruktur. Diese Maßnahmen sind jedoch nur dann wirkungsvoll, wenn die Abläufe im täglichen Betrieb mit einer hohen Pünktlichkeit eingehalten werden. Vor allem bei S-Bahnsystemen, mit kurzen Haltemustern und engen Zugfolgezeiten, ist durch die präzise Einhaltung von Haltezeiten und dem Vermeiden von Halten auf der freien Strecke mithilfe von „Real Time Rescheduling“ eine höhere Leistungsfähigkeit realisierbar. Durch optimale Umsetzung der Prozesse in der Planungs- und Betriebsphase kann somit die Kapazität bestehender Infrastrukturen besser ausgenutzt werden.

**Abstract:**

Nowadays mobility in the cities is a big challenge for the urban traffic systems. In the network the local public transport railways are very important. Therefore commuter railway systems were established. In many cases the capacity of the railway tracks is used by the maximum. A construction of new railway-infrastructure is very expensive and the construction work takes a lot of time. As well as it is not possible to construct new infrastructure in many cities, the available capacities must be better used.

To create an analyse of the commuter railway systems it is necessary to find out the specific characteristics of this systems. Therefore a benchmark was made with railway commuter system of other Central European cities. The result of this benchmark presents, that over 600 trains per day are using the railway tracks and so the maximum capacity is nearly used. In the rush hour 18 to 30 trains are using on this commuter railway infrastructure.

The reason for this different amount of trains can be found in the different use of available capacities. The capacity of a railway infrastructure is, fundamented on the homogeneity of commuter railways, characterized by the number of trains and the stability of the railway operation.

On commuter lines a great number of trains are using the Railway tracks. A capacity-analyse is able to show the important characteristics and the effects of the commuter line Systems.

To maximize the use of the capacity on heavy used railway lines, an optimal cooperation of several factors is necessary. The most important factors are the specification of the reserve-time and the floats in the planning stage, the most effective computer-based process to navigate the train run and an efficient protection and train control infrastructure. For the biggest effect, it is necessary to keep all the processes in the daily railway operation exactly in time. Especially by commuter railway systems, characterized by many stops and small pulses, "Real Time Rescheduling" can afford a higher capacity. By assistance of this system to keep the exactly buffer time in the stations and avoid unscheduled stops outside the stations. The capacity of existing infrastructure can be used in a maximum way, if the processes are implemented in the planning stage and the railway operation.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1.	PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	1
1.2.	AUFBAU DER ARBEIT	2
<b>2.</b>	<b>KAPAZITÄT UND LEISTUNGSFÄHIGKEIT</b>	<b>4</b>
2.1.	DEFINITION	4
2.2.	PARAMETER DER KAPAZITÄT	4
2.3.	BERECHNUNGSMETHODEN	7
2.4.	ALTERNATIVE ANSÄTZE ZUM THEMA KAPAZITÄT	9
2.5.	THEORETISCHE KAPAZITÄT BZW. LEISTUNGSFÄHIGKEIT	9
<b>3.</b>	<b>CHARAKTERISTISCHE MERKMALE VON SCHNELLBAHNSTRECKEN</b>	<b>11</b>
3.1.	ALLGEMEINES	11
3.2.	S-BAHN WIEN	11
3.2.1.	Das Programm Open Track	13
3.2.2.	Die S-Bahn Stammstrecke in Open Track	14
3.2.3.	Ermittlung der theoretischen Kapazität mit Open Track	15
3.2.4.	Ermittlung der theoretischen Fahrzeit mit Open Track aus dem Fahrplan 2010	17
3.2.5.	Berechnung des Kapazitätsverbrauches nach [UIC]	18
3.3.	SCHNELLBAHNSTRECKEN IN MITTELEUROPA	20
3.3.1.	S-Bahn Zürich	21
3.3.2.	S-Bahn München	23
3.3.3.	S-Bahn Stuttgart	26
3.3.4.	S-Bahn Rhein-Main	27
3.4.	GEMEINSAMKEITEN UND VERGLEICH	28

3.4.1.	Vergleich der technischen Daten	29
<b>4.</b>	<b>UNTERSUCHUNGEN ZUR KAPAZITÄT</b>	<b>30</b>
4.1.	HETEROGENITÄT UND DURCHSCHNITTSGESCHWINDIGKEIT	30
4.2.	RESERVEZEITEN	32
4.2.1.	Pufferzeiten	32
4.2.2.	Fahrzeitreserve	33
4.2.3.	Fahrzeitreserve im stark belasteten Abschnitt	34
4.2.4.	Fahrzeitreserven in den Ausgleichszonen	37
<b>5.</b>	<b>QUALITÄTSMABNAHMEN - STABILITÄT</b>	<b>38</b>
5.1.	STABILITÄTSUNTERSUCHUNGEN VON FAHRPLÄNEN	38
5.1.1.	Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung	38
5.1.2.	Kapazitätsmanagement bei den ÖBB	39
5.1.3.	Das System BABS I	39
5.1.4.	Das System MakSi-FS	40
5.1.5.	Das Tool Open TimeTable	41
5.2.	STATIONSaufenthaltszeit	43
5.2.1.	Abfertigung ZUB	44
5.2.2.	Fahrgastwechselzeiten	45
5.2.3.	Rechnerische Methode zur Abschätzung der Haltezeit	46
5.3.	BETRIEBSLENKUNG	47
5.3.1.	Vorausschauende Betriebslenkung	47
<b>6.</b>	<b>STRATEGIEN FÜR EINE EFFIZIENTE KAPAZITÄTSAUSNUTZUNG</b>	<b>52</b>
6.1.	KLASSISCHE KAPAZITÄTserweiterung	52
6.1.1.	Kapazitätserweiterung durch Sicherungssysteme	53
6.1.2.	Fahren auf Signal	54

6.1.3. Zugbeeinflussungssysteme für Fahren im festen Raumabstand	58
6.2. EFFIZIENTER KAPAZITÄTSVERBRAUCH	60
6.2.1. Präzise Bemessung der Pufferzeiten und Zeitzuschläge im Netz	61
6.2.2. Disposition im Eisenbahnbetrieb	62
6.2.3. Echtzeitdisposition mit optimierter Zugsteuerung – Real Time Rescheduling	63
6.2.4. Schweiz: PULS 90	67
6.2.5. Deutschland: „Free Float“	71
6.2.6. Niederlande: „Het Spoor Meester“	76
6.2.7. Anwendung von Fahrerassistenzsystemen bei S-Bahnen	79
<b>7. SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>81</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>85</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>87</b>

# 1. Einleitung

Mobilität entsteht aus der räumlichen Trennung von Aktivitätsorten. So unterscheidet man in der Literatur zwischen Freizeitmobilität und dem Transfer zum und vom Arbeitsplatz. Aus diesem Mobilitätsbedürfnis und dem Angebot an Befriedigung dieser Bedürfnisse resultieren Verhaltensmuster der Menschen [VPL09]. Insbesondere in Ballungsräumen ist dieses Mobilitätsbedürfnis, auch aufgrund der Pendlerverkehre, stark ausgeprägt. Zum motorisierten Individualverkehr auf überfüllten Verkehrswegen stellt ein gut ausgebautes Netz des öffentlichen Personennahverkehrs eine Alternative dar. Für die Befriedigung des Mobilitätsbedürfnisses in Ballungsräumen ist die Eisenbahn ein wichtiger Faktor.

In vielen größeren Städten und Ballungsräumen wurden S-Bahnsysteme eingerichtet. Diese S-Bahnsysteme bestehen im Regelfall aus mehreren Linien und nehmen im Netz des öffentlichen Verkehrs eine wichtige Rolle ein. Noch wichtiger, als die verteilende Aufgabe in den Städten als Zubringer zu den engmaschigen Verkehren mittels Bus oder Straßenbahn, ist ihre zubringende Wirkung aus den angrenzenden Regionen. Diese Verkehrssysteme haben eine große Bedeutung für die Einwohner dieser Region und sind ein wichtiger Standortfaktor.

## 1.1. Problemstellung und Zielsetzung

Insbesondere viele innerstädtische Eisenbahnen, die sogenannten S-Bahnen, haben in den vergangenen Jahren einen enormen Verkehrszuwachs durch die Ausweitung der Städte erreicht. Aufgrund steigender Fahrgastzahlen, vor allem in den Hauptverkehrszeiten, kommt es in vielen Fällen zu Engpässen bei der Fahrgastbeförderung. Oftmals befinden sich solche Systeme an den Grenzen der Leistungsfähigkeit, dies betrifft einerseits die Anzahl der Zugsfahrten und andererseits die eingesetzten Fahrzeuge. In solchen Fällen erscheinen Umbaumaßnahmen an der Infrastruktur sinnvoll, aufgrund der beengten

Verhältnisse in den Städten sind diese aber meistens nicht möglich oder sehr kostenintensiv.

Um eine höhere Transportkapazität bei gleich bleibender Anzahl von Zugsfahrten aufweisen zu können, wird bei vielen Eisenbahnverkehrsunternehmen die Transportkapazität pro Einheit erhöht. Inzwischen ist in vielen Fällen auch hier die Maximalkapazität erreicht.

Für diese S-Bahnsysteme gilt es Maßnahmen zu entwickeln, um noch mehr Zugsfahrten mit einem hohen Maß an Qualität zu gewährleisten. Im Eisenbahnwesen werden diese Faktoren im Begriff Kapazität zusammengefasst.

## **1.2. Aufbau der Arbeit**

Diese Arbeit soll eine Übersicht für bereits vorhandene bzw. entwickelte Lösungsansätze von stark belasteten Eisenbahnstrecken bieten. Diese Strecken werden dabei jeweils an ihren Kapazitätsgrenzen betrieben.

Zu Beginn dieser Arbeit wird der Begriff der Kapazität anhand des UIC-Merkblatt 406 erläutert. Neben der Darstellung der für die Kapazität maßgebenden Parameter, werden die Berechnungsmethoden vorgestellt. Im letzten Teil dieses Kapitels werden auch alternative Ansätze zur Kapazitätsdarstellung aufgezeigt.

Im dritten Kapitel werden die Eigenheiten und speziellen Merkmale von S-Bahnen analysiert. Zu diesem Zweck wird der Betrieb der Wiener S-Bahn-Stammstrecke mithilfe des Programmes Open Track untersucht, und ihre Leistungsfähigkeit ermittelt. Ein Vergleich mit anderen S-Bahnen im mitteleuropäischen Raum soll die wesentlichen Parameter der S-Bahnen aufzeigen, wie zum Beispiel die Zugzahlen im maßgeblichen Abschnitt oder den grundlegenden Aufbau solcher S-Bahnnetze.

Im nächsten Kapitel werden die Kennzahlen der Kapazität ermittelt und ihre Wirkungen untersucht. Die Analyse der betrieblichen Kennzahlen wie Heterogenität, Durchschnittsgeschwindigkeit und die Reservezeiten soll Aufschluss bringen, inwiefern diese für eine Schnellbahn von Relevanz sind.

Kapitel 5 befasst sich mit der Betriebsqualität auf Eisenbahnstrecken. Die Stabilität als zentrales Thema wird näher erläutert, Maßnahmen zu deren Berechnung werden aufgezeigt und Einflussfaktoren analysiert.

Im anschließenden Abschnitt werden Möglichkeiten zu einer effizienten Ausnutzung der Kapazität erläutert. Neben der sicherungstechnischen Adaptierung der Infrastruktur zur Kapazitätssteigerung werden optimierte Planungs- und Betriebsprozesse aufgezeigt. Mittels eines systemumfassenden Ansatzes ist die Infrastruktur in der Lage, eine höhere Leistungsfähigkeit zu erzielen. Die derzeit in der Entwicklung und in der Testphase befindlichen Systeme „PULS90“ bei der SBB, „Free Float“ bei der Deutschen Bahn und „Het Spoor Meester“ in den Niederlanden werden dabei näher erläutert. Die Anwendbarkeit dieser Ideen auf die S-Bahnen wird im anschließenden Abschnitt dargestellt.

In der abschließenden Conclusio werden die Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst und die erforderlichen Maßnahmen zu einer optimalen Kapazitätsausnutzung aufgezeigt.

## **2. Kapazität und Leistungsfähigkeit**

### **2.1. Definition**

Grundsätzlich ist Kapazität keine eindeutig definierbare Größe, es hängt vielmehr davon ab wie sie genutzt wird und ist somit abhängig von der Art ihrer Verwendung. Basisparameter sind die Infrastrukturmerkmale inkl. des Sicherungssystems, des Fahrplanes und der erforderlichen Pünktlichkeit. [UIC04].

Die Leistungsfähigkeit eines Verkehrssystems bezeichnet allgemein dessen Fähigkeit, die Nachfrage nach dem Transport von Personen oder Gütern gemäß der Menge und der Verkehrsrelation mit einer gewünschten Qualität zu befriedigen. Angewendet auf eine Eisenbahnstrecke ist die Leistungsfähigkeit die Anzahl der Züge, die in einem Bezugszeitraum unter bestimmten Qualitätsmerkmalen auf der Strecke befördert werden können. [MUT1].

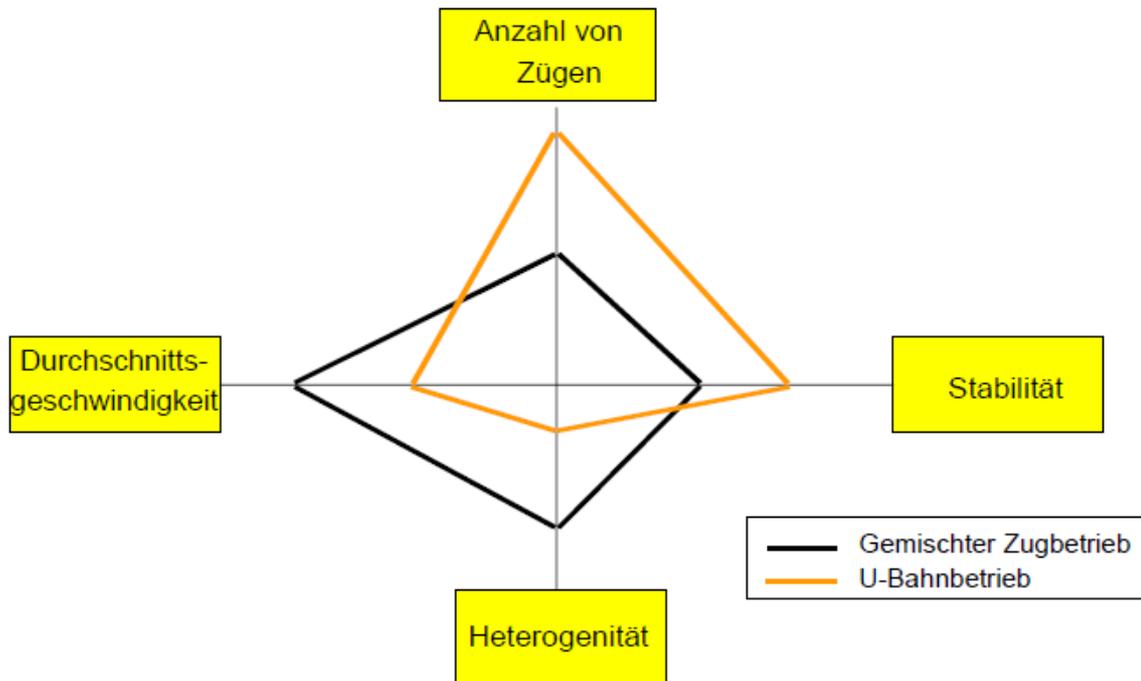
Diese Kennzahl ist eine bestimmende Grundlage für die Beurteilung einer geplanten oder bestehenden Infrastruktur. Die Leistungsfähigkeit eines Netzes beeinflusst unmittelbar die Leistungsfähigkeit der darauf verkehrenden Eisenbahnverkehrsunternehmen, quantitativ in der Befriedigung der Nachfrage nach Trassenkapazität und qualitativ in der Einhaltung zugesicherter Leistungen. Das Ergebnis einer Leistungsuntersuchung zeigt das Verhalten einer Verkehrsmenge auf der untersuchten Infrastruktur [ÖBB00].

### **2.2. Parameter der Kapazität**

Die Kapazität auf einer vorgegebenen Infrastruktur basiert auf wechselseitigen Abhängigkeiten [UIC04]. Diese lassen sich in der sogenannten Kapazitätsbilanz darstellen.

Aus dieser Kapazitätsbilanz ist die gegenseitige Einflussnahme der vier Parameter, Anzahl der Züge, Stabilität, Heterogenität und Durchschnittsgeschwindigkeit, deutlich erkennbar. Die Gesamtlänge der Linien zwischen den Punkten auf den Achsen, der gesamte Umfang des Vierecks, stellt die Kapazität

dar. Eine Zunahme der Kapazität ist gekennzeichnet durch eine Verlängerung der Linie [UIC04]. In Abbildung 1 sind exemplarisch zwei Extremfälle dargestellt.



**Abbildung 1: Kapazitätsverbrauch nach UIC 406**

Die schwarze Linie zeigt einen Mischverkehr, das heißt eine Strecke, wo Fernverkehr, Nahverkehr und Güterverkehr die gleiche Infrastruktur benutzen. Die neuen Hochleistungsstrecken in Österreich beispielsweise, die sowohl für den Personenverkehr, als auch für den Güterverkehr ausgelegt sind, weisen qualitativ eine ähnliche Kapazitätsbilanz auf. Die Gegenüberstellung der Geschwindigkeiten von Fernverkehr und Güterverkehr kann einen Unterschied von mehr als 50% ausweisen. Der zweite Parameter, der eine schlechtere Nutzung der Kapazität bewirkt, ist bei diesen Strecken die Heterogenität. Fernverkehr, Nahverkehr und Güterverkehr weisen unterschiedliche Haltemuster auf und die eingesetzten Fahrzeuge haben unterschiedliche Zugparameter (z.B.: Beschleunigungswerte usw.).

Die zweite, in orange dargestellte Kapazitätsbilanz zeigt einen U-Bahnbetrieb. Die gleichen Durchschnittsgeschwindigkeit und die Homogenität mit identen Haltemustern und Fahrzeugen sorgen für eine geringe Nutzung der Kapazität. Folglich ist mehr Kapazität für die Stabilität und für die Anzahl der Züge nutzbar.

Die in dieser Arbeit untersuchten S-Bahnsysteme haben eine Kapazitätsbilanz, welche tendenziell ähnlich der einer U-Bahn ist.

Eine eindeutige Kennzahl, wann eine Infrastruktur als überlastet zu betrachten ist, ist nicht vorgegeben. Im [UIC-Merkblatt 406] sind jedoch Richtwerte für Infrastrukturbetreiber angegeben.

Streckentyp	Hauptverkehrszeit	Tageszeitraum	Bemerkung
Spezieller Vorortpersonenverkehr	85%	70%	Die Möglichkeit, bei einem unpünktlichen Fahrplan einige Verkehre zu annullieren, ermöglicht einen Nutzungsgrad mit hoher Kapazität.
Spezielle Hochgeschwindigkeitsstrecke	75%	60%	
Strecken mit gemischtem Verkehr	75%	60%	Kann höher liegen, wenn die Anzahl der Züge gering ist (weniger als 5 pro Stunde) mit starker Heterogenität.

**Abbildung 2: Tabelle: Richtwerte überlastete Infrastruktur nach UIC**

Abbildung 2 zeigt den Grenzwert für eine überlastete Infrastruktur im Vorortverkehr mit 85%. Stark belastete S-Bahnsysteme in den Ballungsräumen erreichen insbesondere in der Hauptverkehrszeit Werte, die deutlich über diesen Grenzwerten liegen können.

Durch Vereinbarungen zwischen den Eisenbahnverkehrsunternehmen und den Infrastrukturbetreibern, und durch die mögliche Komprimierung von höheren Zugzahlen auf kurzen Streckenabschnitten, kann der Kapazitätsverbrauch in Ausnahmefällen auch über dem rechnerisch ermittelten Wert von 100% liegen. Zur Stabilisierung des Systems im Störfall, kann beispielsweise ein Ausfall von Zügen vereinbart werden. Zwischen Infrastrukturbetreiber und Eisenbahnverkehrsunternehmen können zeitlich begrenzte, höhere Kapazitäten in

der Hauptverkehrszeit vereinbart sein, die durch freie Kapazitäten in der Nebenverkehrszeit ausgeglichen werden.

### **2.3. Berechnungsmethoden**

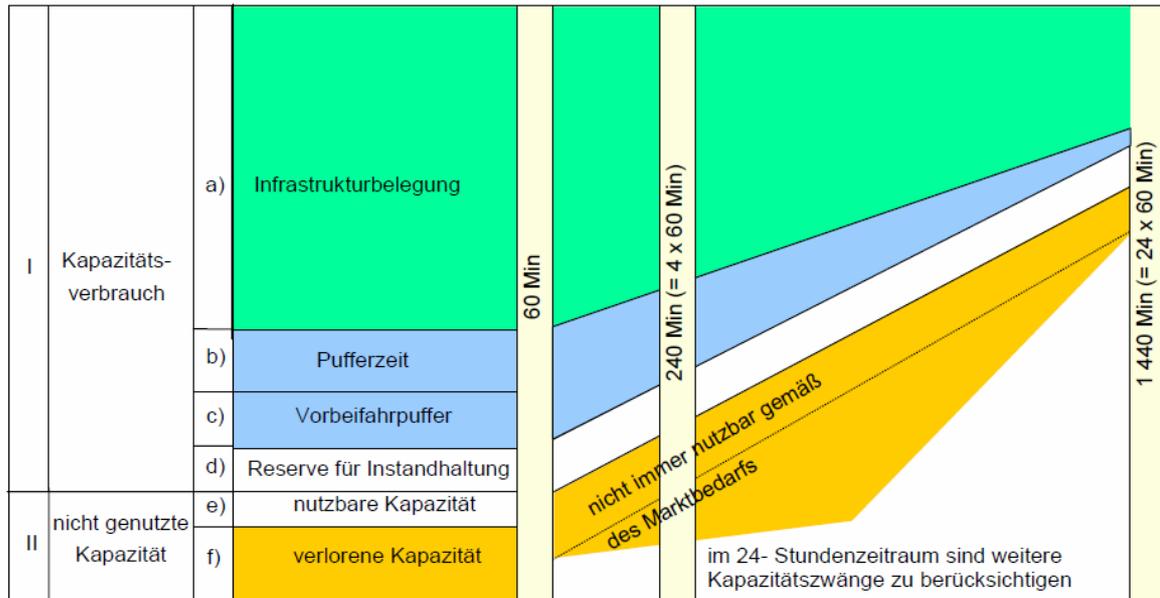
Potthoff [POT70] hat vier Möglichkeiten zur Berechnung der Kapazität von Eisenbahnstrecken angegeben. Diese Angaben sind heute die Grundlage für moderne Systeme:

- Die analytische Methode ist eine direkte Messung des stattfindenden Betriebes.
- Die konstruktive Methode basiert auf der Konstruktion des idealen Fahrplanes.
- Die summarische und stochastische Methode gibt auf Basis der Analyse der einzelnen Vorgänge eine statistische Sicherheit bzw. ein betriebliches Risiko an.
- Bei der Simulation wird mithilfe von computerunterstützten Programmen der Betrieb auf der Infrastruktur simuliert.

In dieser Arbeit wird für die Berechnung und Ermittlung der Kapazität die Methode der Simulation angewandt. Dabei besteht die Möglichkeit, Eisenbahnnetze und darauf verkehrende Fahrten an individuelle Bedürfnisse und Fähigkeiten anzupassen und diese mit der Zeit zu variieren. Die Simulation kann die Realität in einem Datenmodell nachbilden und wird so zum betrieblichen Experimentierfeld [ÖBB00]. Mit EDV-Programmen können sowohl der planmäßige Zustand als auch die Betriebszustände nachgestellt werden. Durch die variable Änderung einzelner Parameter und die Möglichkeit der Implementierung von Störfällen, können bei der Simulation die notwendigen Erkenntnisse für den realen Betrieb gewonnen werden. Im Zuge der weiteren Untersuchungen wird diese Methode mit dem Simulationsprogramm Open Track durchgeführt.

Nach der Methode der [UIC] wird der Kapazitätsverbrauch durch die Infrastrukturbelegung in einem bestimmten Zeitfenster gemessen, zu der Zeitreserven für eine

Fahrplanstabilisierung und gegebenenfalls Instandhaltungsanforderungen hinzugefügt werden.



**Abbildung 3: Kapazitätsverbrauch nach UIC 406**

Die Formel lautet: Gesamtverbrauchszeit  $k = A+B+C+D$

Kapazitätsverbrauch:  $K = k \cdot 100 / U$  U.... Zeitfenster

#### 2.3.1.1. Rechenbeispiel Kapazität S-Bahn:

Annahme: In einem bestehenden S-Bahn System beträgt die Mindestzugfolgezeit zwei einander folgender S-Bahnen 3 Minuten. Die fahrplanmäßige Folgezeit beträgt 4 Minuten.

Infrastrukturbelegung (A)  $3\text{min} / 4\text{min} = 75\%$

Stabilität (B+C+D)  $(4\text{min} - 3\text{min}) / 4\text{min} = 25\%$

Eine vertiefende Analyse muss bei einem solchen Ergebnis zeigen, ob es sich bei diesen 25% der Stabilitätsbilanz um eine notwendige Reservezeit (=Pufferzeit, Reserve für Instandhaltung) handelt, oder, ob sogenannte verlorene Kapazitäten vorhanden sind.

Ist die Reservezeit in dieser Höhe notwendig:

$$K = 4\text{min} * 100 / 4\text{min} = 100\%$$

Die Kapazität ist zu 100% genutzt.

Ist die halbe Reservezeit ausreichend: (Reservezeit = 0,5min, k=3,5min)

$$K = 3,5\text{min} * 100 / 4\text{min} = 87,5\%$$

Die Kapazität ist zu 87,5% genutzt. Die Anwendung dieser Methode unterstellt, dass 12,5% freie Kapazität vorhanden sind. Diese Kapazität kann somit für das Einfügen weiterer Zugtrassen verwendet werden.

## **2.4. Alternative Ansätze zum Thema Kapazität**

Die Komplexität der Definition der Kapazität zeigt sich im Umgang der Bahnen mit diesem Thema. Durch die vielen Einflüsse und Merkmale ist es laut den Schweizer Bundesbahnen (SBB) grundsätzlich schwierig und wenig zielführend, diese in einer Kennzahl zu bündeln, wie es die UIC versucht.

Die SBB [vgl. SBB01] ist bei ihren Untersuchungen zur 30%igen Kapazitätssteigerung ihres Netzes zur Erkenntnis gelangt, dass die Kapazität keine feste, einem Streckenabschnitt oder einem Knoten zuordenbare Größe ist. Kapazität lässt sich auch nicht nach Belieben abrufen und verwenden. Man kann nicht von einer vorsorglichen Bereitstellung von Kapazität sprechen, sondern von einem Kapazitätsmanagement. Kapazitätsmanagement wird definiert als die marktgerechte rechtzeitige Bereitstellung, Nutzbarmachung sowie maximale Nutzung und optimale Abstimmung der theoretisch sich bietenden Kapazität und deren Nutzung. Dies bedingt eine kontinuierliche und nachhaltige Ausrichtung bzw. Koordination aller relevanten Prozesse und Funktionen der Unternehmungen.

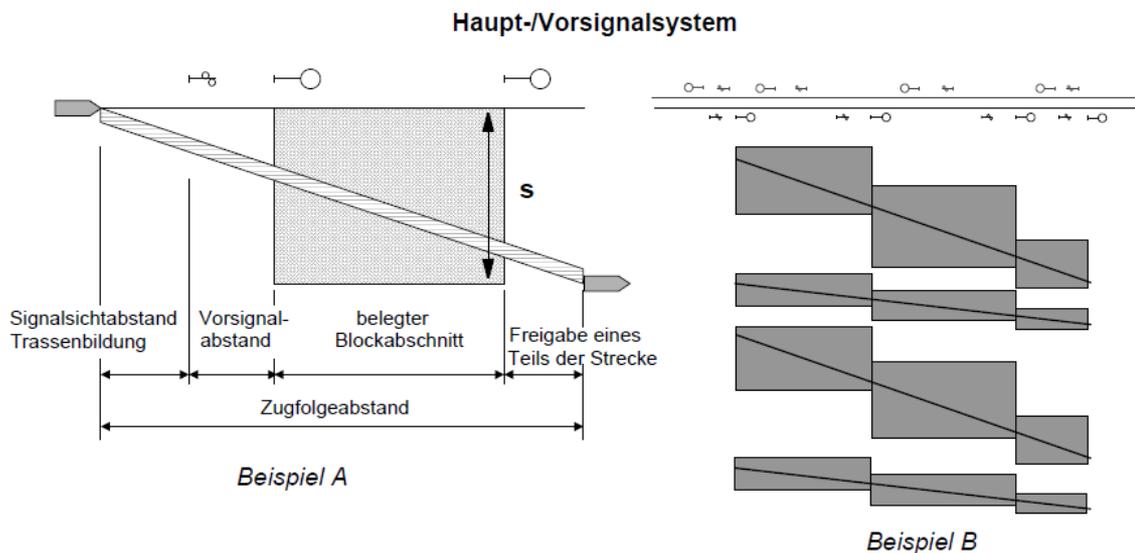
## **2.5. Theoretische Kapazität bzw. Leistungsfähigkeit**

Unter der theoretischen Leistungsfähigkeit ist die Zahl von Zügen zu verstehen, die eine Strecke zwar mit definiertem Fahrtverlauf, aber ohne Rücksicht auf die benachbarte Infrastruktur benutzen [MUT1].

Die theoretische Leistungsfähigkeit ist gekennzeichnet durch Züge, die mit den planmäßigen Geschwindigkeiten einander im Abstand der Mindestzugfolgezeit folgen [SCH86]. Diese Leistungsfähigkeit hat jedoch nur bei der Abfuhr von Staus

kurzzeitige Gültigkeit und ist daher für den praktischen Eisenbahnbetrieb nicht relevant.

Der [UIC-Kodex 406] definiert die theoretische Kapazität als die maximale Anzahl von Zügen unter idealen Umständen. Diese idealen Umstände sind die absolute Harmonisierung der Zugtrassen und ein möglichst kurzer Zugfolgeabstand.



**Abbildung 4: Belegungszeit bei Sicherungssystem mit Haupt-/Vorsignalen [UIC04]**

In Abbildung 4 sind die Belegungszeiten bei einem Haupt-/Vorsignalsystem dargestellt. Bei identischen Zugtrassen sind die Belegungszeiten der Blockabschnitte die maßgebliche Komponente für die theoretische Leistungsfähigkeit.

Diese Werte sind jedoch theoretische Werte und im täglichen Betrieb nur selten erreichbar, bilden jedoch eine Vergleichsmöglichkeit zwischen verschiedenen Infrastrukturen.

Durch den Vergleich der theoretischen Leistungsfähigkeit mit den realen Zugzahlen auf bestehenden Streckenabschnitten, kann der Kapazitätsverbrauch der übrigen Faktoren der Kapazität ermittelt werden. Bei S-Bahnsystemen kann durch die annähernde Homogenität und die einheitlichen Durchschnittsgeschwindigkeiten, eine Abschätzung der Werte für die Stabilität und Qualität durchgeführt werden.

## **3. Charakteristische Merkmale von Schnellbahnstrecken**

### **3.1. Allgemeines**

Wichtigste Merkmale einer S-Bahn sind der dichte Taktfahrplan, zahlreiche Haltepunkte sowie geeignete Fahrzeuge. S-Bahnen haben weiters eine wichtige Funktion als Zubringer zum Fernverkehr und sind Bindeglied zum städtischen Nahverkehr [LUZ03].

Lt. [Pabst] sind häufige Haltepunkte, dichte Zugfolge und Verknüpfungspunkte mit anderen öffentlichen Verkehrsmitteln maßgebliche Merkmale einer S-Bahn [PAB00]. Wesentlich ist auch die wechselseitige Wirkung zwischen den eingesetzten Fahrzeugen und den Bahnsteigen.

### **3.2. S-Bahn Wien**

Die S-Bahn Wien stellt das größte S-Bahnsystem in Österreich dar. Die sogenannte Schnellbahnstammstrecke, der meistbefahrenste Abschnitt des gesamten Netzes zwischen Wien Meidling und Wien Floridsdorf wird im Zuge dieser Arbeit genauer analysiert. Diese Strecke ist rund 14 Kilometer lang und weist wichtige Verknüpfungen zu den städtischen Verkehrsmitteln auf.

Die S-Bahnstammstrecke und die U-Bahnlinie U6 bilden die wichtigsten Nord-Süd-Verbindungen für den öffentlichen Personennahverkehr. Der Betrieb auf diesem Abschnitt ist dadurch gekennzeichnet, dass es sich um ein offenes System handelt - im Unterschied zu sämtlichen Wiener U-Bahnlinien, welche ausnahmslos geschlossene Systeme sind.

Ein geschlossenes System ist ein System, das in sich unabhängig agiert. Das heißt, es wird eine Linie von A nach B und umgekehrt betrieben, ohne Wechselwirkungen von/zu anderen Linien oder Netzen.

Ein offenes System, wie die S-Bahnstammstrecke erhält direkte Einwirkungen von anderen Systemen. Es werden S-Bahnen, deren Ausgangsort und/oder das Ziel außerhalb des Systems liegen, in das System integriert. Im Falle der S-Bahnstammstrecke werden von den Außenästen der Schnellbahn kommende

Züge über die Stammstrecke weitergeführt. Diese Züge übertragen den jeweiligen Zustand (pünktlich oder verspätet) auf das System und manipulieren es so. Ebenso übt die S-Bahnstammstrecke Auswirkungen auf die angrenzenden Streckenabschnitte aus. Deshalb werden hohe Anforderungen an die Planung und Disposition solcher Systeme gestellt. Insbesondere in den Hauptverkehrszeiten, wo diese Strecke durch eine hohe Anzahl von Zügen belastet wird, sind nur geringe Kapazitäten für die Stabilität vorhanden.

In der Hauptverkehrszeit benutzen in beide Richtungen planmäßig je 18 S-Bahnzüge pro Stunde diese Strecke. Im Jahr 2009 betrug die Pünktlichkeit 91,4% [SVA10].

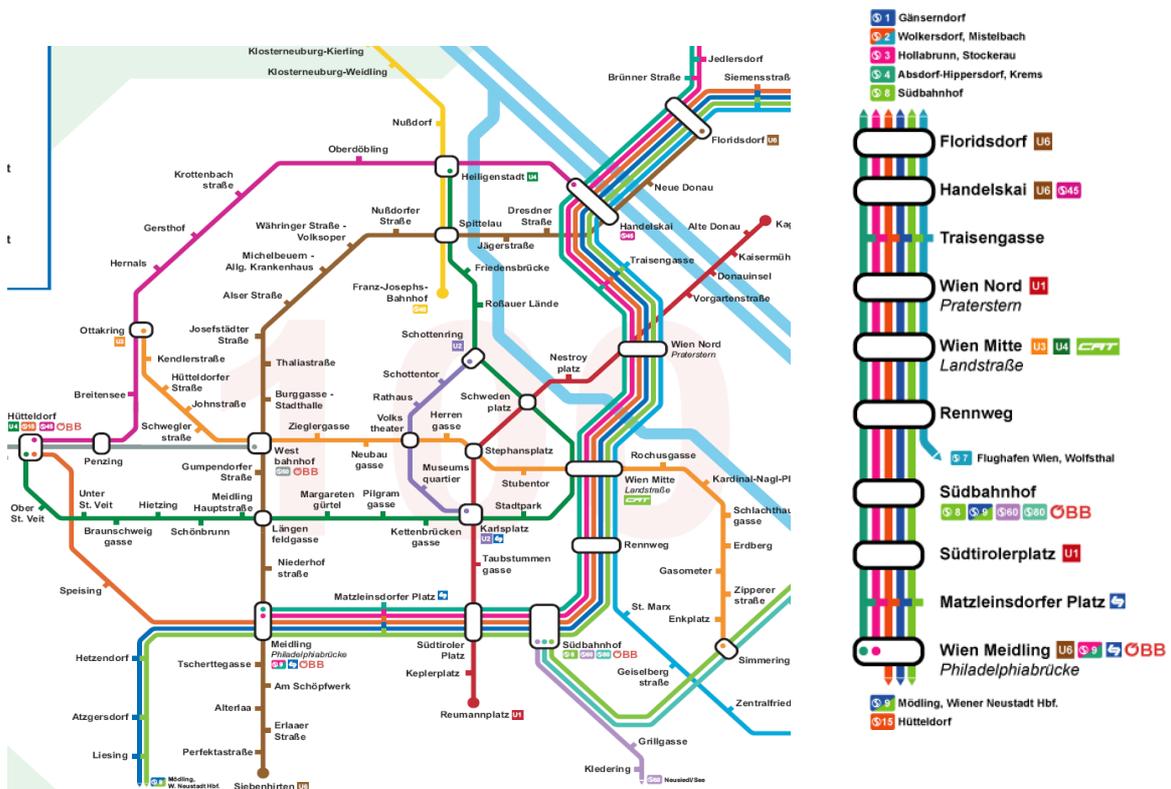


Abbildung 5: Liniennetzplan Schnellverbindungen Wien

Mit dem Simulationsprogramm Open Track wird diese stark belastete Strecke stellvertretend für ähnliche S-Bahnsysteme in dieser Arbeit näher analysiert. Ziel dieser Untersuchungen ist eine Wirkungsanalyse von Maßnahmen für eine bessere Ausnutzung der Kapazität bei S-Bahnen.

### 3.2.1. Das Programm Open Track

Das Programm Open Track ist ein Ergebnis des Forschungsprojektes „Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnwesen“ des Institutes für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich. Ziel war eine benutzerfreundliche Applikation, mit der verschiedenste Fragestellungen des Eisenbahnbetriebes durch Simulation beantwortet werden können [OPT00].

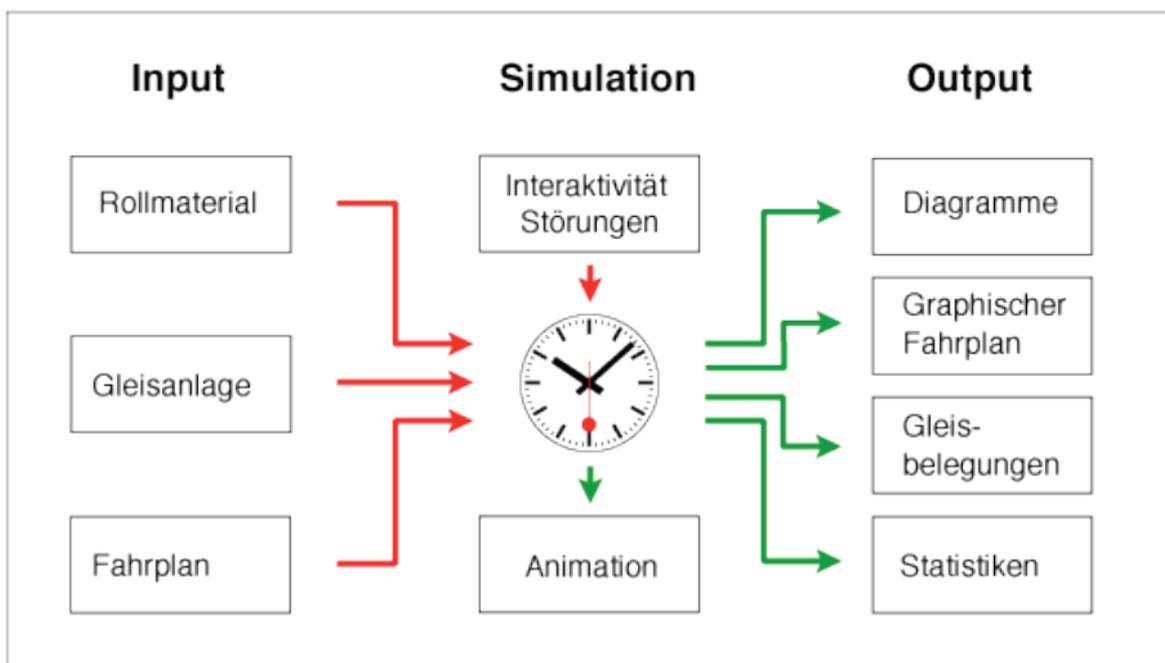


Abbildung 6: Darstellung der Funktionsweise des Simulationstools Open Track

Simuliert werden können alle relevanten Prozesse während eines oder mehrerer Betriebstage eines Eisenbahnnetzes. Durch das Festlegen der Bewegungen von Zügen, dem Verhalten von Signalen, der Disposition der Züge und der Simulation von Störungen können viele Fragen im Vorfeld der betrieblichen Umsetzung gelöst werden [HÜL06].

Typische Einsatzgebiete von Open Track sind:

- Infrastrukturbedarf nachweisen, Strecken und Knotenkapazitäten aufzeigen
- Fahrplankonstruktion und Fahrplanstabilität
- Analyse von Signal- und Sicherungsanlagen

### 3.2.2. Die S-Bahn Stammstrecke in Open Track

Zur Untersuchung der Stammstrecke wurden die Parameter der Infrastruktur in Open Track eingelesen bzw. manuell eingegeben.

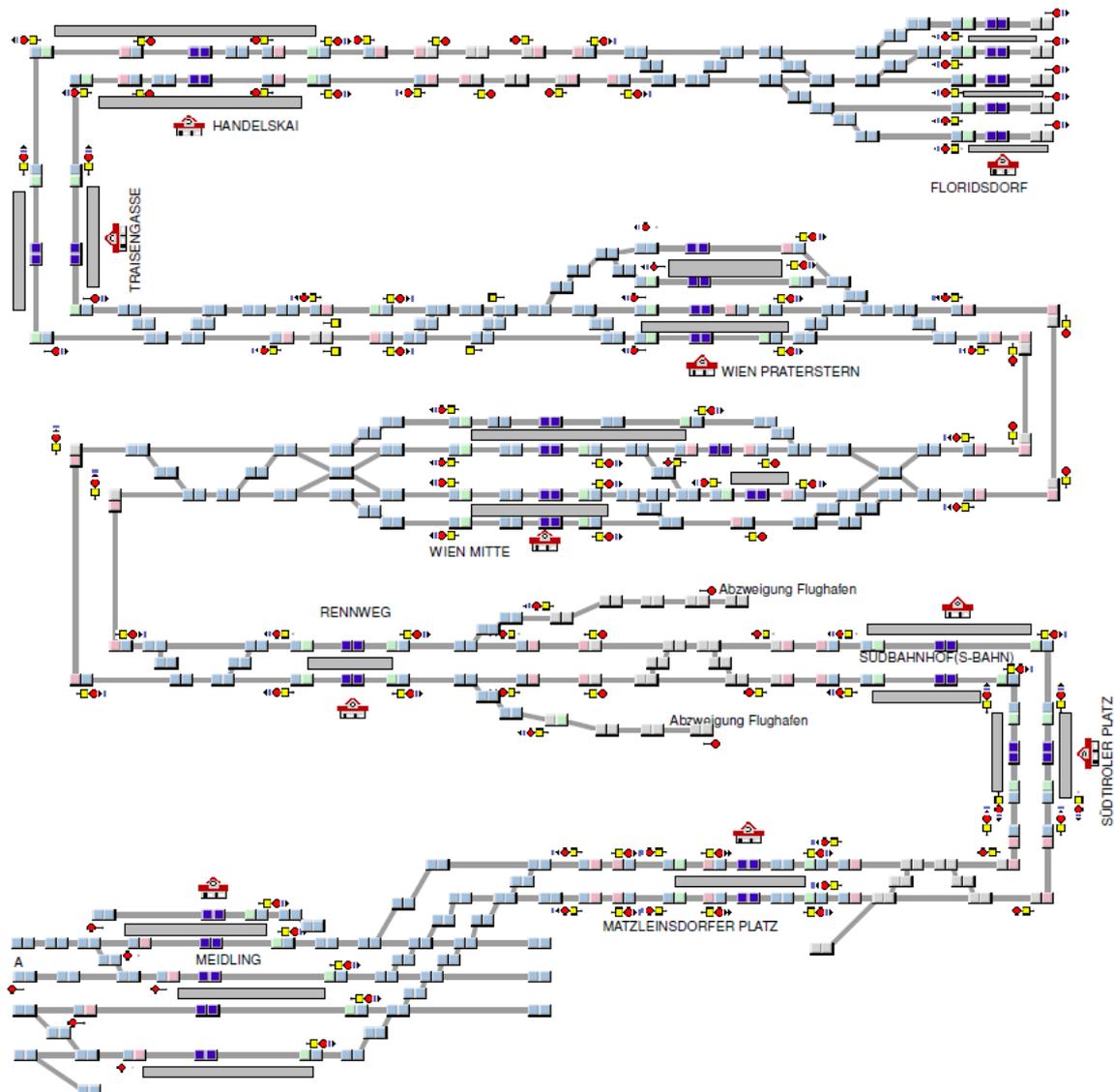


Abbildung 7: Aufbau der Infrastruktur der S-Bahn-Stammstrecke Wien in Open Track

Der Aufbau der Infrastruktur erfolgt mittels Kanten-Knoten-Graph (Abbildung 7). Den Kanten werden bestimmte Attribute wie Länge, Steigung, Höchstgeschwindigkeit usw. zugeordnet.

Die Zuordnung von Elementen des Signalsystems erfolgt zu den Knoten. Auch die Bahnhofsbereiche und Haltepunkte in der Station werden durch Definition der jeweiligen Knoten festgelegt.

Als Grundlage für die Simulation sind neben der vorhandenen Infrastruktur die eingesetzten Fahrzeuge zu definieren. Diesen Fahrzeugen und Zugkompositionen wird ein Zugkraft/Geschwindigkeitsdiagramm zugeordnet. Mit diesen Angaben, sowie dem Gewicht, der Länge und der Höchstgeschwindigkeit kann Open Track mit den verwendeten Fahrzeugtypen die Fahrzeitenrechnung durchführen.

Zusätzlich können den Zuggattungen bestimmte Kantendefinitionen vorgegeben werden. Um den Realbetrieb möglichst genau nachzubilden, ist es notwendig, einen Güterzug mit  $V_{max}=100\text{km/h}$  zu definieren, auch wenn sowohl Lokomotive als auch die Infrastruktur für eine höhere Geschwindigkeit geeignet sind.

Die Simulation der S-Bahn-Stammstrecke wird bei allen Zügen mit einem Tandem der Triebwagen vom Typ BR 4020 durchgeführt.

### **3.2.3. Ermittlung der theoretischen Kapazität mit Open Track**

Ziel der Simulation ist die Ermittlung einer theoretischen Kapazität auf der vorhandenen Infrastruktur. Die Vorgangsweise wurde so gewählt, dass mit computerunterstützter Hilfe die Mindestzugfolgezeit ermittelt wurde. Die Mindestzugfolgezeit ist jene Zeit, in der die Sperrzeitentreppen so eng aneinandergelegt werden, bis sich diese berühren [SCH86].

Dieser Mindestzugfolgezeit zugrunde liegend, kann dann die Anzahl der Züge ermittelt werden, die in einer Stunde den Abschnitt passieren. Das Ergebnis der Untersuchung ist eine konfliktfreie Darstellung eines theoretischen Bildfahrplanes.

Im Open Track gibt es im wesentlichen drei Konflikttypen:

- „Braking for Route“:

Im graphischen Bildfahrplan tritt dieser Konflikttyp in der Farbe Gelb auf. Er tritt immer dann auf, wenn ein Zug bremsen muss, da ein anderer Zug die geforderte Fahrstraße bereits reserviert hat oder belegt.

- „Braking for Signal“:

Wird im graphischen Bildfahrplan orange dargestellt. Dieser Konflikttyp tritt auf, wenn ein Zug aufgrund eines Signals bremsen muss.

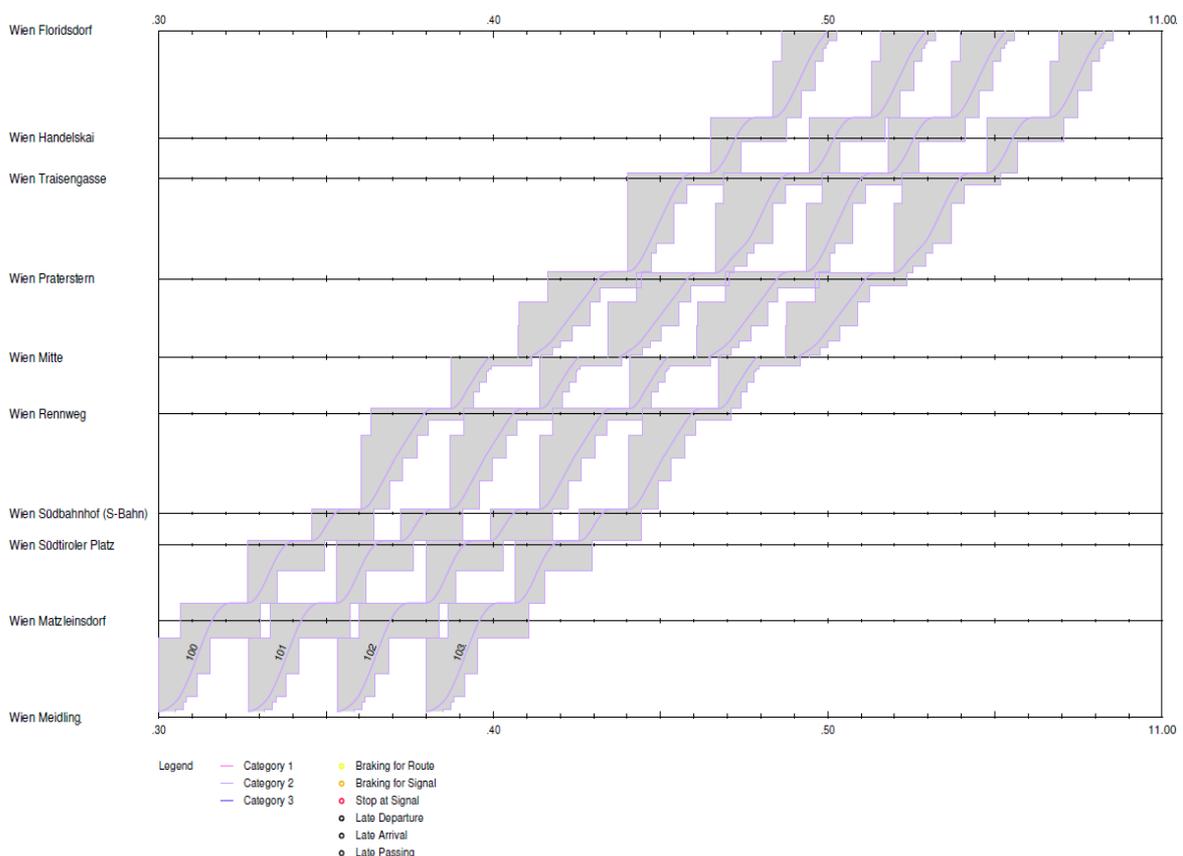
- „Stop at Signal“:

Im graphischen Bildfahrplan rot dargestellt. Dieser Konflikt wird dann visualisiert, wenn ein Zug aufgrund eines Signals stehen bleiben muss.

Wesentlicher Parameter für die Simulation ist die Definition der Haltezeiten. Für diese Simulation wurde eine Haltezeit von 30 Sekunden in allen Stationen gewählt. Für die Ermittlung der theoretischen Kapazität wurde keine Rücksicht auf die Fahrplanstabilität gelegt, sondern in der Simulation durch schrittweise Steigerung der Mindestzugfolgezeit der erste konfliktfreie Fahrplan ermittelt.

In der Abbildung 8 ist der theoretisch mögliche, konfliktfreie Bildfahrplan mit der geringsten Zugfolgezeit zu sehen.

Wien Floridsdorf - Wien Meidling

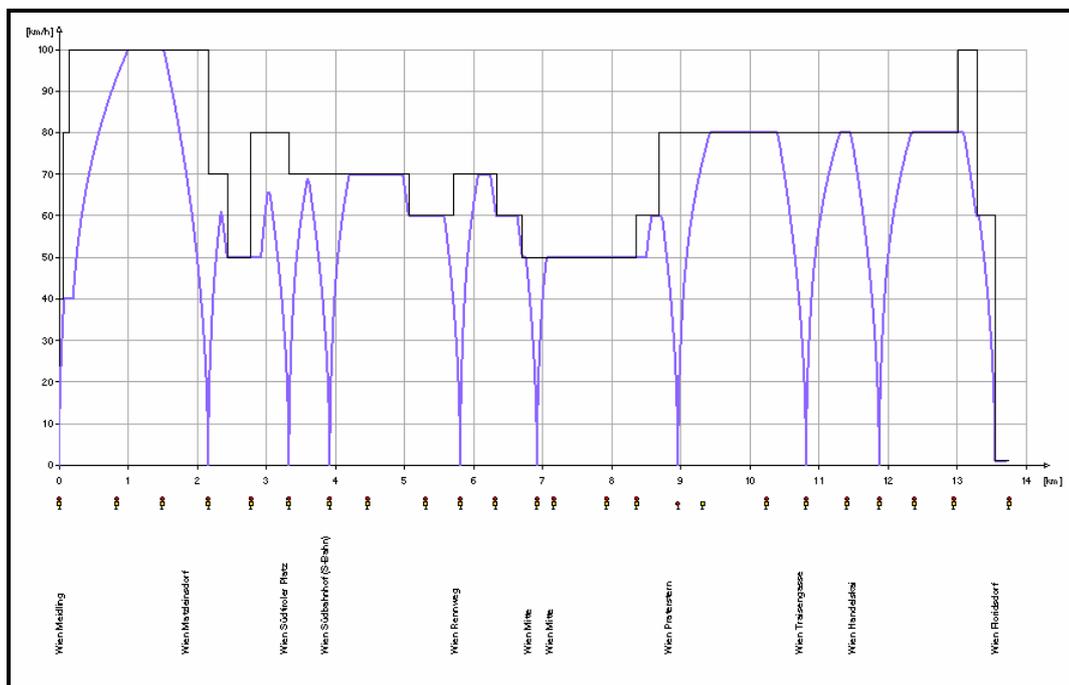


**Abbildung 8: Sperrzeitentreppe zweier S-Bahnen auf der Schnellbahn-Stammstrecke**

Aus der Simulation wurde eine theoretische Mindestzugfolgezeit von 2Min40Sec ermittelt. Damit ergibt sich eine theoretische Kapazität von 22 Zügen pro Stunde. Diese Kapazität wird bei den weiteren Untersuchungen mittels Open Track in den folgenden Kapiteln zugrunde gelegt.

### 3.2.4. Ermittlung der theoretischen Fahrzeit mit Open Track aus dem Fahrplan 2010

Im Jahr 2010 beträgt die fahrplanmäßige Fahrzeit zwischen Floridsdorf und Wien Meidling 25 Minuten. In diesem Abschnitt wird die theoretisch mögliche Fahrzeit zwischen diesen beiden Orten errechnet. Angenommen wurden Haltezeiten von 30 Sekunden in allen Stationen ohne Rücksicht auf minutengenaue Ankunfts- und Abfahrtszeiten. Man erkennt hier, dass diese Fahrzeit, bei identischem Haltemuster, deutlich kürzer ist als die fahrplanmäßige Fahrzeit.



**Abbildung 9: Geschwindigkeits-Weg-Diagramm der schnellstmöglichen S-Bahn-Fahrzeit Wien Meidling – Wien Floridsdorf**

Mit diesen Annahmen wird eine theoretische Fahrzeit von 20 Minuten erreicht (Abbildung 10). Verglichen mit der fahrplanmäßigen Zeit im Jahr 2010 ergibt sich

so eine Fahrzeit, die um fast fünf Minuten länger ist. Diese längere Fahrzeit dient als Pufferzeit für die Fahrzeitreserve und als Haltepufferzeit.

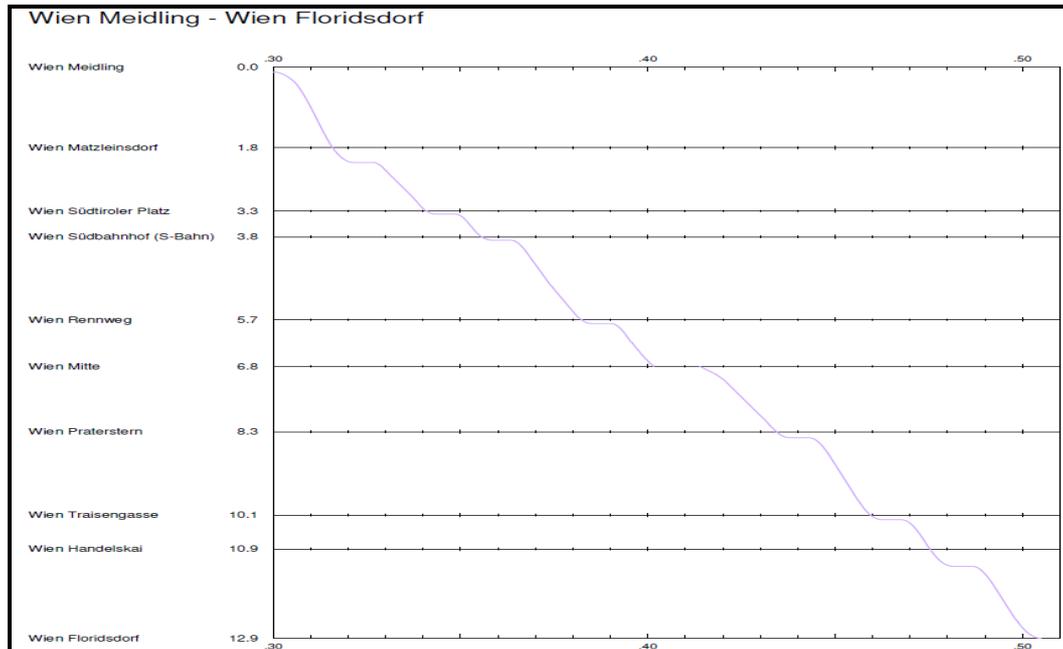


Abbildung 10: Zeit-Weg Diagramm für die schnellstmögliche S-Bahn Fahrt Wien Meidling – Wien Floridsdorf

### 3.2.5. Berechnung des Kapazitätsverbrauches nach [UIC]

Da für die Berechnung des Kapazitätsverbrauches die Größe der Pufferzeiten nicht bekannt ist, die Parameter der Durchschnittsgeschwindigkeiten (70-100km/h), der Heterogenität (nahezu homogen) und vorrangig der Stabilität.

Untersucht werden 3 Varianten für die Spitzenstunde in der Hauptverkehrszeit zwischen 7:30Uhr und 8:30Uhr :

#### 1. Beispiel: Kapazitätsverbrauch Leistungsfähigkeit

Bei dieser Berechnung soll die nicht durch die Anzahl der Züge genutzte Kapazität ermittelt werden.

Zugzahl in der Spitzenstunde: 18 Züge

Mindestzugfolgezeit: 2,67min

Infrastrukturbelegung:  $A = 2,67\text{min} * 18 \text{ Züge} = 48\text{min}$

Kapazitätsverbrauch:  $K = 48\text{min} * 100 / 60\text{min} = 80\%$

Somit stehen 20% für Reservezeit und nicht genutzte Kapazität zur Verfügung.

## 2. Beispiel: Kapazitätsverbrauch mit Pufferzeit pro Zug

Bei dieser Berechnung wird eine fiktive Pufferzeit von 0,5min zusätzlich zur Mindestzugfolgezeit angenommen. Mit diesen Annahmen wird die nicht genutzte Kapazität ermittelt:

Zugzahl in der Spitzenstunde: 18 Züge

Mindestzugfolgezeit: 2,67min

Infrastrukturbelegung:  $A = 2,67\text{min} * 18 \text{ Züge} = 48\text{min}$

Pufferzeit:  $B = 0,5 \text{ min} * 18 \text{ Züge} = 9\text{min}$

Kapazitätsverbrauch:  $K = (48\text{min} + 9\text{min}) * 100 / 60\text{min} = 95\%$

Es ist also mit diesen Annahmen 5 % sog. nicht genutzte Kapazität vorhanden.

## 3. Beispiel: Kapazitätsverbrauch mit Pufferzeit pro Untersuchungszeitraum

Bei dieser Berechnung wird eine optimierte, fiktive Pufferzeit von insgesamt 4min (entspricht in etwa 0,2min pro Zug) in der Stunde angenommen. Mit dieser Annahme wird die nicht genutzte Kapazität ermittelt:

Zugzahl in der Spitzenstunde: 18 Züge

Mindestzugfolgezeit: 2,67min

Infrastrukturbelegung:  $A = 2,67\text{min} * 18 \text{ Züge} = 48\text{min}$

Pufferzeit:  $B = 4\text{min}$

Kapazitätsverbrauch:  $K = (48\text{min} + 4\text{min}) * 100 / 60\text{min} = 86,5\%$

Somit sind also mit diesen Annahmen 13,5 % nicht genutzte Kapazität vorhanden.

### **3.3. Schnellbahnstrecken in Mitteleuropa**

In Europa gibt es in vielen Ballungsräumen S-Bahnnetze verschiedener Größe und Ausbildung. In Österreich gibt es, neben der S-Bahn Wien, weitere S-Bahnsysteme beispielsweise in Graz und Salzburg. Diese österreichischen S-Bahnsysteme lassen aufgrund der Größe und der Ausbildung der Netze keine aufschlussreichen Vergleiche mit der Wiener S-Bahn zu.

Um charakteristische Werte für S-Bahnen zu erhalten, ist es daher notwendig, S-Bahnsysteme außerhalb von Österreich für eine Analyse heranzuziehen. Folglich wurden neben der Simulation der Stammstrecke Wien, die meistbefahrensten Abschnitte anderer großer S-Bahnnetze in Mitteleuropa für diese Untersuchung herangezogen.

Ziel dieses Vergleiches ist es, einen Überblick über den Aufbau, den Betrieb und die Kennzahlen der S-Bahn-Systeme zu erhalten. Ein Hauptaugenmerk gilt vor allem den am stärksten durch Zugzahlen belasteten Streckenabschnitten.

Zu diesem Zweck wurden S-Bahnsysteme aus der Schweiz und aus Deutschland ausgewählt:

- S-Bahn Zürich
- S-Bahn München
- S-Bahn Stuttgart
- S-Bahn Rhein Main

Für die Analyse wurden aus diesen Netzen jene Teilabschnitte evaluiert, wo diese an den Grenzen der Kapazität betrieben werden. Die maßgeblichen Kennzahlen dieser S-Bahnsysteme wurden zusammengefasst und analysiert.

### 3.3.1. S-Bahn Zürich

Der am stärksten belastete Abschnitt der S-Bahn Zürich ist der Bereich von Stettbach - Zürich HB – Stadelhofen. Über diesen ca. 10km langen Abschnitt der Infrastruktur werden acht S-Bahn Linien geführt. Mit der maximalen Anzahl von 20 Zügen pro Richtung und Stunde werden 340.000 Reisende befördert. Aufgrund der Markterfordernisse sind in der Hauptverkehrszeit sämtliche Trassen durch S-Bahnen belegt, lediglich in der Nebenverkehrszeit fahren einige Expressgüterzüge in diesem Abschnitt. Die Streckensignalisierung erfolgt konventionell mit Kurzblöcken im Bereich Stadelhofen – Zürich HB – Hardbrücke.

Kurzblöcke sind Blockabschnitte mit verkürzten Regelabständen. Das bedeutet, dass die Signalabstände den Regelbremsweg in einem Maße unterschreiten, dass der Bremsvorgang durch eine besondere Signalisierung auf mehrere Blockabschnitte verteilt werden muss. Die Signalisierung verkürzter Signalabstände ermöglicht durch die Verkürzungen der Blockabschnittsperrzeit eine Reduktion der Mindestzugfolgezeit, folglich kann die Leistungsfähigkeit erhöht werden. Diese Signalisierung eignet sich nur auf stark belasteten Strecken mit trassenparalleler Fahrweise, wie eben bei S-Bahnen. Es zwei mögliche Varianten der Ausführung [NAP02]:

- Signalisierung im Halbregelabstand: Blockabschnittslängen entsprechen dem halben Regelbremsweg. Vorsignalisierung erfolgt über zwei Blockabschnitte
- Mehrabschnittsbremung: Die Blockabschnittslängen sind kleiner als der Regelbremsweg. Es wird nur ein Blockabschnitt vorsignalisiert. Durch stufenweises Anzeigen der Geschwindigkeit, dem sogenannten „Herab- und Hinaufsignalisieren“, wird der ausreichende Bremsweg über mehrere Blockabschnitte gewährleistet. Durch die Hochsignalisierung ist ein optimierter Betriebsfluss gewährleistet. Eine Sonderform der Mehrabschnittsbremung ist die Anordnung von sogenannten Nachrücksignalen. Hier wird zwischen dem Einfahrsignal und dem Bahnsteig ein Zwischensignal kurz vor dem Bahnsteig angeordnet. Wenn ein ausfahrender Zug die Signalzugschlussstelle des Nachrücksignales geräumt hat, wird das rückliegende Hauptsignal auf Fahrt gestellt und ein

folgender Zug kann nachrücken, bevor das Bahnsteiggleis vollständig geräumt ist. Nachrücksignale werden auf S-Bahnen mit sehr dichter Zugfolge zur Erhöhung der Bahnsteigbelegung und der Leistungsfähigkeit angeordnet [NAP02].

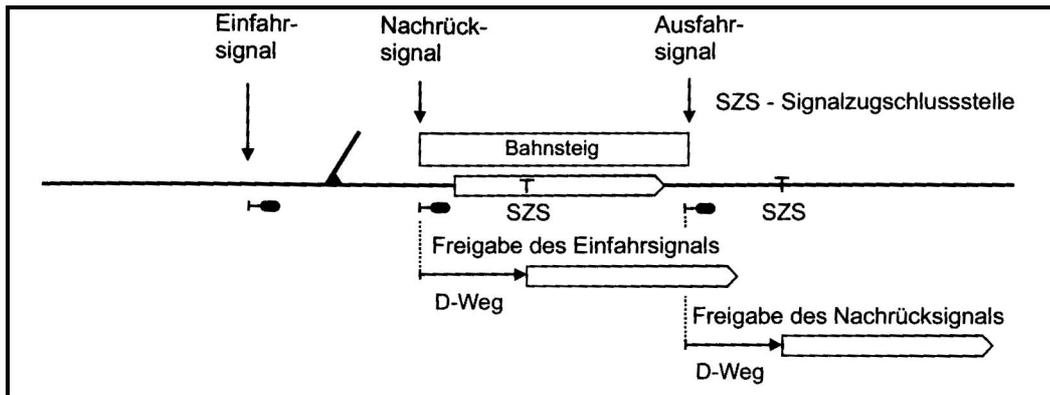


Abbildung 11: Schematische Darstellung Nachrücksignal [NAP02]

Maßgebend für die Kapazität der S-Bahn in Zürich ist die Station Stadelhofen mit nur 3 Bahnsteiggleisen und einer niveaugleichen Kreuzung. Als Maßnahme zur Kapazitätssteigerung ist geplant, die Station Stadelhofen mit vier Bahnsteigkanten auszustatten und eine niveaufreie Abzweigung zu errichten. Mit diesen Maßnahmen soll die Kapazität auf bis zu 30 Züge pro Stunde erhöht werden.

Im Jahr 2009 verkehrten die S-Bahnen mit einem Pünktlichkeitsgrad von 94,3%.

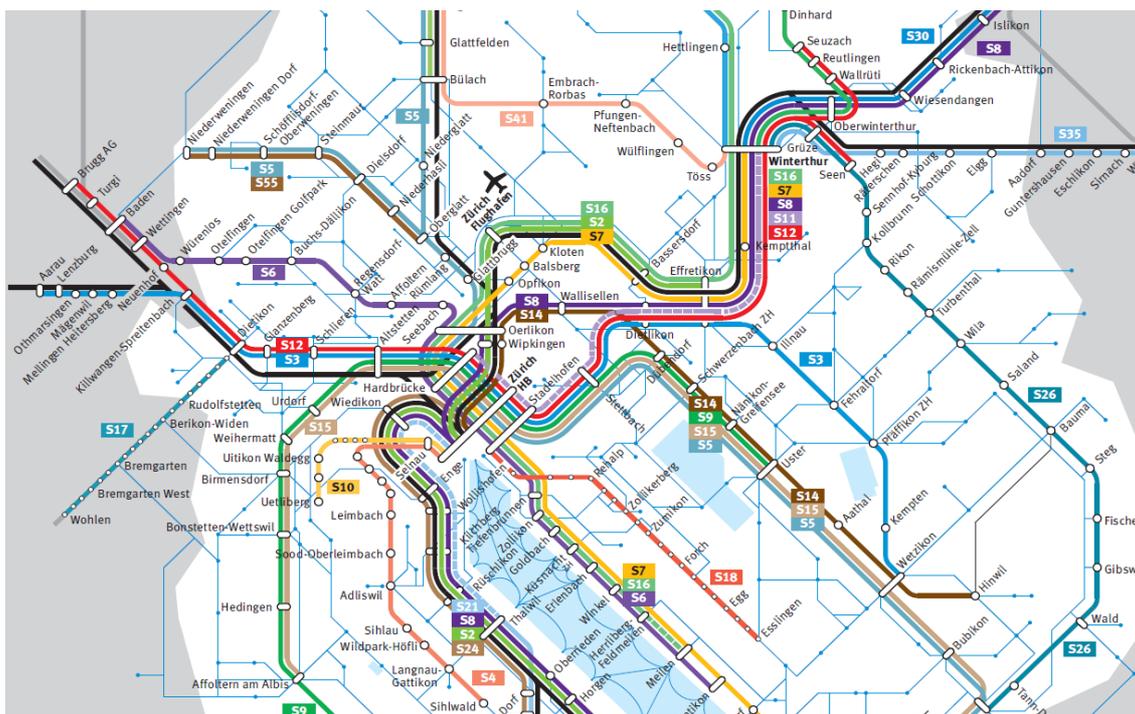


Abbildung 12: S-Bahn Netz Zürich

### 3.3.2. S-Bahn München

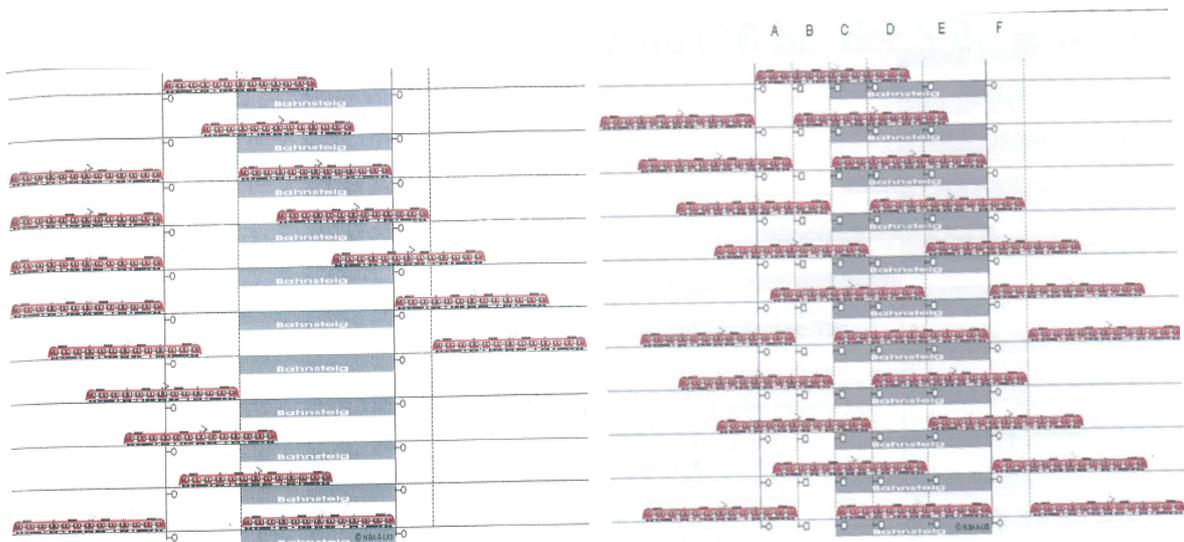
Der Bereich der Stammstrecke zwischen Hauptbahnhof und Ostbahnhof ist der am stärksten belastete Abschnitt der Münchner S-Bahn. In diesem Abschnitt werden sechs S-Bahn-Linien geführt. Ursprünglich war das S-Bahnsystem auf 250.000 Reisende ausgelegt. Tatsächlich nutzen heute mehr als 750.000 Fahrgäste die S-Bahn als Transportmittel. Um eine höhere Zugdichte, Geschwindigkeit und Stabilität zu erreichen, wurde im Jahr 2004 der Abschnitt München Pasing – Hauptbahnhof – Ostbahnhof infrastrukturell ertüchtigt. Heute kann eine maximale Anzahl von 30 Zügen pro Stunde und Richtung geführt werden [DBS10].



Abbildung 13: S-Bahn Netz München

1998 wurde beschlossen, die S-Bahn-Stammstrecke mit der Variante „ESTW mit Anbindung der Betriebszentrale und Zuglenkung, Signalisierung und Linienzugbeeinflussung (LZB)“ zu ertüchtigen. In insgesamt 50 Wochenendsperren wurde das Vorhaben bis Oktober 2004 umgesetzt. Bei dieser Streckenausrüstung sind Außensignale nur die Rückfallebene für den Ausfall der LZB, wo im Regelfall keine Signale benötigt werden. Entscheidende Maßnahme für die Kapazitätserhöhung auf 30 Züge ist die Schaffung einer technischen Möglichkeit

für das Nachrücken von Zügen in den Bahnsteigbereich. Dazu wurde der Abschnitt vom Einfahrsignal bis zum Ausfahrtsignal in mehrere kürzere Zugfolgeabschnitte aufgeteilt, die durch LZB-Blockkennzeichen (LBK) begrenzt und deckungsgleich mit Gleisfreimeldeabschnitten sind [HOR05].



**Abbildung 14: Vergleich der Nachrücksequenzen ohne (links) und mit LZB (rechts)**

Die Überwachung des Nachrückens erfolgt durch LZB, die Signale werden dunkelgeschaltet. Da die LZB-Tauglichkeit für die eingesetzten Fahrzeuge vorausgesetzt wird, kann damit eine wesentlich dichtere Zugfolge ermöglicht werden (Abbildung 14). Belegt ein Zug die Abschnitte C, D und E erfolgt ein Dunkelschaltanstoß für das Einfahrsignal. Das „Dunkel schalten“ erfolgt so rechtzeitig, dass der nachfolgende Zug ohne Abbremsen den Abschnitt A befahren darf. Voraussetzung für die Dunkelschaltung ist aus Sicherheitsgründen ein ausreichend langer Durchrutschweges hinter dem LBK. Dadurch werden sehr dichte Zugfolgen realisiert. Wird ein Zug, unerheblich aus welchen Gründen, nicht LZB-geführt, kommt es zu keinem Dunkelschaltanstoß des Einfahrsignales [HOR05].

Die Streckendurchlassfähigkeit wurde weiters erhöht durch:

- Durchgängige Gewährleistung von 50m Durchrutschweglänge durch Einsatz der LZB L 72 CE (Standard LZB bei der DB). Dafür musste LZB CE für den Einsatz bei der S-Bahn München systembedingt angepasst werden.
- Erhöhung der Maximalgeschwindigkeit von 60km/h auf 80 km/h.

- Verbesserte Betriebsabläufe, das optimierte Abfertungsverfahren, sowie verbesserte LST-Einrichtungen (Zuglenkung, Blockanpassung, Steuerung aus der Betriebszentrale).
- Ausschließlicher Einsatz von LZB-Fahrzeugen der Baureihe ET 423 mit hohem Beschleunigungsvermögen.

Zusätzlich mussten fahrzeugseitige Anpassungen an der ursprünglich für den Fernverkehr entwickelten LZB 80-Einrichtung durchgeführt werden. Die Implementierung S-Bahn-spezifischer Bremskurven und eine Änderung der LZB 80-Software waren notwendig. Das in allen Fahrzeugen eingesetzte Multifunktionsanzeigergerät MFA wurde entsprechend der Zielentfernungsausgaben und der Ankündigung von Geschwindigkeitsänderungen den speziellen Anforderungen mit kurzen Haltestellenabständen und niedrigerem Geschwindigkeitsniveau angepasst [HOR05].



Abbildung 15: Multifunktionalgerät MFA der Baureihe 423 [HOR05]

Im Jahr 2009 konnte bei der S-Bahn München ein Pünktlichkeitsgrad von 98% erreicht werden.

Als weitere Maßnahme zur Steigerung der Infrastrukturkapazität ist der Bau einer zweiten S-Bahn-Stammstrecke in unmittelbarer Nähe zur bestehenden Strecke geplant. Der Münchner Verkehrsverbund sieht sich dadurch in der Lage, die prognostizierten Verkehrszuwächse aufnehmen zu können [MVV09].

### 3.3.3. S-Bahn Stuttgart

Das S-Bahnnetz in Stuttgart besteht aus insgesamt sechs Linien und befördert in rund 650 Zügen in etwa 340.000 Fahrgäste pro Tag. Um den Reisenden eine optimale Anbindung an die Stadt und an die weiterführenden Verkehre zu bieten, führen alle sechs S-Bahnlinien zwischen Schwabstraße und Hauptbahnhof über einen gemeinsamen, zweigleisigen Streckenabschnitt. Dieser Abschnitt ist der am stärksten befahrene Abschnitt im gesamten Netz mit 324 Zügen pro Tag und Richtung. In der Hauptverkehrszeit fahren bis zu 24 Züge pro Stunde je Richtung über diesen stark belasteten Infrastrukturabschnitt.

Die Pünktlichkeit betrug im Jahr 2009 bei einer Maximalverspätung von 6min einen Wert von 98%, bei einem Maximalwert von 3min einen Wert von 90,8%.

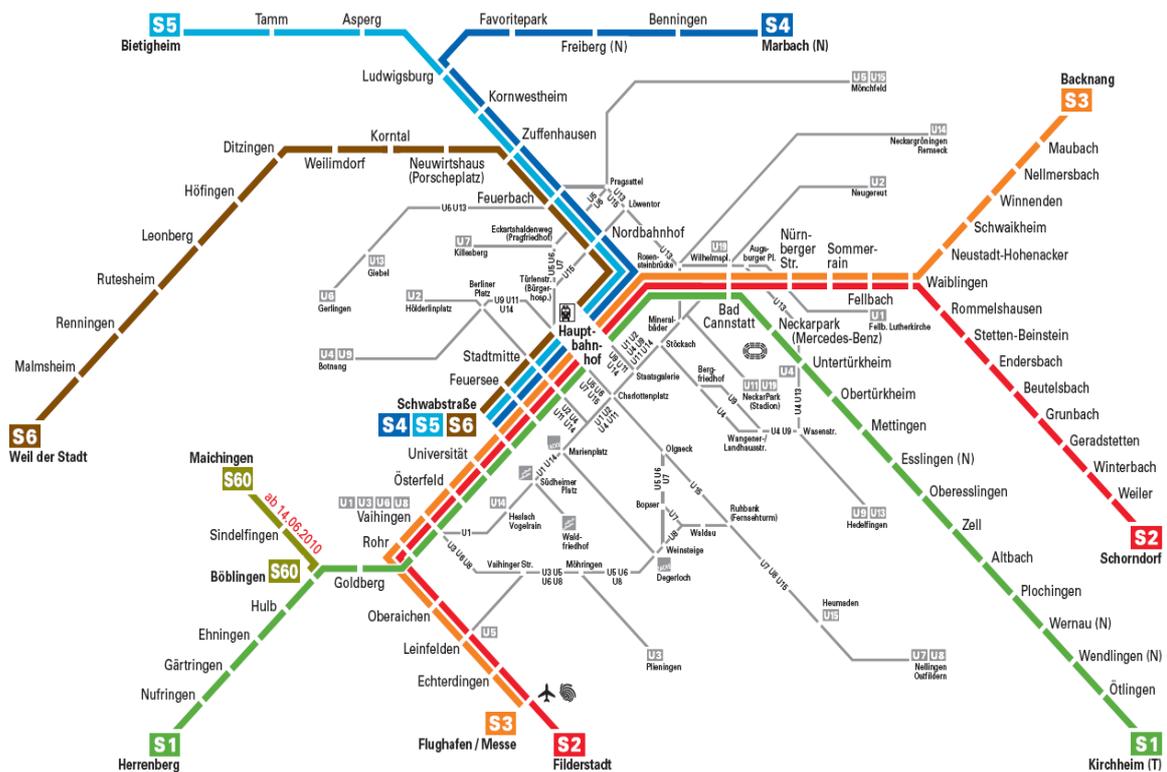


Abbildung 16: S-Bahn Netz Stuttgart

### 3.3.4. S-Bahn Rhein-Main

Der maßgebliche Abschnitt, der Frankfurter Betriebstunnel, zwischen Hauptbahnhof und Ostendstraße wird planmäßig von acht S-Bahnlinien befahren. Der Frankfurter S-Bahntunnel ist die Stammstrecke des Frankfurter S-Bahnsystems und stellt einen kapazitären Engpass dar. Der Streckenabschnitt wird artrein betrieben. Zur Bewältigung der hohen Zugzahlen ist die Strecke mit leistungsfähiger Signaltechnik ausgestattet, die geringe Mindestzugfolgezeiten ermöglicht.

Die mit der Streckendurchsatzleistung ermittelten Werte sind mit 361 Zügen pro Tag und Richtung leicht unterhalb der derzeitigen Belastung. Derzeit fahren 376 Züge pro Tag (21h Betriebszeit) und Richtung durch den Tunnel [MUT03]. In der Hauptverkehrszeit verkehren planmäßig je 23 Züge pro Stunde in West-Ost-Richtung und in die Gegenrichtung.

Im Jahr 2009 verkehrten 94,4% der Züge pünktlich. Für den Betrieb der S-Bahn stehen 166 Triebzüge zur Verfügung.

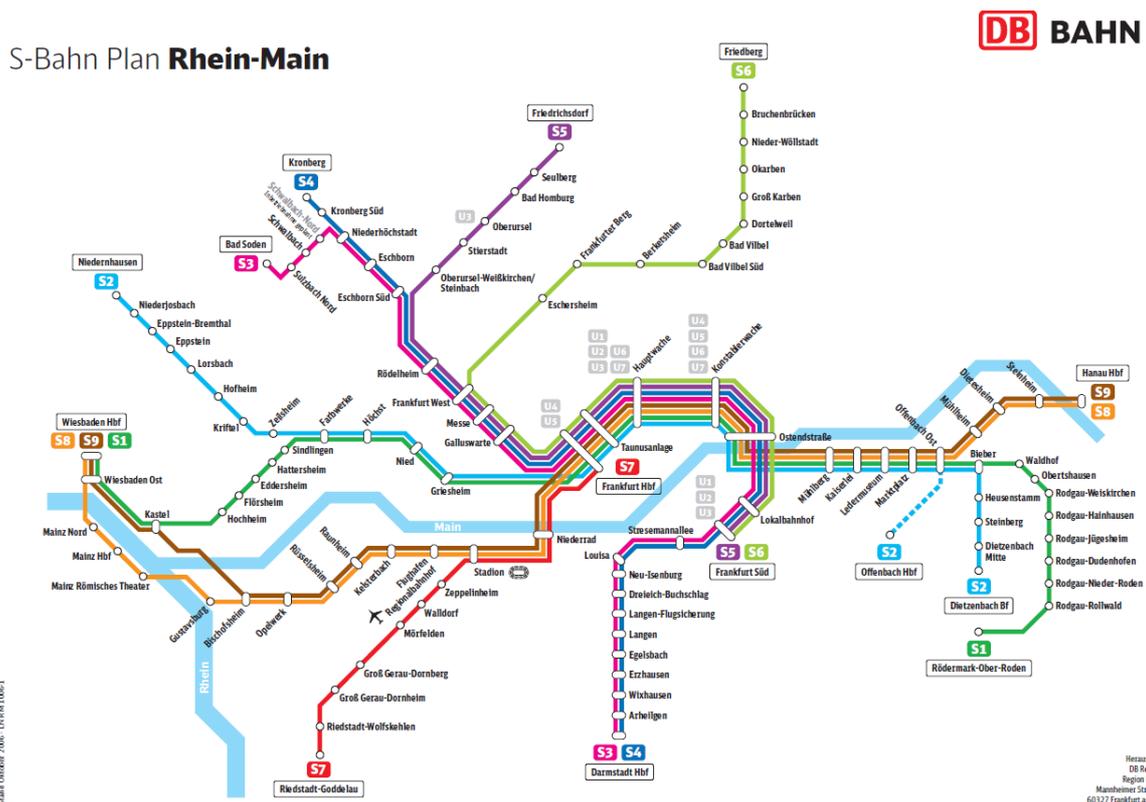
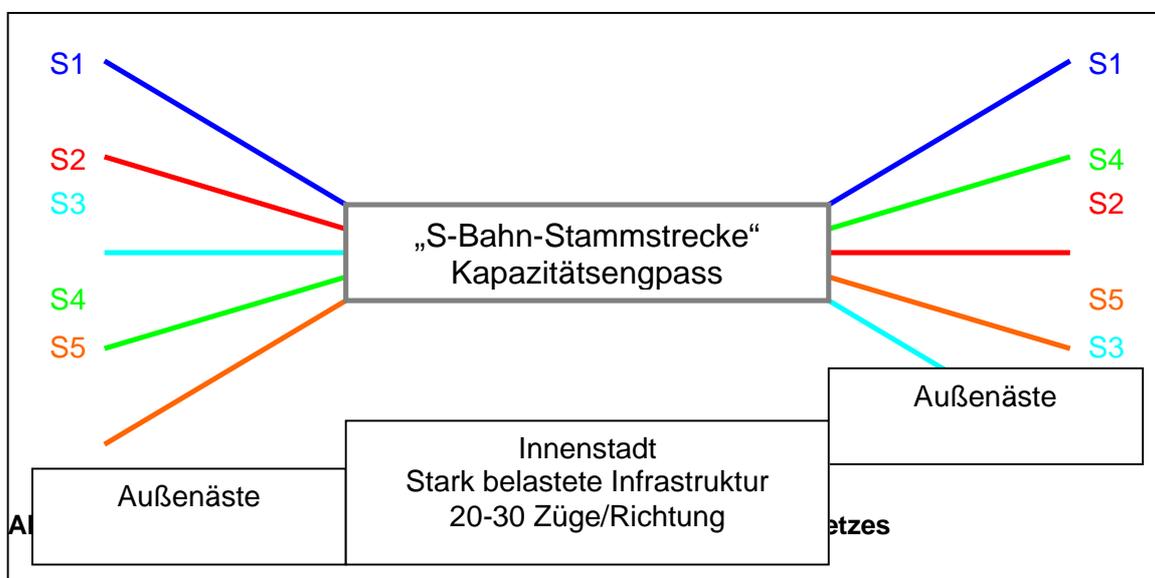


Abbildung 17: S-Bahn Netz Rhein Main

### 3.4. Gemeinsamkeiten und Vergleich

Der öffentliche Personennahverkehr soll Quell- und Zielregionen komfortabel und möglichst direkt miteinander verbinden. In den Ballungsräumen ist eine direkte Anbindung der Innenstädte durch die S-Bahnsysteme sinnvoll. Auch die Netzlinienpläne der untersuchten S-Bahnsysteme weisen diese Ausprägung auf. Dadurch ergibt sich jedoch das Problem, dass in diesen innerstädtischen Bereichen viele S-Bahnlinien die Infrastruktur benutzen.

Es handelt sich somit bei allen untersuchten S-Bahnen um offene Systeme (Stammstrecke), die direkte Abhängigkeiten zu anschließenden Systemen (Außenäste) aufweisen.



Die Folge der überlagerten Takte der S-Bahn-Linien ist eine stark belastete, in vielen Fällen überlastete Streckeninfrastruktur der Stammstrecken. Durch die hohe Anzahl an Zugsfahrten, ist die Leistungsfähigkeit sehr hoch, die Kapazitäten für die Stabilität sind im Gegenzug auf ein Minimum reduziert. Insbesondere in den Verdichtungsbereichen besteht die Gefahr, dass Verspätungen von Zügen als Folgeverspätungen auf weitere S-Bahnen übertragen werden.

Aufgrund der dichten Bebauung innerhalb der Städte, erweist sich ein Ausbau der Infrastruktur als äußerst schwierig. Neben den Platzverhältnissen, können auch Anrainer, die hohen Kosten für die Herstellung und diverse andere Gründe gegen einen Ausbau der Infrastruktur sprechen. Die Kapazitätseinschränkungen während der Bauarbeiten unter laufendem Betrieb stellen ein weiteres Problem dar.

In vielen Fällen ist die einzige sich bietende Möglichkeit, die teure und technisch aufwändige Herstellung von Neubaustrecken. Beispielhaft hierfür sind der Bau der Durchmesserlinie Zürich oder auch die zweite S-Bahn-Stammstrecke in München.

Der Einsatz von beschleunigungsstarken Triebwagen bzw. Zugkompositionen mit optimaler Wechselwirkung mit der Bahnsteiginfrastruktur ist auf diesen stark befahrenen Streckenabschnitten trivial.

### 3.4.1. Vergleich der technischen Daten

Tabelle 1 zeigt, dass die starken Belastungen der Infrastruktur bei allen untersuchten S-Bahn-Systemen ein erhebliches Kapazitätsproblem darstellt. Mit über 600 Zügen gehören diese Streckenabschnitte zu den am meisten befahrenen Strecken in ganz Europa. Auffallend ist die Zugzahl der S-Bahn in München, welche um ein Drittel höher liegt als bei den Vergleichssystemen. Ermöglicht werden diese Zahlen durch den Einbau der linienförmigen Zugbeeinflussung und durch einen ablaufoptimierten Betrieb (siehe Kapitel 3.3.2.). Weiters bemerkenswert ist die S-Bahn-Stammstrecke in Wien, mit lediglich 18 Zugsfahrten pro Stunde und Richtung.

S-Bahn-System	Stärkster belasteter Abschnitt	Züge pro Richtung pro Tag	Züge pro Richtung in HVZ	Mindestzugfolge [Minuten]	Stabilität Pünktlichkeit Jahr 2009
Wien	Wien Mitte - Rennweg	300	18	2:40	91,4%
Zürich	Stadelhofen-Hardbrücke	308	20	2:30	94,7%
München	(Pasing-) HBF-Ostbahnhof	481	30	2:00	98%
Stuttgart	HBF – Stadtmitte-Schwabstraße	323	24	2:10	90,8%
Rhein - Main	FF HBF - Ostendstraße	380	23	2:10	94,4%

**Tabelle 1: Technische Daten der verglichenen S-Bahn Netze**

## 4. Untersuchungen zur Kapazität

Die Kennzahlen zur Kapazität einer Infrastruktur bzw. dem Kapazitätsverbrauch einer Trasse müssen analysiert werden, um so mögliche Maßnahmen zur besseren Ausnutzung der Kapazität ermitteln zu können. In diese Analyse sind die charakteristischen Parameter von S-Bahnen einzubeziehen. So kann ein aussagekräftiges, zielgerichtetes Ergebnis erreicht und die Auswirkungen der maßgeblichen Kennzahlen dargestellt werden.

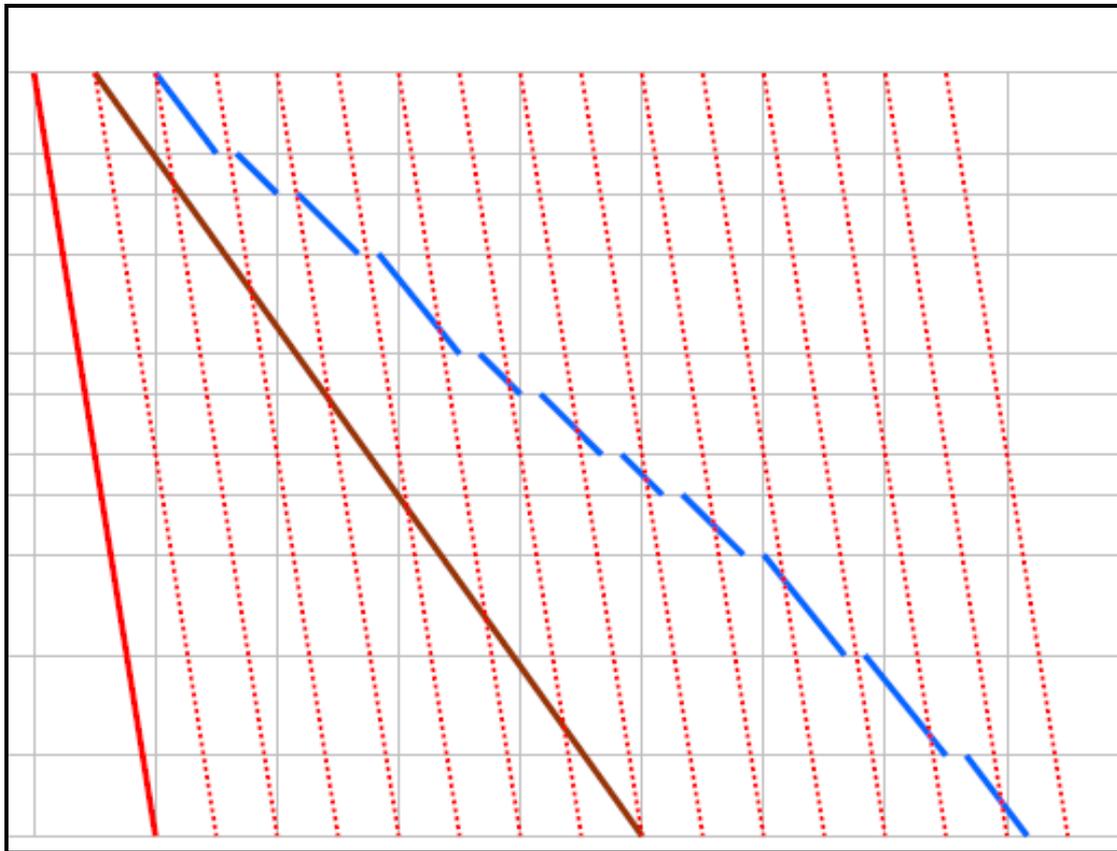
### 4.1. Heterogenität und Durchschnittsgeschwindigkeit

In der [UIC] ist die Harmonisierung der Zugtrassen ein wesentlicher Parameter zum Kapazitätsverbrauch. Die Heterogenitätszeit bezieht sich auf die unterschiedliche Geschwindigkeit zwischen den Zügen und ist definiert als die Mindestzeit zwischen zwei Zugtrassen [UIC04].

Der Kapazitätsverbrauch der Trassen ist gekennzeichnet durch die Geschwindigkeit, das Haltemuster und zu einem geringeren Teil auch durch das Beschleunigungs- und Bremsverhalten der Fahrzeuge.

Deutlich wird die Wichtigkeit der Homogenität und der Durchschnittsgeschwindigkeit bei Strecken mit einem Betriebsprogramm, das von unterschiedlichen Zuggattungen geprägt ist. In Abbildung 19 ist der Kapazitätsverbrauch von einem Fernverkehrszug (rot), einem Güterzug (braun) und einem Nahverkehrszug (blau) dargestellt. Es handelt sich somit um eine Strecke mit Mischverkehr, wo große Geschwindigkeitsunterschiede vorhanden sind. Nahverkehrszüge können eine vielfache Anzahl der Trassen von Fernverkehrszügen benötigen. Diese Problematik tritt insbesondere bei Hochleistungsstrecken auf, wo mehrere Zuggattungen die gleiche Infrastruktur benutzen.

Bei Hochgeschwindigkeitsstrecken in Deutschland und Frankreich ist der Zugmix, und somit die Heterogenität und die unterschiedlichen Geschwindigkeiten, sehr gering. Bei diesen Systemen werden nur die roten Trassen vergeben.



**Abbildung 19: Zeit-Weg-Diagramm: Trassenverbrauch verschiedener Zugattungen, rot-EC, braun-Güterzug, blau-S-Bahn [ÖBB2]**

Bei S-Bahnstrecken ist aufgrund des charakteristischen, engen Taktes des öffentlichen Personennahverkehrs mit nahezu identen Haltemustern ein hohes Maß an Homogenität vorhanden. Ein weiterer „kapazitätsschonender“ Faktor sind die auf den S-Bahnen eingesetzten Fahrzeuge, die ähnliche Beschleunigungs- und Bremsverhalten aufweisen. Daher hat die Heterogenität bei hoch belasteten, innerstädtischen Strecken eine geringe Relevanz. Ebenso ist die Durchschnittsgeschwindigkeit der Zugtrassen bei S-Bahnsystemen als konstant anzunehmen. Bei diesen artreinen S-Bahnsystemen ist eine im Vergleich bessere Ausnutzung der Kapazität erkennbar. Im Regelfall ergibt sich bei S-Bahnen eine Aneinanderreihung von „blauen“ Trassen.

## 4.2. Reservezeiten

Die Leistungsfähigkeit einer Betriebsanlage nimmt durch das Einfügen von Reservezeiten ab, während die Qualität und Stabilität des Betriebes steigt. Es besteht somit ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Pünktlichkeit und Leistungsfähigkeit [ÖBB00]. Dieser Kontext wird auch aus der Kapazitätsbilanz deutlich (siehe Kapitel 2.2).

### 4.2.1. Pufferzeiten

Als Pufferzeit bezeichnet man den minimalen zeitlichen Abstand zwischen den Sperrzeittreppen zweier Zugfahrten. Sie gibt jene Zeit an, um die sich der erste Zug verspäten kann, ohne den zweiten zu behindern. Da die Pufferzeit einen direkten Einfluss auf die Stabilität und in weiterer Folge auf die vorhandene Kapazität der Eisenbahnanlage hat, kommt ihr ein hoher Stellenwert bei der Fahrplankonstruktion zu [GRÖ00].

#### 4.2.1.1. Pufferzeit bei jeder Trasse

Bei dieser Vorgehensweise wird jeder Trasse eine Pufferzeit zugewiesen. Die Zugfolgezeit ist, wie in Abbildung 20 dargestellt, somit gekennzeichnet als Mindestzugfolgezeit plus Pufferzeit.

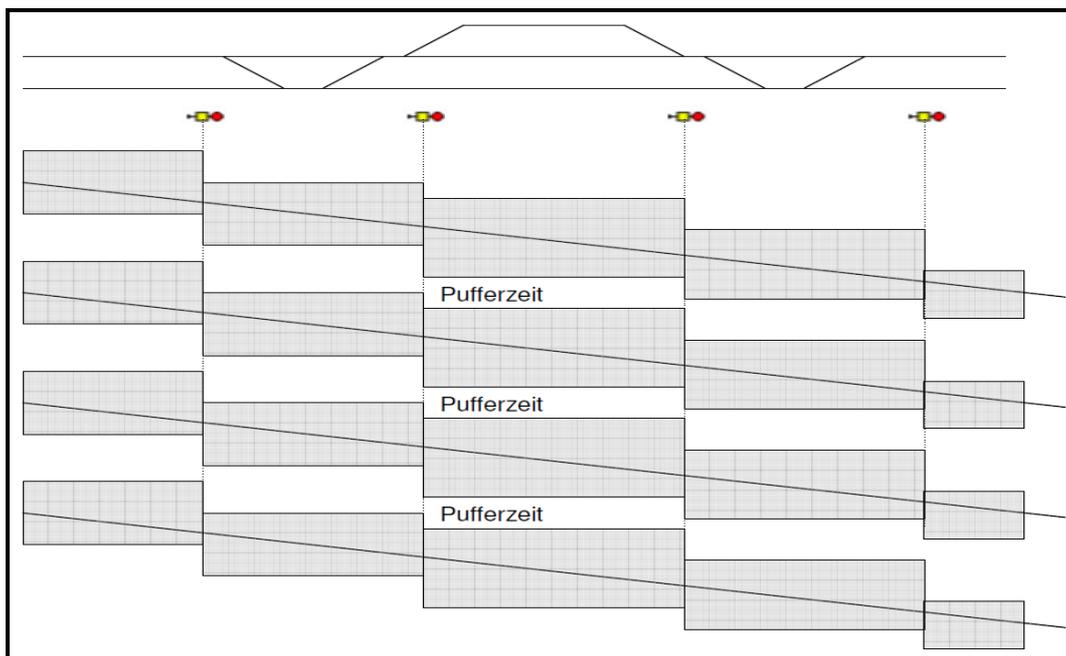


Abbildung 20: Darstellung von Pufferzeiten zwischen den Trassen bzw. Sperrzeiten

#### 4.2.1.2. Puffertrassen

Dieser Ansatz sieht keine Pufferzeit zwischen den einzelnen Trassen vor. Die Züge folgen einander im Mindestzugfolgeabstand. Dadurch werden im Störfall Verspätungen auf die nachfolgenden Züge übertragen und es kommt zu Folgeverspätungen. Das Einfügen von Puffertrassen soll ein Kollabieren des Systems bei Störungen verhindern. Diese Puffertrassen werden nicht wirklich vergeben, es handelt sich um fiktive Trassen, welche ausschließlich zur Stabilisierung des Systems im Störfall dienen (Abbildung 21).

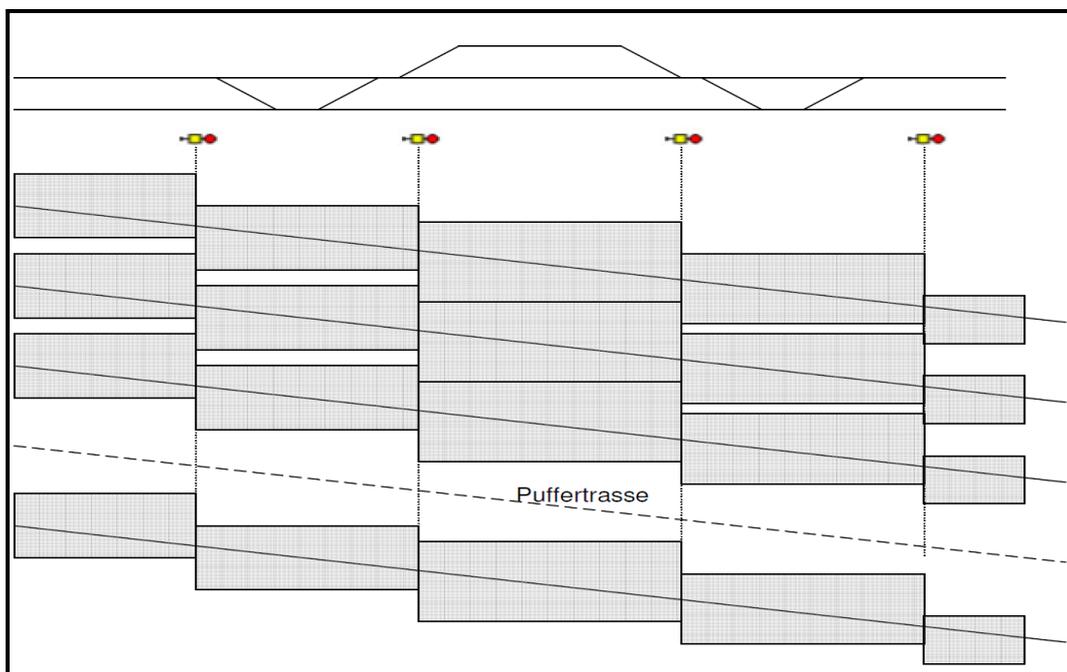


Abbildung 21: Darstellung von Pufferzeiten in einer Puffertrasse

Die zeitliche Lage der Puffertrassen soll in Abstimmung des Infrastrukturbetreibers mit den Eisenbahnverkehrsunternehmen erfolgen.

#### 4.2.2. Fahrzeitreserve

Die typische Fahrzeit umfasst einerseits die Basiszeit, andererseits die Zeitreserve.

Die Basiszeit ist die reine Fahrzeit, sie hängt nur von der Infrastruktur und dem Rollmaterial ab. Die Zeitreserve dient zur Kompensierung kleinerer

Unregelmäßigkeiten im laufenden Betrieb. Diese können zum Beispiel aufgrund kleinerer Verspätungen oder Überschreitungen der Haltezeit resultieren [UIC04].

Zur möglichst einfachen Ermittlung der Fahrzeitzuschläge, gibt es drei Arten der Anwendung:

- entfernungsabhängige Fahrzeitzuschläge (min/km)
- fahrzeitbezogene Fahrzeitzuschläge (%)
- konstante Fahrzeitzuschläge (min/Bf oder min/Knoten)

Der Regelzuschlag soll aus der Kombination von entfernungsabhängigem und die fahrzeitbezogenem Zuschlag in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und Anhängelast ermittelt werden. Bei Triebzügen hängt der Regelzuschlag nur von der Geschwindigkeit ab. Für Strecken unter 30km wird der Zuschlag nur fahrzeitbezogen berechnet [UIC00].

Beispielsweise wird bei Triebzügen der Regelzuschlag aus einem entfernungsbezogenen Anteil von 1min/100km und der fahrzeitbezogenen Werte aus der Tabelle 2 ermittelt.

$V_{max} \leq 140 \text{ km/h}$	141-160 km/h	161-200 km/h	201-250 km/h	>250 km/h
3%	4%	5%	6%	7%

**Tabelle 2: Fahrzeitabhängige Regelzuschläge lt UIC 451-1**

In der praktischen Umsetzung gibt es jedoch auch Bahnen, die höhere Fahrzeitreserven zur Erhöhung der Stabilität einplanen.

Insbesondere bei stark belasteten Strecken mit Kapazitätsengpässen kommt der Wahl der Fahrzeitreserve eine wesentliche Rolle im Kapazitätsverbrauch zu. Für die Verteilung dieser Fahrzeitreserve gibt es grundsätzlich zwei Varianten, welche in den nächsten beiden Kapiteln beschrieben werden.

#### **4.2.3. Fahrzeitreserve im stark belasteten Abschnitt**

Die konventionelle Methode sieht eine Erhöhung der Fahrzeit im jeweiligen Abschnitt vor. Durch diese Maßnahme wird die Fahrzeit im Abschnitt verlängert und dadurch die Leistungsfähigkeit verringert.

Die Fahrzeitreserven können auf der Strecke wie folgt verteilt werden:

- gleichmäßige Verteilung der Fahrzeitreserve:

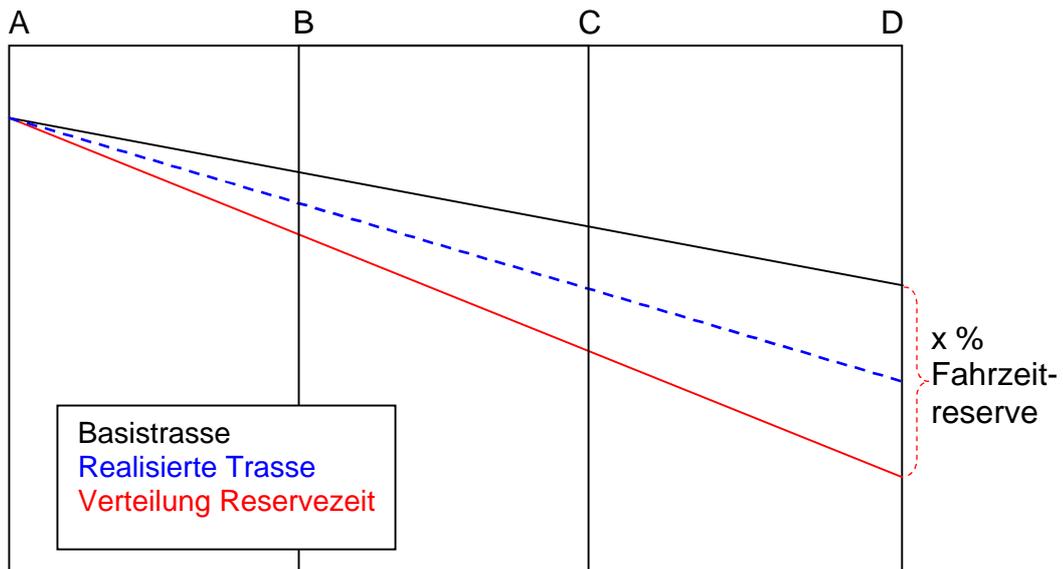


Abbildung 22: Gleichmäßige Verteilung der Fahrzeitreserven

- punktuelle Fahrzeitzuschläge in den Knoten:

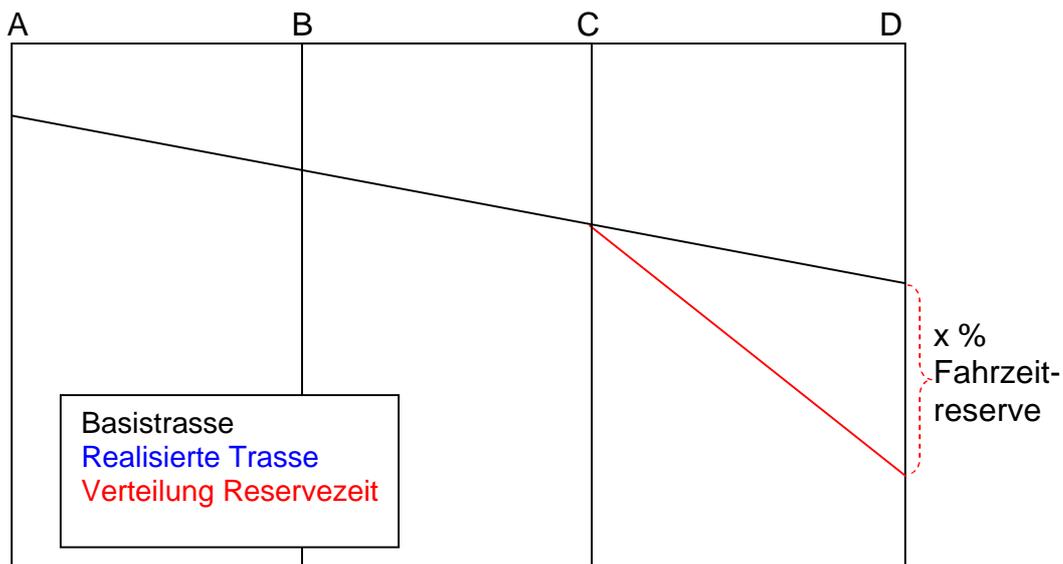


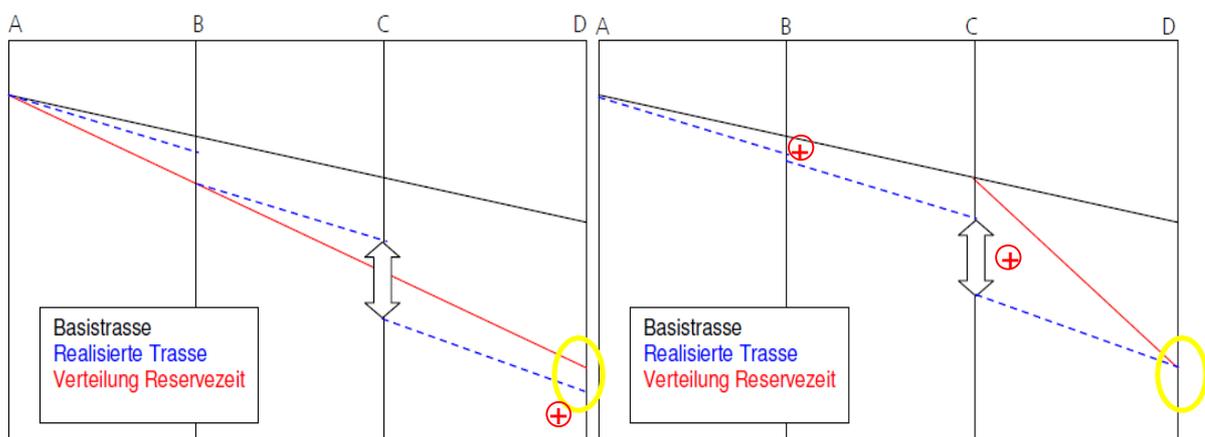
Abbildung 23: Punktuelle Verteilung der Fahrzeitreserven

Die Variante der gleichmäßigen Verteilung der Fahrzeitzuschläge wird bei den ÖBB durchgeführt, die punktuellen Fahrzeitzuschläge werden bei den SBB angewandt. Aus dem Vergleich der beiden Möglichkeiten wird deutlich, dass bei

gleichmäßiger Verteilung der Fahrzeitreserven die Qualität zu jeder Zeit messbar ist, sowohl am Endpunkt D, als auch in den Querschnitten B und C. Beim punktuellen Verfahren wird der gesamte Fahrzeitzuschlag am Punkt D eingebracht. In den Punkten B oder C ist eine Messung der Qualität bei diesem Verfahren nicht sinnvoll. Ziel dieser Maßnahme ist das pünktliche Erreichen von Knotenbahnhöfen, vermeintliche Verspätungen bei Zwischenhalten werden dadurch aufgeholt.

#### 4.2.3.1. Auswirkungen bei Störungen auf der Strecke

Hier werden die Auswirkungen einer Störung beim Halt in Station C verglichen. Es wird angenommen, dass eine größere Reisegruppe in der Station C einsteigt. Durch den Fahrgastwechsel verlängert sich die Stationsaufenthaltszeit.



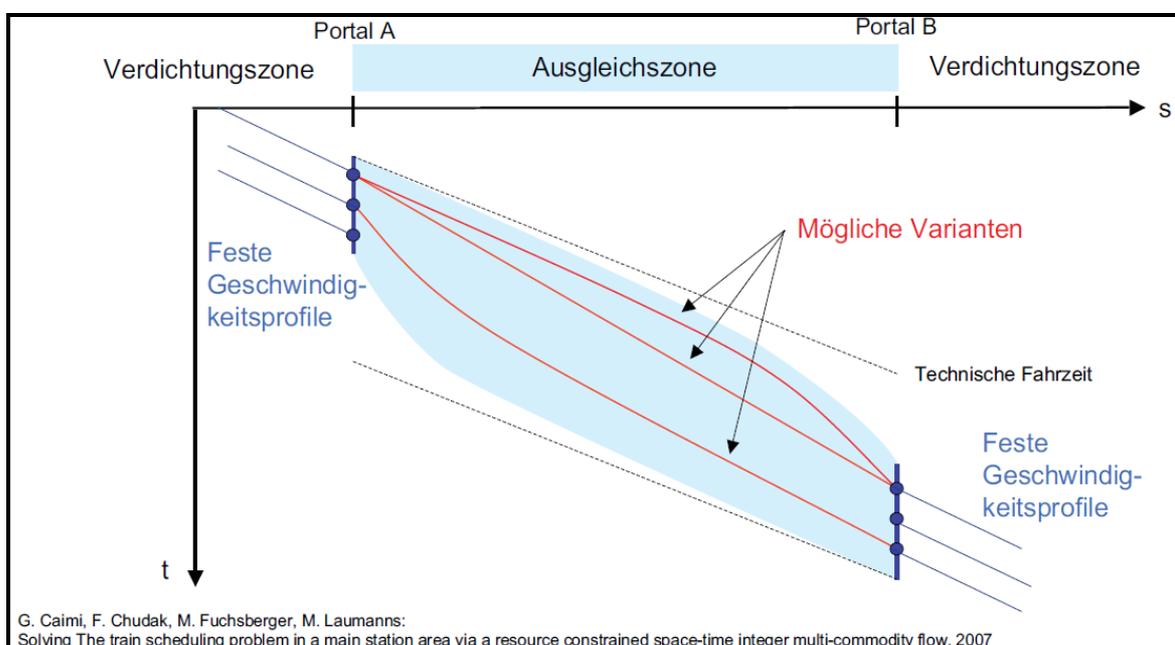
**Abbildung 24: Vergleich: gleichmäßige - punktuelle Verteilung der Reservezeit**

In Abbildung 24 ist erkennbar, dass bei der Variante mit gleichmäßiger Aufteilung der Reservezeiten, infolge der Einhaltung der planmäßigen Abfahrtszeit, eine spätere Abfahrt als bei der in B verspäteten Variante mit punktuellem Zuschlag eintritt. Die angenommene Störung in C führt zu einer längeren Aufenthaltszeit, wodurch in beiden Varianten Verspätungen zu verzeichnen sind. Während der Zug bei der punktuellen Zurechnung der Reservezeit jedoch pünktlich den Knotenbahnhof D erreicht, kommt der Zug bei der gleichmäßigen Verteilung verspätet in Bahnhof D an. Diese Aufteilung der Pufferzeit ist somit bei Qualitätsmessungen unbedingt zu beachten.

#### 4.2.4. Fahrzeitreserven in den Ausgleichszonen

Diese Aufteilung der Fahrzeitreserven soll eine maximale Auslastung eines Streckenabschnittes an der Kapazitätsgrenze gewährleisten. Bei einer maximalen Leistungsfähigkeit ist keine Kapazität für die Stabilität vorhanden. Die Stabilität muss also vor und hinter dem maßgebenden Bereich ausreichend gegeben sein.

Mit diesem Ansatz soll im Verdichtungsbereich eine maximale Auslastung erzielt werden. Die zeitlichen Reserven liegen in den angrenzenden Ausgleichsbereichen [LÜT08]. Als Ausgleichszone sind Streckenabschnitte mit ausreichender Kapazität geeignet (Abbildung 25).



**Abbildung 25: Trassenvarianten in der Ausgleichszone, fixe Trassen in Verdichtungszone [LÜT08]**

Auch bei S-Bahnstrecken kann es sinnvoll sein, im stark belasteten Abschnitt der Stammstrecke auf Fahrzeitreserven zu verzichten und stattdessen diese Reserven in den Ausgleichszonen zu platzieren. Als Ausgleichszonen bieten sich bei den S-Bahnssystemen die Außenäste an, wo aufgrund eines ausgedünnten Taktes eben auch die Kapazitätsreserven vorhanden sind.

## 5. Qualitätsmaßnahmen - Stabilität

### 5.1. Stabilitätsuntersuchungen von Fahrplänen

Pünktlichkeit und Stabilität gegenüber Störungen sind wichtige Kriterien zur Beurteilung der Qualität eines Fahrplankonzeptes [WBÜ08]. Die Fahrplanstabilität des realen Betriebes ist durch Vergleichen von Soll- mit Ist-Werten exakt messbar.

Eine Stabilitätsuntersuchung muss vor der betrieblichen Umsetzung erfolgen. Nur so kann ein stabiler, und vor allem kundenfreundlicher Fahrplan erstellt werden. Wesentliches Qualitätsmerkmal für den Fahrgast ist die realisierte Beförderungszeit (Abbildung 26).

<b>Realisierte Beförderungszeit</b>
<b>Fahrzeit</b>
+ Haltezeiten
+ Regel- und Sonderzuschläge
<hr/>
<b>Mindestbeförderungszeit</b>
+ Planmäßige Wartezeiten wegen belastungsbedingter Behinderungen
<hr/>
<b>Geplante Beförderungszeit</b>
+ Verspätungen
- Fahrzeitreserven
<hr/>
<b>Realisierte Beförderungszeit</b>

Abbildung 26: Realisierte Beförderungszeit [ÖBB00]

Die am stärksten belasteten Abschnitte von S-Bahnen werden von mehreren Linien befahren. Somit sind Stammstrecken offene Systeme, wo Züge ein- und ausfahren. Ein offenes System wird als lokal stabil bezeichnet, wenn die Summe der Verspätungen der hineinfahrenden oder im System beginnenden Züge kleiner als die Summe der Verspätungen der herausfahrenden oder im System endenden Züge ist [WBÜ08].

#### 5.1.1. Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung

Für den Nachweis der Stabilität wird eine Betriebsabwicklung der Züge in ihren geplanten Trassen durchgeführt. Die Simulation hat die Aufgabe, das spätere

Betriebsgeschehen nachzubilden, um so die Stabilität des Fahrplanes zu ermitteln.

Der nachgebildete Fahrplan wird mittels Einbruchs- und Urverspätungen aufgrund vorgegebener Verteilung gestört [GRÖ00].

Unter Einbruchsverspätung versteht man eine Verspätung am Beginn eines Untersuchungszeitraumes. Gründe können verspätete Bereitstellungen oder verspätetes Ankommen der Züge im Untersuchungsbereich sein [WEI00].

Als Urverspätung wird eine originäre Verspätung bezeichnet, die innerhalb des Eisenbahnnetzes, de facto innerhalb des Untersuchungsbereiches auftritt [WEI00]. Die bei planmäßigen Halten auftretenden Urverspätungen werden auch Haltverlängerungen genannt.

Als Folge der Verspätungen kann die geplante Fahrplantrasse nicht mehr eingehalten werden und es verändern sich die realisierten Fahrlagen. Es können Folgeverspätungen für bislang störungsfreie Zugfahrten entstehen. Um diese zu vermeiden, werden bewusst Fahrzeitreserven vorgehalten.

### **5.1.2. Kapazitätsmanagement bei den ÖBB**

Beim Kapazitätsmanagement bei den ÖBB erfolgt eine Bemessung der erforderlichen Fahrzeitreserven mit dem Programm „Roman D“. Fahrzeitreserven müssen nicht prozentuell hinzugerechnet werden, der Bearbeiter hat nachträglich die Möglichkeit, diese manuell zu beeinflussen. In Ausnahmefällen ist es möglich, die Fahrzeitreserven nicht linear, sondern punktuell anzusetzen [ÖBB00]. Diese Vorgehensweise kann bei stark belasteten Knoten sinnvoll sein, erfordert aber eine hohe Anforderung an den verantwortlichen Trassenmanager.

### **5.1.3. Das System BABS I**

Mit diesem auf der RWTH Aachen entwickelten System wird ein konfliktfreier Dispositionsfahrplan erstellt, der die aktuellen betrieblichen Rahmenbedingungen berücksichtigt. Ausgehend von geplanten Zugtrassen, Zugpositionen und Störungen wird, unter Betrachtung aller Züge eines Bereiches, ein neuer Fahrplan

erzeugt. Durch die simulierte Betrachtung von Störungen und ihren Auswirkungen für den Betriebsablauf können Anpassungen an geplante Zugtrassen erforderlich werden.

Die bei der Simulation eingestreuten Verspätungen müssen einzeln genau betrachtet werden. Daher sind mehrere Schritte für Aussagen über die Stabilität eines Fahrplanes notwendig. Es werden jedoch keinerlei Aussagen über die Leistungsfähigkeit gemacht, das bleibt den analytischen Verfahren vorbehalten [GRÖ00].

BABSI steht für BAhnBetriebsSimulation. Damit können nicht nur einzelne Strecken, sondern ganze Netze betrachtet werden. Die automatische Konfliktlösung schlägt keine anderen Optionen zur Konfliktlösung vor als bei manueller Betrachtung, kann allerdings mehrere Varianten prüfen. Der Einsatzbereich reicht von der strategischen Planung von Neubaustrecken bis zur Bewertung von bestehenden Infrastrukturen und Betriebsprogrammen, und ermöglicht durch kurzfristige Untersuchungen einen fließenden Übergang zur Disposition der Züge im Betriebsablauf. Laut [Gröger] steht mit BABSI ein Programm zur Verfügung, das neue Funktionalitäten bei der Konfliktlösung, der Simulation der Trassenvergabe und dem Nachweis der Stabilität realisiert [GRÖ00].

#### **5.1.4. Das System MakSi-FS**

In Zusammenarbeit von Deutscher Bahn und RWTH Aachen wurde ein stochastisches Verfahren entwickelt, welches eine Beurteilung hinsichtlich Pünktlichkeit und Stabilität ermöglicht. Anders als bei Monte-Carlo-Simulationen, wo zufällige Urverspätungen in den Betriebsablauf gestreut werden und das Ergebnis durch Mittelung der Simulationsläufe entsteht, berücksichtigt bereits ein einziger Simulationslauf der Software MakSi-FS alle möglichen Verspätungskonstellationen und ihre Auftretenswahrscheinlichkeit. Dadurch stehen in wenigen Minuten statistisch abgesicherte Werte zur Verfügung. Die Eingangsdaten setzen sich zusammen aus Infrastrukturdaten, Fahrplandaten, Reisendendaten und betrieblichen Daten [WBÜ08].

Ein wesentlicher Vorteil der Software ist die Möglichkeit zum Einfügen von Zusatzverkehren zu Starklastzeiten oder die über den Tag variierenden Wartestrategien [AKB08].

In einem ersten Schritt werden die Eingangsgrößen in das System integriert. Anschließend erfolgt die Ermittlung von Verspätungsminuten und die Berechnung des Medianwertes dieser Ankunftsverspätungen. Der Prozentualwert für die Planmäßigkeit und die Pünktlichkeit wird mithilfe der Verteilungsfunktion ermittelt. Die Stabilität beschreibt die Störfestigkeit eines Fahrplanes. Ein stabiler Fahrplan ist in der Lage, Einbruchs- und Urverspätungen sowie daraus resultierende Folgeverspätungen zu begrenzen und abzubauen [WBÜ08]. Der Ausnutzungsgrad der Reservezeiten zum Abbau von Verspätungen kann in MakSi-FS manuell bestimmt werden. Dieses Tool kann sowohl bei der Fahrplanerstellung, als auch bei strategischen Projekten angewandt werden.

Das System eignet sich auch zur Bestimmung der Stabilität in globalen Netzen, wie eben jenem der Schweiz. Der Vorteil für den Einsatz bei den SBB ist die enge Anlehnung an das System Viriato, wodurch die Schnittstelle kein Problem darstellt. Bei den SBB wurde die Frage nach der Veränderung der Fahrplanstabilität im Jahr 2008 im Vergleich zum Jahr 2007 plausibel beantwortet. Eingangsdaten sind dann keine Verteilungsfunktionen, sondern die aus „Open Time Table“ bekannten Werte [AKB08].

#### **5.1.5. Das Tool „Open TimeTable“**

Open TimeTable ist ein Werkzeug zur Analyse und Qualitätskontrolle von Fahrplänen. Dieses Tool wurde an der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit der SBB AG entwickelt [ULL03].

Mit Hilfe von Open TimeTable sollen Abweichungen der im täglichen Betrieb gefahrenen Zugfahrten signalisiert werden. Grundlage dafür ist die laufende Standorterfassung der Züge durch die Betriebsleitzentralen [OTT04].

Probleme regelmäßig verspäteter Züge können analysiert und eventuelle Korrekturen am Fahrplan vorgenommen werden. Durch eine Weiterentwicklung

der Software soll die Qualitätsuntersuchung automatisch erfolgen und im Anlassfall den Nutzer auf Qualitätsprobleme hinweisen.

Für die Auswertung sammelt das System automatisch betriebliche Grunddaten, es ist jedoch auch der Datenimport via RailML möglich. Das Programm Open TimeTable enthält für Untersuchungen die folgenden Module [ULL03]:

- Grafischer Fahrplan: Eine Analyse einzelner Korridore in einer wählbaren Zeitperiode ist möglich. Hier lassen sich neben dem Soll-Ist-Vergleich auch Werte wie Haltezeitüberschreitungen oder die Standardabweichung der Verspätungen darstellen.
- Verspätungsverteilungen: Stationsbezogen können Qualitätskontrollen mit variabel wählbaren Parametern durchgeführt werden. Zusätzlich ist eine Verspätungsentwicklung über den Tag oder auch das ganze Monat darstellbar.
- Trassenverteilung: Mithilfe dieses Moduls ist eine Analyse der Effektivität der Trassennutzung pro Stunde durchführbar.
- Automatische Analysen: Hiermit erfolgt eine permanente Auswertung der Daten. Darüber hinaus informiert das Tool den Benutzer, falls ein von ihm vorgegebenes Kriterium nicht eingehalten wird.

## 5.2. Stationsaufenthaltszeit

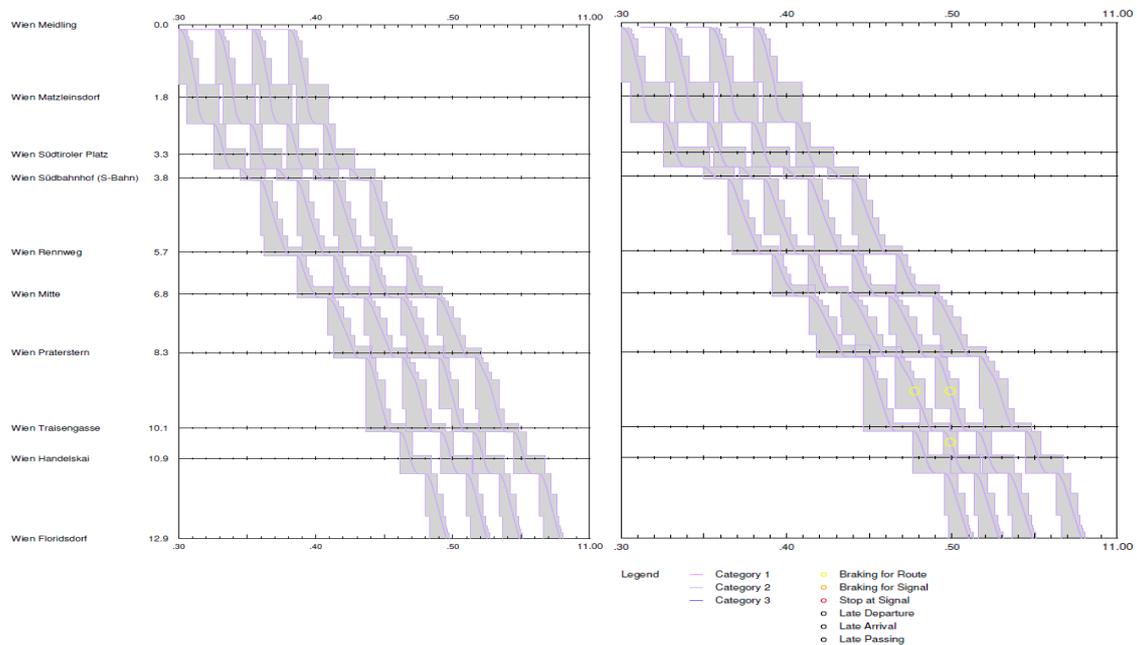
Die planmäßige Haltezeit setzt sich zusammen aus der aufgrund verkehrlicher oder betrieblicher Erfordernisse notwendigen Mindesthaltezeit und der Haltepufferzeit [WEI00]. Die Haltezeit wird maßgeblich beeinflusst durch die Fahrgastwechselzeit sowie die Abfertigungszeit durch den Zugbegleiter. Insbesondere bei Verspätungen kann eine kürzere Haltezeit erheblich zu einer Stabilisierung des Systems beitragen.

Die Einhaltung der Aufenthaltszeit wirkt sich wesentlich auf die Pünktlichkeit des Zuges und somit auf die Stabilität des Fahrplanes aus. Mindestaufenthaltszeiten sind in Österreich in den Schienennetznutzungsbedingungen angegeben und in Tabelle 3 angeführt [SNB08].

	Personenfernverkehr	Personennahverkehr
Großbahnhöfe	3 min	2 min
Knotenbahnhöfe	2 min	2 min
Unterwegsbahnhöfe	1 min	1 min
Haltestellen	1 min	0,5 min
Bedarfshaltestellen	1 min	0,2 min

**Tabelle 3: Mindestaufenthaltszeiten lt. Schienennetznutzungsbedingungen 2008**

In Abbildung 27 sind die Auswirkungen der Stationsaufenthaltszeit anhand einer Simulation auf der Schnellbahn-Stammstrecke Wien dargestellt. Die Annahme ist eine Verlängerung der Haltezeit von Zug 1 in drei Stationen (Wien Südtiroler Platz, Wien Praterstern, Wien Traisengasse), statt der geplanten 30sec auf 60sec. Die Haltezeitverlängerung wird auf die nächsten Züge übertragen und es ergeben sich Folgeverspätungen und Konflikte. Infolge der Ausnutzung der Kapazität durch hohe Zugzahlen und dem Kontext der geringeren Kapazität für Stabilität, kann die Beeinflussung durch eine solche Haltezeitverlängerung einen S-Bahnbetrieb für längere Zeit stören.



**Abbildung 27: Vergleich Bildfahrplan: reguläre Haltezeit 30sec (links)- Haltezeitverlängerung in 3 Stationen 30sec à 60sec (rechts)**

### 5.2.1. Abfertigung ZUB

Es ist die Aufgabe des Eisenbahnverkehrsunternehmens ein Verfahren festzulegen, dass eine sichere Zugfahrt gewährleistet wird. Das vom Eisenbahnverkehrsunternehmen eingesetzte Zugspersonal ist zuständig für die spezifischen, sicherheitsrelevanten Tätigkeiten im Zuge der Zugfahrt und muss die Abfahrtsbereitschaft des Zuges, durch die Einhaltung der vorgegebenen Verfahren, signalisieren. Die Abfahrtsbereitschaft eines Zuges ist die Mitteilung an den Triebfahrzeugführer, dass sämtliche Bahnhofstätigkeiten inkl. Fahrgastwechsel beendet sind und die Zugfahrt aus Sicht des verantwortlichen Personals zugelassen ist [TSI06].

In Österreich wird das Signal zur Abfahrt des Zuges durch die Zugbegleitmannschaft, letztendlich durch den an der Spitze befindlichen Zugbegleiter gegeben. Dieses Signal kann auch über andere technische Möglichkeiten gegeben werden [ÖBV09]. Für die optimale Ausnutzung der Kapazität von Eisenbahnstrecken ist die Einhaltung der pünktlichen Abfahrtszeit und der geplanten Stationsaufenthaltszeit von wesentlicher Bedeutung. Der Abfertigungsvorgang muss so gestaltet sein, dass dies gewährleistet ist.

## 5.2.2. Fahrgastwechselzeiten

Die Fahrgastwechselzeit ist ein wesentlicher Faktor der Haltezeit. In der Hauptverkehrszeit können dadurch Urverspätungen hervorgerufen werden.

Bei optimaler Fahrzeuggestaltung kann der Haltezeitbedarf deutlich gesenkt werden. Auf der TU Wien wurden zu Forschungszwecken 13.000 Fahrgastwechsellvorgänge analysiert. Der Einstiegsvorgang kann demnach in zwei Bereiche eingeteilt werden, nämlich in den Einstiegsbereich und in den Fahrzeuginnenraum. [TRÜ08].

Niveaufreie Einstiege haben nicht nur hinsichtlich Komfort, sondern auch für die Fahrgastwechselzeit Vorteile [TUN08]. Um eine optimale Fahrgastwechselzeit im Nahverkehr zu gewährleisten, spielt die Anordnung der Türen eine maßgebliche Rolle. Eine Anordnung der mindestens 1,40m breiten Türen in etwa in den Viertelpunkten des Fahrzeuggrundrisses hat sich als sinnvoll erwiesen [TRÜ08]. Dadurch werden die maximal notwendigen Wege für den Fahrgast zu den Einstiegen verkürzt. Als positiver Effekt dieser Anordnung zeigt sich auch die rasche Aufteilung der Reisenden im Fahrzeug.

Da in der Reduktion der Fahrgastwechselzeit ein wesentlicher Beitrag zur Einhaltung der Haltezeit und der Stabilität des Fahrplanes liegt, haben speziell Hersteller von Nahverkehrsfahrzeugen und Eisenbahnverkehrsunternehmen diese Anordnung in der Konzeption ihrer Fahrzeuge umgesetzt. Insbesondere bei S-Bahnen wird dieser Thematik erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt. Nahezu auf allen größeren S-Bahnnetzen werden solche Fahrzeuge eingesetzt. Bei dem von Stadler hergestellten Fahrzeug für die S-Bahn Zürich, erkennt man die gleichmäßige Aufteilung der Einstiege über den gesamten Zug.

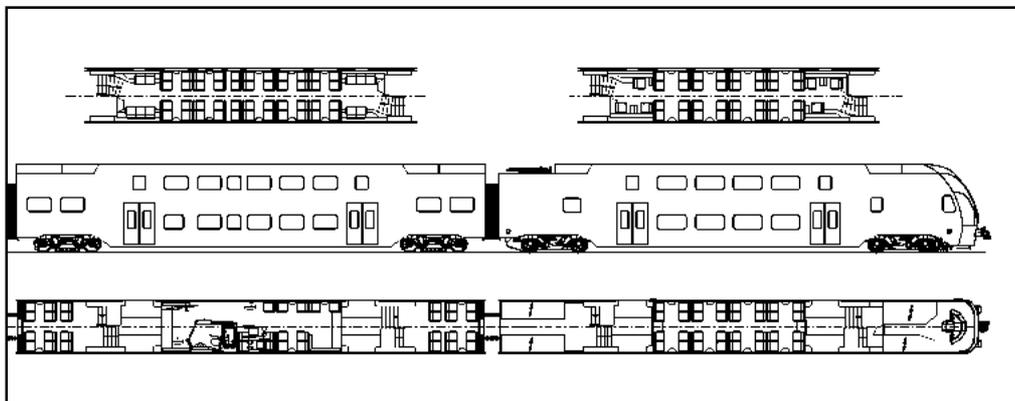


Abbildung 28: Beispiel eines modernen Fahrzeugs für die S-Bahn Zürich [stadlerrail.com]

### 5.2.3. Rechnerische Methode zur Abschätzung der Haltezeit [FRI1]

Der Zeitbedarf an Haltestellen setzt sich im Wesentlichen aus der Zeit für den Abfertigungsvorgang der Fahrzeuge und der Fahrgastwechselzeit zusammen. Auf der Universität Hannover wurde in einem Projekt diese Komponente der Gesamtfahrzeit für den Kunden näher untersucht.

Auf Grundlage der Ergebnisse empirischer Studien, von Expertengesprächen und einer umfangreichen Literaturanalyse wurde ein Verfahren zur Abschätzung von Haltestellenaufenthaltszeiten entwickelt. Das Ziel sind gesicherte Werte für die Gestaltung von Fahrplänen zu erhalten, welche auf den fahrzeugtechnischen und betrieblichen Rahmenbedingungen basieren.

Der gesamte Haltezeit ist beschrieben durch:

$$t_{HZ} = t_B + t_{FGW} + t_A$$

Die Variablen  $t_B$  und  $t_A$  kennzeichnen die Zeit bis zum Beginn der Wechselzeit bzw. die Zeit zwischen dem Ende der Fahrgastwechselzeit und der Abfahrt des Zuges.

Die wichtige Komponente der Fahrgastwechselzeit  $t_{FGW}$  ist durch folgende Formel beschrieben:

$$t_{FGW} = t_m * f_x * (m_E + m_A)$$

Aus der Formel wird deutlich, dass die Fahrgastwechselzeit abhängt von der mittleren spezifischen Fahrgastwechselzeit  $t_m$ , Korrekturfaktoren  $f_x$  und der Anzahl an Ein- und Aussteigern.

Die Stationsaufenthaltszeit ist somit die Summe von verschiedensten Faktoren, angefangen vom Fahrzeug, über die Schnittstelle Fahrzeug-Bahnsteig und die Fahrgastwechselzeit bis zur menschlichen Komponente im Zuge des Abfertigungs- und Abfahrtsvorganges.

### 5.3. Betriebslenkung

Im Eisenbahnbetrieb werden schon heute Zuglaufregelungen durch Disponenten beeinflusst. Dies geschieht nicht ausschließlich mit Sicherungs- und Zugbeeinflussungssystemen. In Deutschland werden dem Triebfahrzeugführer Anweisungen und Informationen in der Regel mündlich per Zugfunk mitgeteilt [DBB1]. Mit zunehmender Abweichung vom Fahrplan steigt die Notwendigkeit, Informationen aus den Dispositionszentralen an den Triebfahrzeugführer weiterzugeben. Zur Bewältigung von betrieblichen Störungssituationen wird in den Dispositionszentralen eine große Zahl an Mitarbeitern benötigt.

Bei den ÖBB gibt es zu diesem Zweck die Verkehrsleitungszentrale als oberste Entscheidungsinstanz bei aktuellen Fragen der Disposition. Zusätzlich gibt es regionale Betriebslenkungszentralen. Dieses System ist mit hohem manuellen Aufwand verbunden. Bei fahrplanmäßigem Verlauf der Züge ist es wenig gefordert, bei Abweichungen zum Fahrplan in Krisensituationen jedoch hat es eine hohe Anzahl dispositiver und administrativer Aufgaben zu erfüllen.

Die Komplexität besteht darin, dass es sich bei den S-Bahnsystemen um verteilte Systeme handelt. Das sind miteinander gekoppelte Systeme (Betriebsstellen), wo eine Aufgabe von mehreren Verarbeitungseinheiten (Stellwerken) durchgeführt wird [BLI02].

#### 5.3.1. Vorausschauende Betriebslenkung

Mit Hilfe des Programmes Open Track wird der Unterschied zwischen drei definierten Fahrweisen auf einem bestimmten Streckenabschnitt analysiert. Für diesen Zweck wurde die Strecke zwischen den Stationen „Wien Südtiroler Platz“ und „Wien Matzleinsdorfer Platz“ als zu untersuchender Bereich gewählt (Abbildung 29).

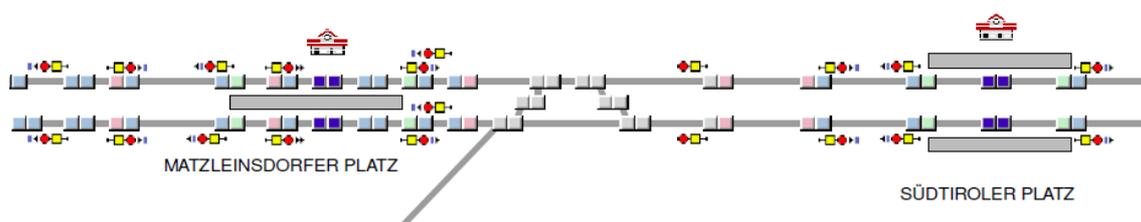


Abbildung 29: Untersuchter Abschnitt mittels Open Track

### 5.3.1.1. Freie Fahrt mit der Streckenhöchstgeschwindigkeit

Diese Simulation zeigt eine ungestörte Fahrt von „Wien Südtiroler Platz“ nach „Wien Matzleinsdorfer Platz“. Für die Strecke wird im Optimalfall eine Zeit von ca. 1:53Min benötigt.

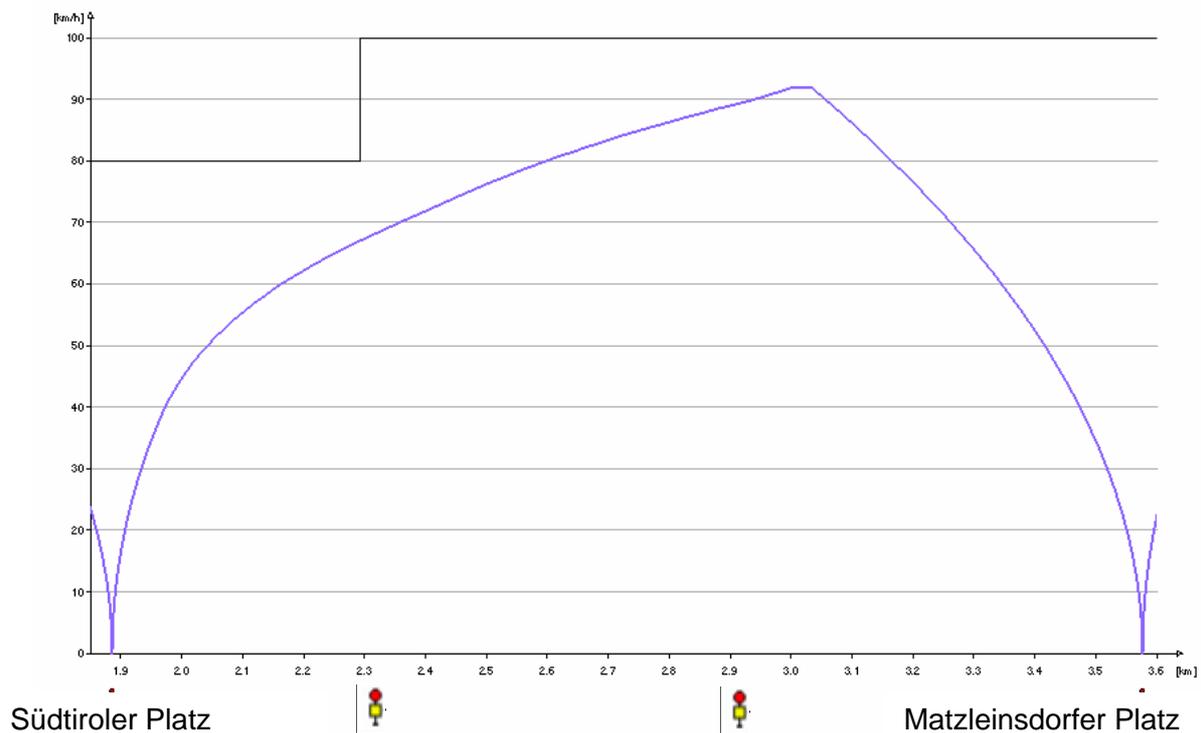
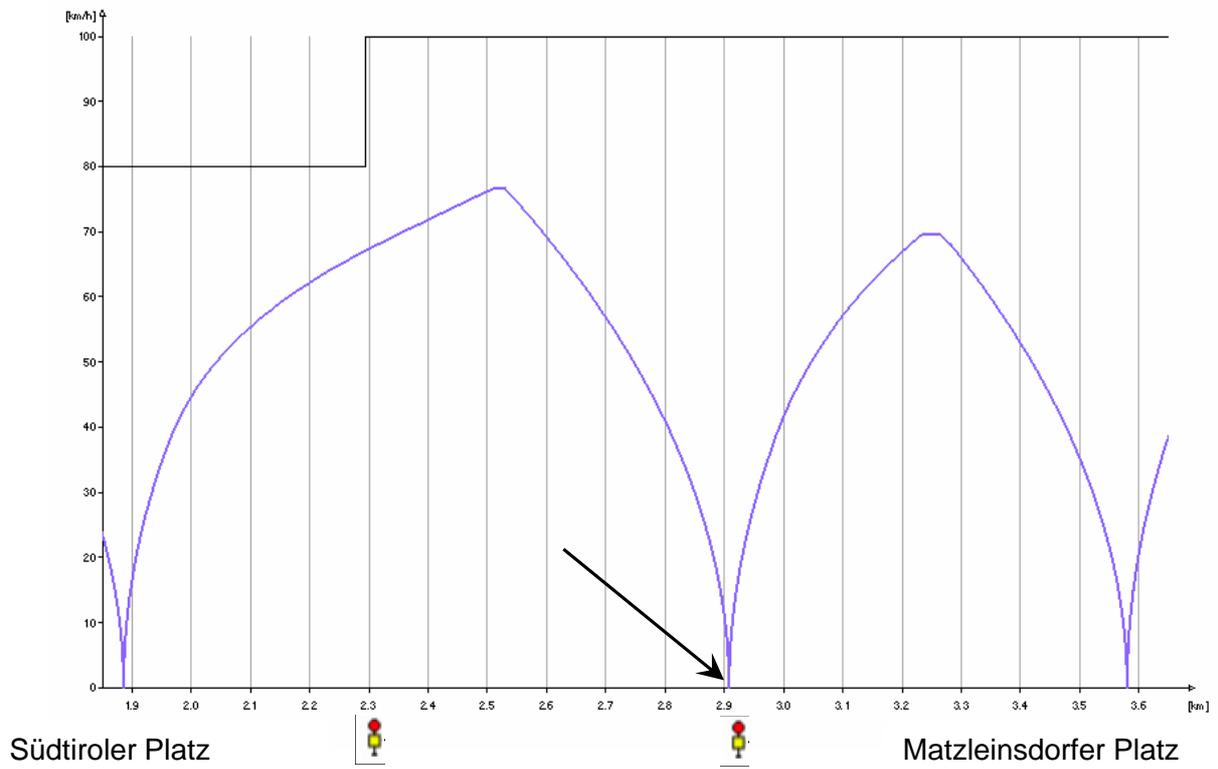


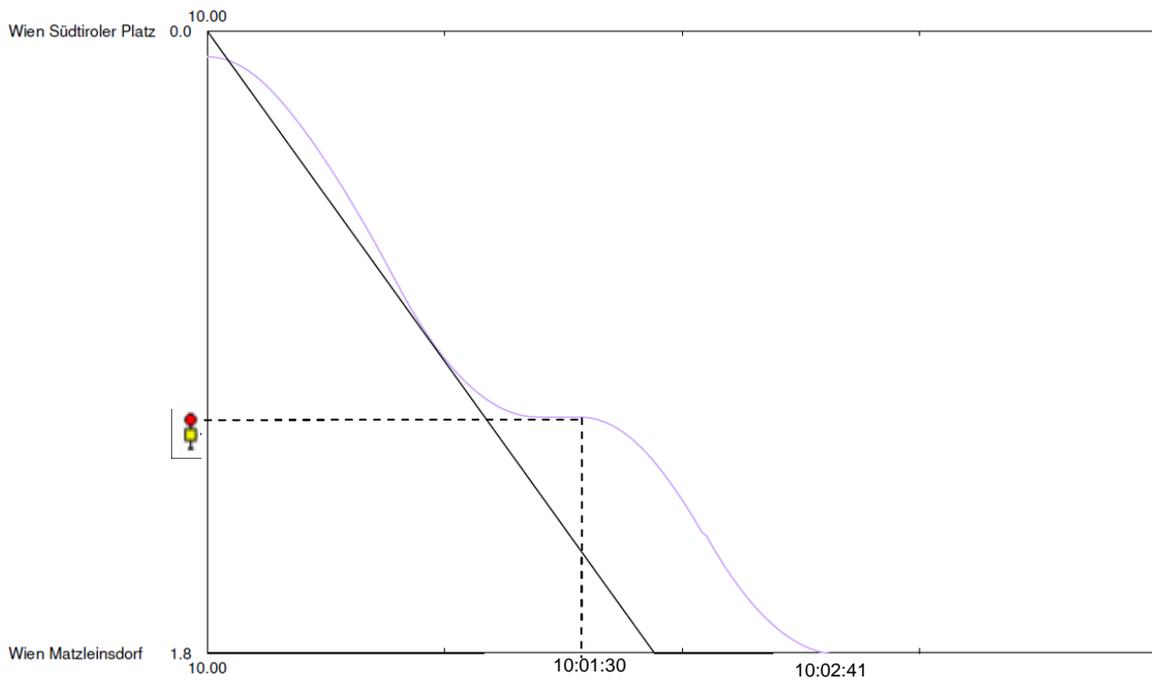
Abbildung 30: Geschwindigkeit-Weg-Diagramm Freie Fahrt

### 5.3.1.2. Variante: Halt beim Signal

Im zweiten Simulationsvorgang wird ein belegter Blockabschnitt durch einen vorfahrenden Zug simuliert. Der Blockabschnitt ist 1:30Min nach der Startzeit befahrbar. Der Zug erreicht das Signal nach 1:24Min und muss halten, er setzt sich dann inkl. Reaktionszeit nach 10Sec in Bewegung. Sein Ziel erreicht der Zug nach 2:41Min. Durch Beschleunigungs- und Abbremsvorgang ergibt sich eine Fahrzeitverlängerung von 48Sec im Vergleich zu einer konfliktfreien Fahrt. Die Zeit zwischen Einfahrtsignal und dem Bahnsteig beträgt 1:12Min. Im Geschwindigkeit-Weg-Diagramm in Abbildung 31 erkennt man den Halt beim Signal, in der Abbildung 32 ist das dazugehörige Zeit-Weg-Diagramm des Zuges dargestellt.



**Abbildung 31: Geschwindigkeit-Weg Diagramm Variante: „Halt beim Signal“**



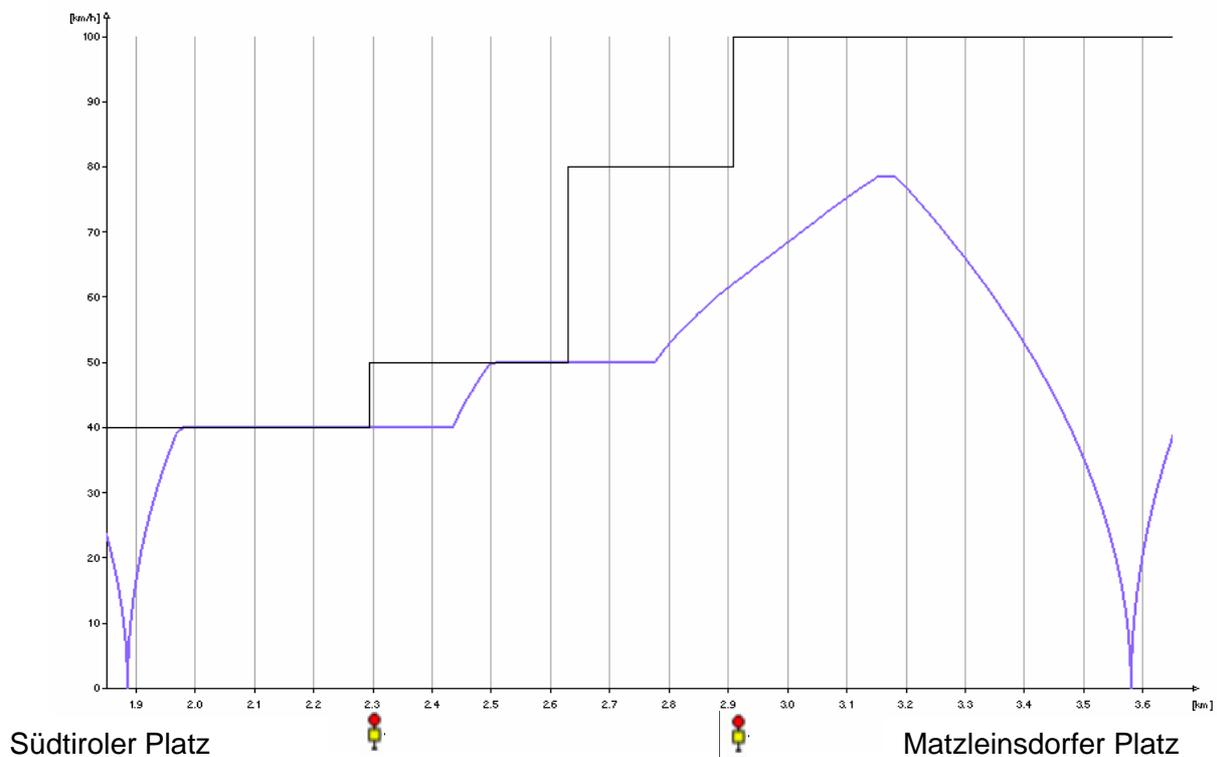
**Abbildung 32: Zeit-Weg-Diagramm Variante: „Halt beim Signal“**

### 5.3.1.3. Variante: Fahrt mit reduzierter Höchstgeschwindigkeit zum Signal

In diesem Simulationsvorgang wurde die gleiche betriebliche Ausgangssituation wie in Variante „Halt beim Signal“ angenommen. Jedoch wird bei dieser Variante dem Triebfahrzeugführer die betriebliche Situation mitgeteilt. Die Reaktion ist eine verminderte Geschwindigkeit, um das Signal knapp nach Freiwerden des folgenden Blockabschnittes zu erreichen, ohne davor halten zu müssen.

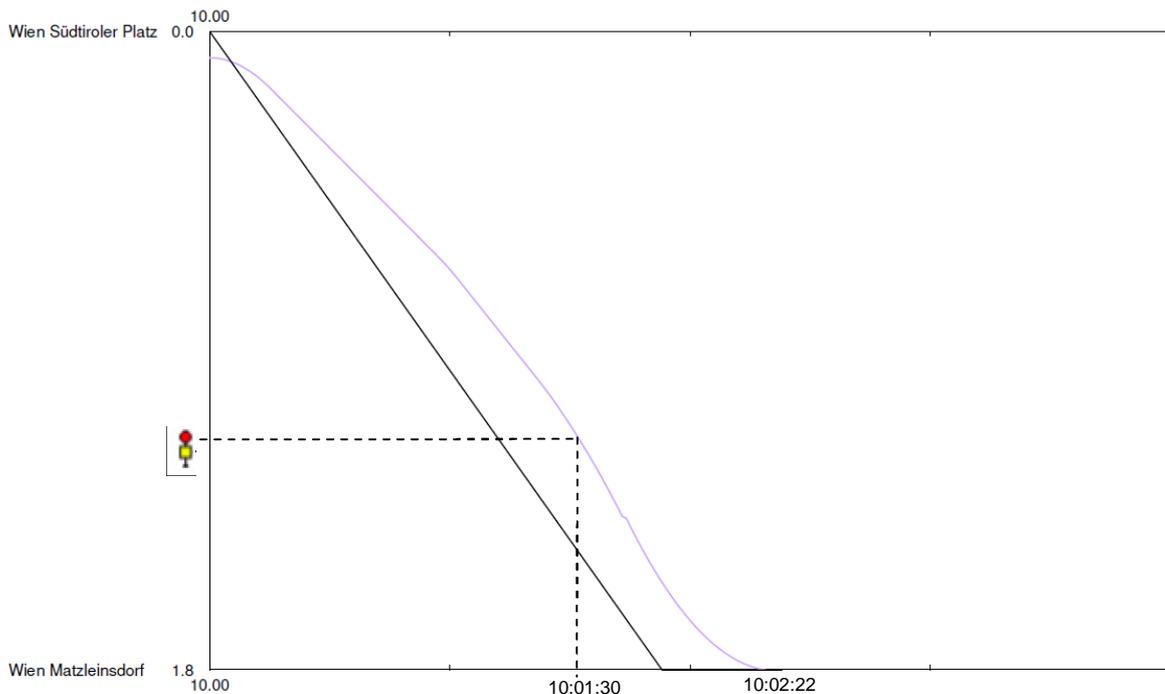
Mit dieser Fahrweise erreicht der Zug nach 2:22Min die Station „Wien Matzleinsdorfer Platz“. Die Zeit zwischen Einfahrsignal und Bahnsteig beträgt 56sec, ist also um 19Sec kürzer als in der Variante „Halt vor dem Signal“.

Im Kontext bedeutet das eine kürzere Belegung des Abschnittes und somit einen geringeren Verbrauch der Infrastrukturkapazität.



**Abbildung 33: Geschwindigkeit-Weg Diagramm Var.: „ Reduzierte Höchstgeschwindigkeit“**

In Abbildung 33 dargestellt ist die Geschwindigkeits-Weg-Linie des Zuges. Durch die verminderte Geschwindigkeit wird ein außerplanmäßiges Halten beim Signal verhindert. Noch deutlicher ist dies im Zeit-Weg-Diagramm (Abbildung 34) erkennbar.



**Abbildung 34: Zeit-Weg Diagramm Var.: „ Reduzierte Höchstgeschwindigkeit“**

Als positiver Nebeneffekt ist ein deutlich geringerer Energieverbrauch durch den ausbleibenden Anhalte- und Beschleunigungsvorgang zu verzeichnen.

#### 5.3.1.4. Conclusio

Durch eine vorausschauende Betriebslenkung („Zuglaufoptimierung“) kann der Kapazitätsverbrauch pro Zug, insbesondere bei potenziellen Konflikten, deutlich verringert werden. Als Folge können bei Anwendung dieser Methode der Betriebslenkung die Fahrzeitreserven in der Planung reduziert werden. Im Beispiel ergibt sich eine Reduktion der Fahrzeitverlängerung um fast 40%.

	Fahrzeit	Freie Fahrt	Halt bei Signal	Red. Vmax
Freie Fahrt	1:53	X	- 0:48	- 0:29
Halt bei Signal	3:00	+ 0:48	X	+ 0:19
Reduzierte Vmax	2:44	+ 0:29	- 0:19	X

**Tabelle 4: Vergleichsmatrix: Fahrzeiten und Fahrzeitunterschiede im Untersuchungsgebiet**

## **6. Strategien für eine effiziente Kapazitätsausnutzung**

Viele Eisenbahnstrecken werden an den Grenzen der Kapazität betrieben. Insbesondere gilt dies für viele S-Bahn-Strecken. Auch zukünftig werden diese Bahnen eine wichtige regionale Komponente zur Befriedigung des Mobilitätsbedürfnisses darstellen.

Durch zunehmende Stauerscheinungen auf den Straßen, wächst die Forderung nach mehr Fahrgastkapazitäten. Daher sind, vor allem in der Hauptverkehrszeit, mehr Regional- und S-Bahnzüge nötig. Unter diesen Umständen werden die Reservezeit und die Zugfolgeabstände verkürzt, und folglich die Stabilität und die Robustheit gesenkt.

Stabilität ist die Fähigkeit des Systems, kleine Abweichungen im Ist-Prozess wieder an den Soll-Prozess heranzuführen, während die Robustheit die Fähigkeit des Systems ist, seine Funktionen trotz Störungen und Ausfällen weitestgehend zu erhalten [WEI08]. Diese beiden Faktoren haben direkten Einfluss darauf, ob ein Fahrgast pünktlich an sein Ziel gelangt.

Um die Marktanforderungen nach Leistungsfähigkeit und Qualität befriedigen zu können, ist es also notwendig, die bestehenden Kapazitäten besser auszunutzen.

### **6.1. Klassische Kapazitätserweiterung**

Unter klassischer Kapazitätserweiterung versteht man eine Kapazitätsausweitung mittels Infrastrukturausbauten. Diese können einerseits die Gleisanlagen an sich beinhalten, andererseits die Sicherungsanlagen [WEI08].

Wesentliche Probleme bei diesen Maßnahmen sind:

- Die finanziellen Mittel stehen nicht im nötigen Umfang zur Verfügung.
- Der Zeithorizont ist zu groß.
- Der Platzbedarf für Erweiterungen der Bahnanlagen steht in dicht bebauten Innenstädten nicht zur Verfügung.

Während der Bauzeit haben die Arbeiten an und um die Eisenbahnanlagen wesentlichen Einfluss auf den Betrieb. Eine zukünftige Kapazitätssteigerung hat bei einer baulichen Maßnahme im laufenden Betrieb mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Kapazitätsverringerung während der Bauzeit zur Folge. Mit der Errichtung neuer Infrastruktur steigt auch der Erhaltungsaufwand. Ein sinnvoller und zielgerichteter Infrastrukturausbau ist dort durchzuführen, wo keine Möglichkeiten zur besseren Ausnutzung der vorhandenen Kapazität gegeben sind, oder, wo diese im Zuge einer Umsetzung eines systemumfassenden Konzeptes unbedingt erforderlich ist.

### **6.1.1. Kapazitätserweiterung durch Sicherungssysteme**

Im Eisenbahnwesen wird zwischen den folgenden Zugsicherungssystemen unterschieden:

- Fahren auf Sicht
- Fahren im festen Raumabstand
  - Signale + punktförmige Zugbeeinflussung
  - Linienförmige Zugbeeinflussung
- Fahren im wandernden Raumabstand

Das System „Fahren auf Sicht“ kommt nur bei geringen Geschwindigkeiten zum Einsatz. Bei der Vollbahn gibt es auf freien Strecken in der Regel keine Zugsfahrten mit Fahren auf Sicht. Diese Systeme sind jedoch bei Straßenbahnen im Einsatz.

„Fahren im wandernden Raumabstand“ ist ein System mit „mit dem Zug mitwandernden“ Blöcken, dem sogenannten „Moving Block“, welches in Zukunft als ETCS Level 3 in Betrieb genommen werden soll. Durch dieses Fahren im Bremswegabstand kann die Leistungsfähigkeit eines Streckenabschnittes maximal ausgenutzt werden. Ein „Moving Block“ wird nicht durch Streckenelemente, sondern durch quasi-permanente Standortmeldung des Zuges begrenzt. Der Zeitpunkt für die flächendeckende Umsetzung von ETCS Level 3 ist noch nicht

fixiert. Die Technik des „Moving Block“ wird derzeit nur in isolierten Teilnetzen mit einheitlichem Fahrzeugpark eingesetzt [KRÜ03].

Diese beiden Systeme sind für die bestehenden S-Bahnstrecken nicht relevant und werden aus diesem Grund im Rahmen dieser Arbeit nicht näher behandelt.

Genauer analysiert wird das Fahren im festen Raumabstand, wo ortsfeste Abschnitte durch jeweils einen Zug belegt werden.

### **6.1.2. Fahren auf Signal**

Dazu wird die Strecke in Blockabschnitte unterteilt. Je enger die Blockabschnitte sind, desto höher wird die Leistungsfähigkeit. Ein Signal deckt den jeweils nächsten, ortsfesten Raumabstand ab.

Die Aufteilung der Signale ist optimal, wenn die Belegungszeiten der Blockabschnitte gleich sind, sodass die aus dem Betriebsprogramm vorgegebenen Mindestzugfolgezeiten in jedem Abschnitt eingehalten werden. Es sind also zeitgleiche, keine raumgleichen Blockabstände anzustreben. Wenn der Vorsignalabstand der Blockabschnittslänge entspricht, ist die Anzahl der Signale hinsichtlich der Leistungsfähigkeit optimal [ORS08].

Grundsätzlich können folgende Signalbegriffe unterschieden werden [THM05]:

- Signalisierung freier Fahrweg: grundsätzliche Information, ob der folgende bzw. die folgenden Blockabschnitte befahrbar sind
- Signalisierung der zulässigen Geschwindigkeit: Information über die maximale Geschwindigkeit nach dem Signal
- Sonstige Informationen: Spezielle Vorgaben für Verhaltensweisen von Triebfahrzeugführern

Bei der Anordnung der Signale und der zugeordneten Abschnitte wird unterschieden zwischen der Einzelabschnittssignalisierung, der Zweiabschnittssignalisierung und der Signalisierung über mehr als zwei Abschnitte (Abbildung 35). Bei der Einzelabschnittssignalisierung gibt das Signal Informationen über genau einen Abschnitt. Bei der Zweiabschnittssignalisierung ist das Hauptsignal gleichzeitig Vorsignal für den nächsten Abschnitt und zeigt die

Begriffe „Halt“, „Halt erwarten“ (=nur ein Abschnitt frei) und „Freie Fahrt“ (=mind. zwei Abschnitte frei). Bei beiden Systemen ist die Blockabschnittslänge größer als der Bremsweg. Bei der Signalisierung über mehr als zwei Abschnitte unterschreitet der Signalabstand die Bremsweglänge. Dieser Zustand mit sehr kurzen Blockabschnitten erhöht die Leistungsfähigkeit der Strecke. Als Form für die Signalisierung kommt das sogenannte Auf- und Abwerten des Signalgeschwindigkeitsbegriffes (Heruntersignalisieren), somit die Vorgabe einer konkreten Geschwindigkeit zum Einsatz. Durch diese Geschwindigkeitseinschränkung wird gesichert, dass der Zug zu jedem Zeitpunkt rechtzeitig vor einer Kollision mit dem vorfahrenden Zug zum Stillstand kommt. Diese Variante ist bei Systemen mit Haupt- und Vorsignal die einzige Möglichkeit zur Mehrabschnittssignalisierung. Die beiden anderen möglichen Varianten werden auf Grund der Nicht-Verwendung in den untersuchten Ländern lediglich angeführt, nicht jedoch konkretisiert. Diese sind die „Dreiabschnittssignalisierung und Verwendung der Vorwarnung“ und die „Dreiabschnittssignalisierung unter Verwendung der Vorsignalwiederholung“ [THM05].

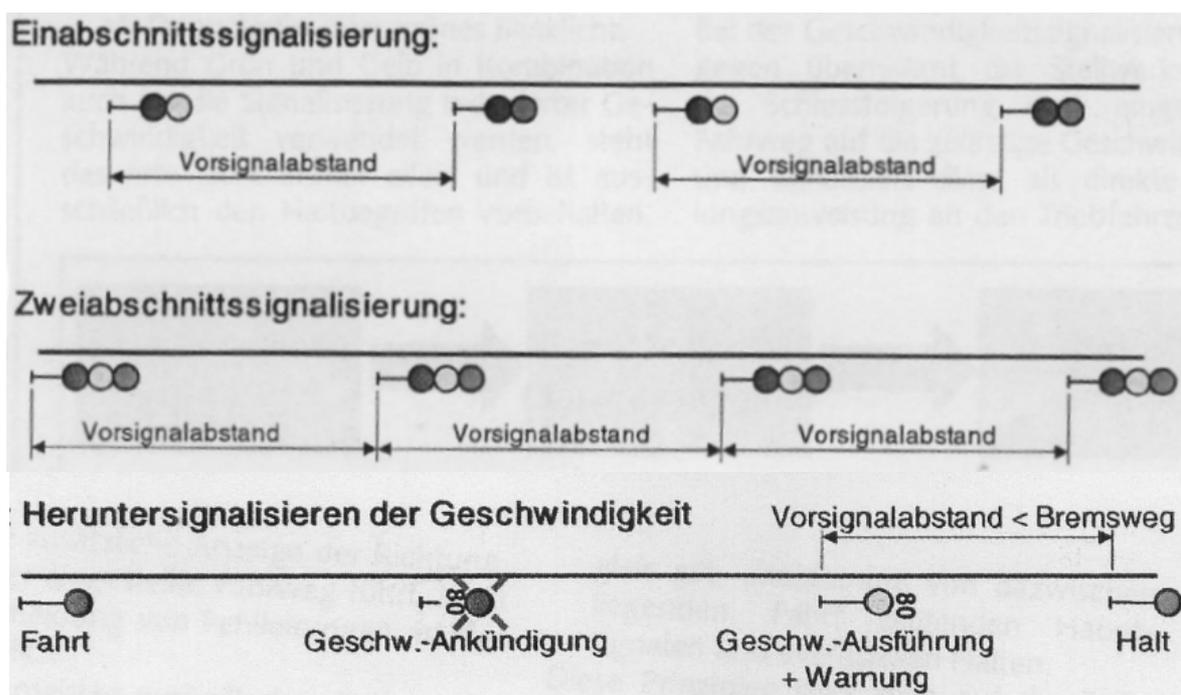


Abbildung 35: Signalisierungen des freien Fahrweges [THM05]

### 6.1.2.1. Die Blockteilung

Bei innerstädtischen S-Bahnen mit kurzen Blöcken wird zu einem großen Teil die Zweiabschnittssignalisierung angewandt. Die beiden wesentlichen Ansätze zur Blockteilung für innerstädtische S-Bahnen werden im folgenden dargestellt:

- Die Blocklänge entspricht dem Haltestellenabstand: Der Block reicht vom Kopfende des Bahnsteiges bis zum Kopfende des Bahnsteiges in der nächsten Haltestelle. Erst wenn der Zug in der nächsten Haltestelle den Block geräumt hat, kann der nachfolgende Zug in den Block einfahren [ÖPN09].

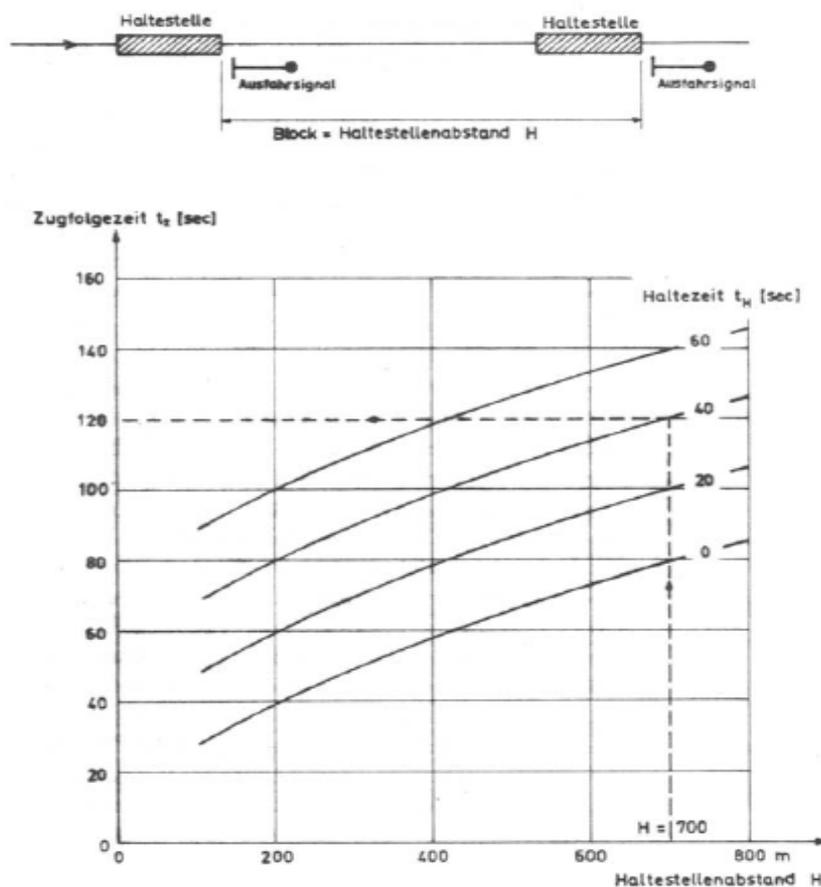


Abbildung 36: Blocklänge ist gleich Haltestellenabstand [ÖPN09]

- Die Blocklänge ist kleiner als der Haltestellenabstand: Der Abstand zwischen den Haltestellen ist in zwei Blöcke aufgeteilt. Die Zugfolgezeit

kann entweder abhängig sein von der Länge des Blockabschnittes 1 oder von der Stationsaufenthaltszeit des Zuges in der Haltestelle [ÖPN09].

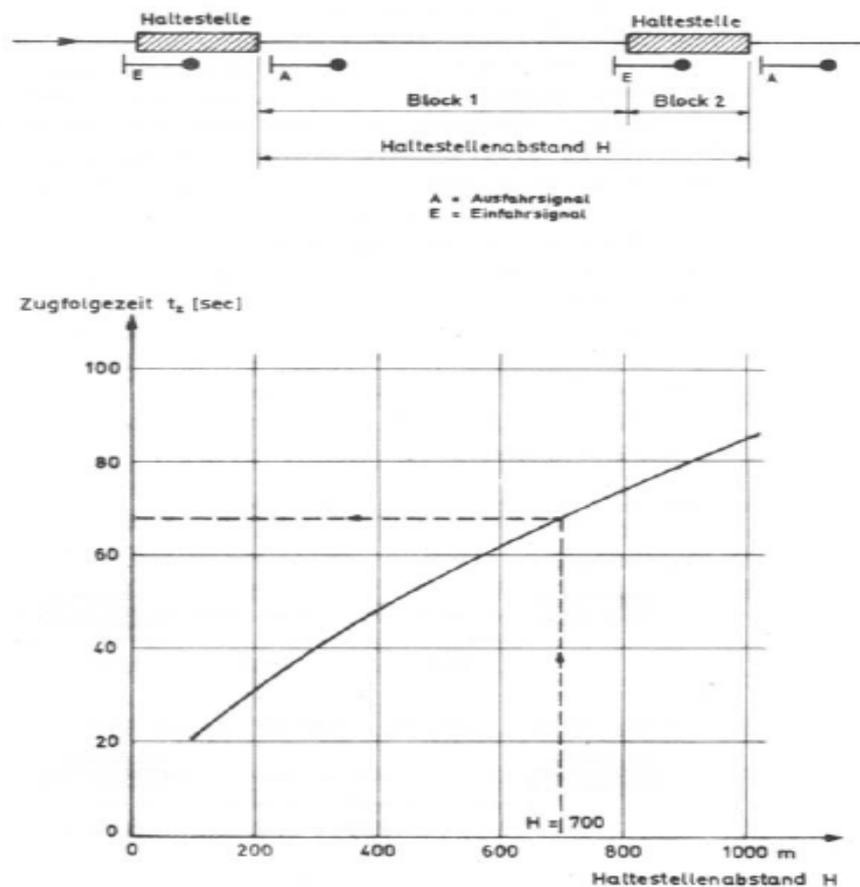


Abbildung 37: Der Haltestellenabstand ist in 2 Blöcke aufgeteilt [ÖPN09]

Diese beiden Signalisierungsarten sind durch die engen Haltestellenabstände bei den Stammstrecken der S-Bahnen vorhanden. Um eine höhere Leistungsfähigkeit bei „Fahren im festen Raumabstand“ zu erzielen gilt es also die Blockabschnitte zu optimieren. Diese Variante ist bei bestehenden Streckenabschnitten, wo die Haltestellenabstände gleichzeitig Blockabschnitte sind, in der Regel nicht durchführbar. Daher wurde bei der S-Bahn Zürich eine besondere Art der Blockteilung, der sogenannte Kurzblock angewendet. Das sind Blockabschnitte mit verkürzten Regelabständen, wo der Regelbremsweg länger ist als die Signalabstände. Daher muss der Bremsvorgang durch eine besondere Signalisierung auf mehrere Blockabschnitte verteilt werden (siehe Kapitel 3.3.1).

### 6.1.3. Zugbeeinflussungssysteme für Fahren im festen Raumabstand

#### 6.1.3.1. Punktförmige Zugbeeinflussungssysteme: Indusi, PZB 90, ETCS Level 1

Eine punktförmige Zugbeeinflussung ist ein System, das nur an diskreten Punkten Informationen vom Fahrweg an den Zug übermitteln kann. Ein solches System dient der Erhöhung der Sicherheit. Die punktförmige Zugbeeinflussung ist eine Ergänzung zum ortsfesten Signalsystem und soll überwachen, ob der Triebfahrzeugführer die Signalinformation in seiner Fahrweise tatsächlich umsetzt [NAP02].

Einige wesentliche Systeme der punktförmigen Zugbeeinflussung werden hier kurz vorgestellt.

- Indusi: Die induktive Zugsicherung ist bei der DB und bei den ÖBB im Einsatz. Dieses System wurde bereits in den 1930er-Jahren entwickelt. Es basiert auf aktiven Gleismagneten bei den Signalen. Der Triebfahrzeugführer muss bei einer Vorbeifahrt am Signal eine Wachsamkeitstaste betätigen, sonst wird der Zug zwangsgebremst. Zusätzlich wird am Zug eine Bremswegüberwachung durchgeführt. Falls der Zug nicht innerhalb einer festgelegten Zeit die Geschwindigkeit auf ein bestimmtes Maß reduziert hat, wird ebenfalls automatisch eine Zwangsbremmung eingeleitet [NAP02].
- PZB 90: Diese ist eine Weiterentwicklung der Indusi. Der Vorteil dieses Systems ist das breite Aufgabengebiet [HAW10]:
  - Wachsamkeitsüberprüfung: Überwachung der Wahrnehmung der Signalinformation durch den Triebfahrzeugführer
  - Fahrsperrfunktion: sofortige Zwangsbremmung bei unzulässiger Vorbeifahrt an einem Signal
  - Überwachung Bremsfahrt: Sicherstellung einer ausreichenden Geschwindigkeitsreduktion
  - Überwachung eines gegen ein Halt zeigendes Signal an- bzw. weiterfahrenden Zuges: Begrenzung der Fahrgeschwindigkeit des Zuges, um bei einem Fehlverhalten möglichst rasch eine Zwangsbremmung einzuleiten

- Geschwindigkeitsüberwachung: punktuelle oder kontinuierliche Überwachung der Höchstgeschwindigkeit
- ETCS Level 1 (European Train Control System Level 1): Bei diesem System besteht ein volles ortsfestes Signalsystem. Die signaltechnische Infrastruktur kann unverändert beibehalten werden. ETCS L1 dient lediglich zur Harmonisierung der punktförmigen Zugbeeinflussung. Die Informationsübertragung erfolgt über Eurobalisen [NAP02]. ETCS L1 gehört zur Klasse der punktförmigen Übertragungssysteme mit kontinuierlicher Überwachung [KRÜ03].

#### 6.1.3.2. Linienförmige Zugbeeinflussungssysteme: LZB, ETCS Level 2

Bei punktförmigen Systemen wird der Triebfahrzeugführer zwar über Geschwindigkeitsbegrenzungen gewarnt und auch punktuell kontrolliert, eine Fehlhandlung ist jedoch nicht auszuschließen. Im Gegensatz dazu besteht der Fortschritt von linienförmigen Zugbeeinflussungssystemen in der ständigen Überwachung und sicheren Führung des Zuges [KRÜ03]. Die beiden Systeme LZB und ETCS Level 2 werden hier nun näher vorgestellt.

- LZB (linienförmige Zugbeeinflussung): Der funktionale und sicherungstechnische Fortschritt der LZB ist die Übernahme der vollständigen Verantwortung für die Führung des Zuges. Eine Fehlhandlung des Triebfahrzeugführers wird ausgeschlossen. Eine Zugsicherung ist hier nur möglich, wenn die Position des Zuges bekannt ist. Um dies zu gewährleisten sind Linienleiter im Gleis verlegt. Diese Linienleiter werden in einem regelmäßigen Abstand gekreuzt, wodurch die Position des Zuges durch Phasenwechsel erkannt wird. Ebenso wird eine kontinuierliche Überwachung der Geschwindigkeit ermöglicht. Die Informationsübertragung erfolgt ohne streckenseitige Signale [KRÜ03]. Dadurch kann beispielsweise ein Blockabschnitt des ortsfesten Signalsystems durch Einrichten von LZB-Blockstellen in mehrere LZB-Blockabschnitte unterteilt werden. Diese werden durch LZB-Blockkennzeichen markiert [NAP02]. Dadurch wird eine höhere Zugdichte möglich, wie beispielsweise bei der Münchner S-Bahn (siehe Kapitel 3.3.2).

- ETCS Level2: Die Funktionalität ähnelt jener der LZB. Die Informationsübertragung erfolgt jedoch nicht über Linienleiter, sondern über GSM-R. Die Züge orten sich selbsttätig, mithilfe von Eurobalisen, und melden ihre Position in regelmäßigen Abständen an die Funkblockzentrale. Die Funkblockzentrale verwaltet die Zugdaten und erteilt die Fahrerlaubnisse. Das Prinzip des Fahrens im festen Raumabstand wird auch bei diesem System angewandt [NAP02]. Bei ETCS Level 2 werden keine ortsfesten Signale benötigt. Dadurch können die Blockabstände kurz gehalten und optimiert werden, um so eine hohe Leistungsfähigkeit zu erzielen.

## **6.2. Effizienter Kapazitätsverbrauch**

Heutzutage sind bei einigen Systemen, speziell bei S-Bahnen, die begrenzten Kapazitäten ausgeschöpft. Es muss daher nach Möglichkeiten gesucht werden, diese vorhandenen Kapazitäten optimal auszunutzen.

Eine Steigerung der Kapazität bestehender Strecken und Knoten lässt sich erreichen durch:

- Vergrößerung des Transportvolumens pro Zug
- Reduzierung des Kapazitätsverbrauches
- Verbesserung des Betriebsflusses

Die angeführten Punkte dienen einer intensiven Nutzung des vorhandenen Netzes ohne größere Investitionen in die Infrastruktur [OET08].

Die Vergrößerung des Transportvolumens sowohl in der Länge, begrenzt durch die Bahnsteiglängen, als auch in der Höhe, durch den Einsatz von Doppelstockzügen, ist bei den meisten S-Bahnsystemen nahezu ausgereizt.

Die Reduzierung des Kapazitätsverbrauches und die Verbesserung des Betriebsflusses lassen sich im weitestgehenden Sinne auf eine optimierte Betriebslenkung zusammenfassen.

Geforderte Leistungssteigerungen können bei Netzteilen, die bereits an der Kapazitätsgrenze betrieben werden, künftig kaum noch durch Infrastrukturbauten

erreicht werden. Der Schwerpunkt muss auf neue Planungsmethoden und innovative Betriebsprozesse gesetzt werden [STL04].

Die Herausforderung liegt darin, auch bei einer erhöhten Zugzahl, die Stabilität und Robustheit zu gewährleisten. Bei hohen Zugzahlen kann es jedoch passieren, dass ein Streckenabschnitt in einer Weise belastet wird, für die diese Infrastruktur nicht konzipiert wurde. Das Resultat sind Folgeverspätungen, nicht nur auf dem betroffenen Streckenabschnitt, sondern durch die Verspätungsübertragung auch auf dem ganzen Netz.

Erforderlich sind neue Strategien mit Fokus auf den Planungs- und Betriebsprozessen, mit welchen sich Leistungsfähigkeit und Pünktlichkeit effizient und in kurzer Zeit steigern lassen [LWB09].

Diese Vorgaben erfordern einen gesamtheitlichen Prozess von der Fahrplankonstruktion bis zur Betriebslenkung.

### **6.2.1. Präzise Bemessung der Pufferzeiten und Zeitzuschläge im Netz**

Die Fahrpläne sind derzeit in der Regel auf ganze Minuten erstellt. Insbesondere bei den S-Bahnen und/oder Regionalverkehren mit ihren häufigen Halten, sind diese Angaben zu unpräzise. Wie [Laube] und [Lüthi] in ihren Untersuchungen herausgefunden und dargestellt haben, müssen die Fahrpläne für eine Leistungssteigerung im Eisenbahnverkehr sekundengenau erstellt werden [LLÜ08]. Das betrifft nicht nur die Fahrzeiten, sondern auch die Haltezeiten, welche aufgrund der Wichtigkeit für den täglichen Eisenbahnbetrieb sehr genau erforscht sind (siehe Kapitel 5.2).

Ein sekundengenaue Fahrplan ist die Grundlage für die weiteren Arbeitsschritte. Die Größe und Anordnung von Pufferzeiten zwischen den Zügen sowie die Fahrzeitzuschläge entlang der Zugläufe können mit dem Ziel optimiert werden, den Anteil an Pufferzeiten und damit an der nicht genutzten Kapazität in Engpassbereichen zu reduzieren [LLÜ08].

Heute ist es in der Praxis meist so, dass die minimale Fahrzeit um einen bestimmten Prozentsatz erhöht wird, um so die fahrplanmäßige Fahrzeit zu

erhalten. Diese Methode ist bei Strecken, die mit höchstmöglicher Leistungsfähigkeit betrieben werden sollen, nicht sinnvoll.

### 6.2.2. Disposition im Eisenbahnbetrieb

Im heutigen Eisenbahnbetrieb ist durch Maßnahmen des Disponenten nur ein begrenztes Maß an Flexibilität vorhanden. Die Interaktion des Disponenten mit dem Triebfahrzeugführer erfolgt größtenteils über Signale und die Zugsicherung. Lediglich in Ausnahmefällen werden Daten manuell per Zugfunk an den Triebfahrzeugführer weitergegeben (Abbildung 38).

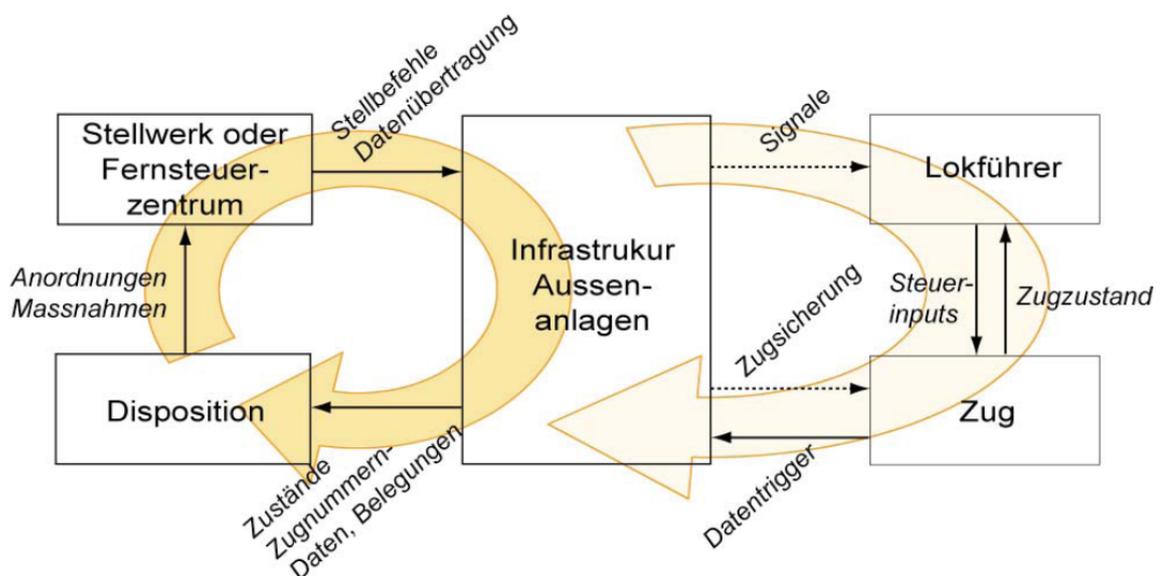


Abbildung 38: Disposition und Eisenbahnbetrieb heute [LÜT08]

Um eine Leistungssteigerung von stark belasteten Systemen zu erreichen, bedarf es neuer Methoden und Verfahren.

Es ist eine grundsätzlich neue Philosophie der Betriebsleitung notwendig:

- Heute: Erkennung von Soll-Ist-Abweichungen und Wieder-Angleichung des Ist-Betriebes an die Soll-Vorgaben

- Zukünftig: Neuplanung des Systems unter Berücksichtigung des realen Betriebszustandes und Überführung der Züge in ein neues betriebliches Optimum

Dies erfordert die Fähigkeit, das Gesamtsystem oder Teile davon während des laufenden Betriebes innerhalb kürzester Zeit neu zu planen und zu optimieren [WEI08].

Disponenten können im Störfall aufgrund der Vielzahl an Abhängigkeiten kaum mehr selbstständig optimale Lösungen für Konflikte entwickeln. Auch wenn die endgültige Entscheidung in jedem Dispositionssystem beim Menschen liegt, so soll in Zukunft anstelle der manuellen, heuristischen Suche nach der besten Lösung ein formalisierter und computerunterstützter Prozess mitwirken. Kern ist ein dynamischer Rescheduling Prozess, der in Echtzeit basierend auf den aktuellen Zuständen neue konfliktfreie, sekundenscharfe und gleisgenaue Fahrpläne für sämtliche Züge berechnet [LLÜ08].

### **6.2.3. Echtzeitdisposition mit optimierter Zugsteuerung – Real Time Rescheduling**

Real Time Rescheduling beschreibt einen Prozess, bei dem für aktuelle Zustände der Infrastruktur und der betrieblichen Rahmenbedingungen ein neue konfliktfreie und sekundengenaue Produktionspläne generiert werden [PUL07]. Bei diesem Prozess handelt es sich somit um einen rückgekoppelten Regelkreis.

Das Optimierungspotenzial kann gesteigert werden, wenn Triebfahrzeugführer und Zugbegleiter ständig über einen, an die geänderten betrieblichen Randbedingungen angepassten, Fahrplan und über die abweichende Lage des Zuges informiert werden. Ziel ist es, diese Vorgaben dem Triebfahrzeugführer über geeignete Anzeigegeräte mitzuteilen und damit ein sekundengenaues Anpassen des Fahrverhaltens zu regeln [LLÜ08].

Die Kombination von Echtzeitdisposition mit präziser Zugsteuerung wird als Integrated Real Time Rescheduling bezeichnet. Mit diesem System lassen sich vorhandene Kapazitäten optimal nutzen.

Voraussetzungen für ein solches System sind [LLÜ08]:

- Eine kontinuierliche Erfassung und Übermittlung der Zugzustände an die Betriebsleitung. Diese umfassen eine Zugüberwachung hinsichtlich Position, Geschwindigkeit und zeitliche Abweichung vom vorgegebenen Fahrplan.
- Berechnung neuer Fahrpläne in Echtzeit. Dieser Schritt soll erfolgen, wenn eine Notwendigkeit aus betrieblicher Sicht (Konflikt mit anderem Zug) oder aus zeitlicher Sicht (Verspätung) gegeben ist.
- Direkter Datentransfer des neu berechneten Fahrplanes zum Führerstand und Darstellung für den Triebfahrzeugführer.

Der Zugverkehr muss kontinuierlich überwacht werden, um Abweichungen rascher zu erkennen und gegebenenfalls Gegenmaßnahmen einleiten zu können.

Integrated Real Time Rescheduling bietet ein hohes Potenzial, um die Kapazität bei gleichbleibender Stabilität zu steigern. Dafür benötigt Integrated Real Time Rescheduling eine sehr hohe Präzision in der Produktion und rasche Reaktionen bei Störungen [LÜT09].

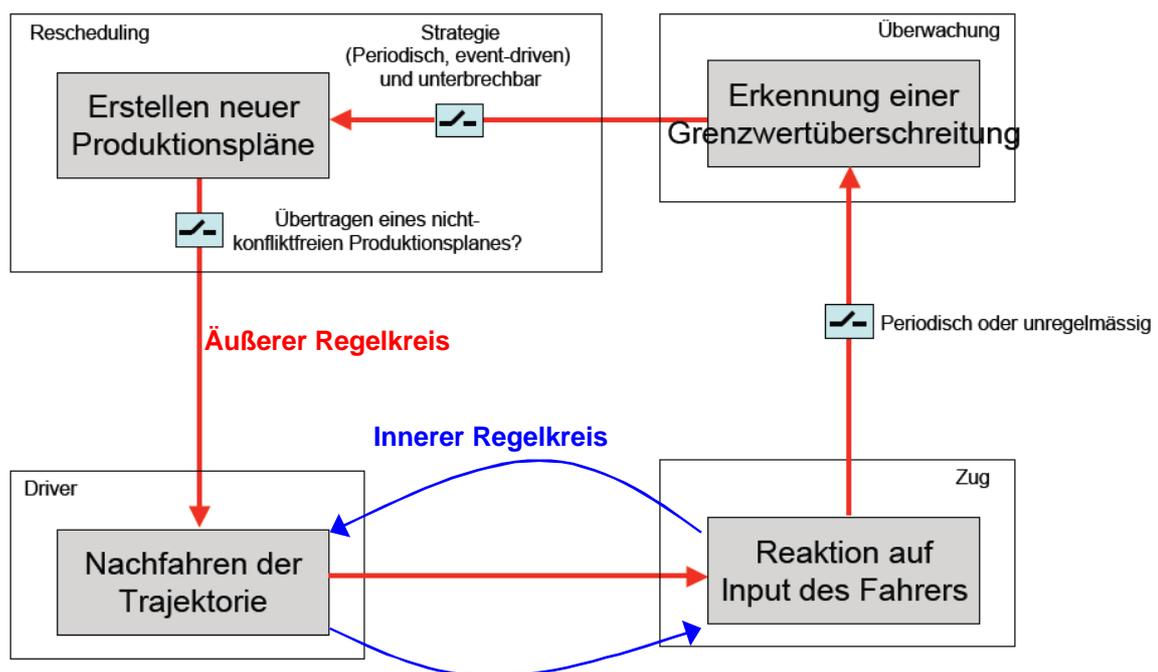
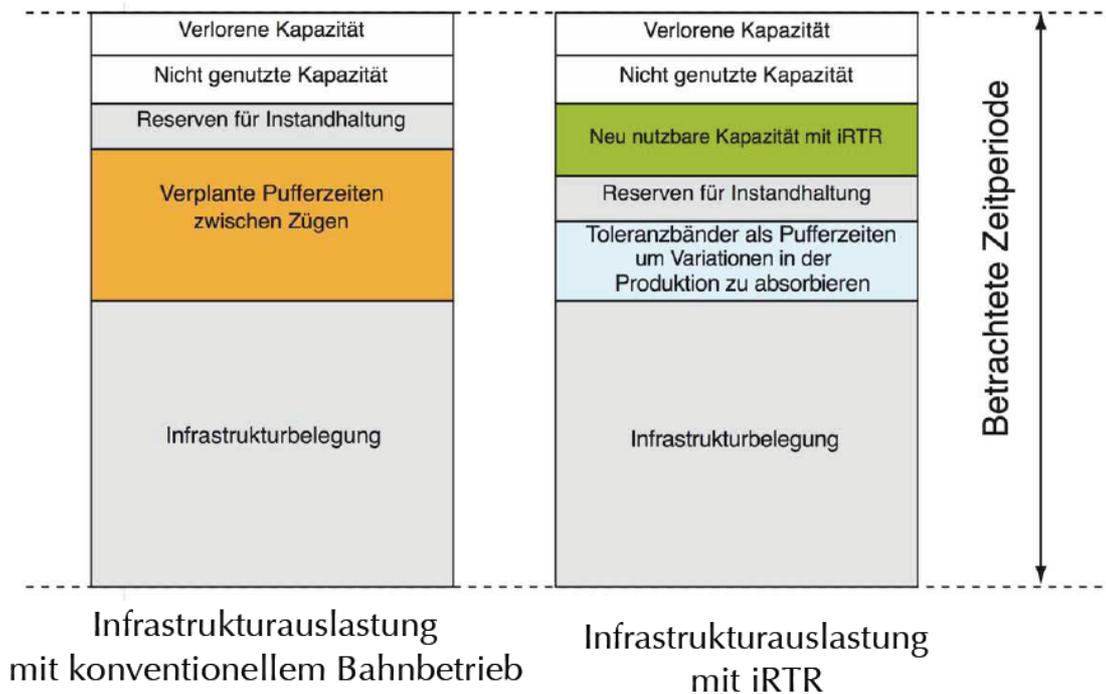


Abbildung 39: Darstellung der Grundidee eines Real Time Rescheduling Systems [LÜT06]

In Abbildung 39 ist ein solcher Eisenbahnbetrieb mit überlagerten, rückgekoppelten Regelkreisen dargestellt. Das System zur Disposition kommuniziert zeitgleich mit mehreren Zügen. Wichtig ist die kontinuierliche Rückkopplung der Disposition mit den Zügen und der Infrastruktur. Eine Analyse wird vom System automatisch durchgeführt. Geprüft wird, ob eine Abweichung größer als eine vorher definierte Abweichung ist, oder, ob es aufgrund der aktuellen betrieblichen Situation zu Konflikten mit anderen Zügen kommen kann. Ist das der Fall, soll bei diesen Systemen in Echtzeit ein neuer konfliktfreier Fahrplan errechnet werden. Dieser wird an die Anzeigergeräte in den Führerständen übermittelt und der Triebfahrzeugführer kann die Fahrt den Gegebenheiten anpassen. Durch die Reaktion des Triebfahrzeugführers, ändert sich der Zustand des Zuges in Lage und Geschwindigkeit. Diese Daten werden wiederum an die Disposition übertragen und eine Analyse wird durchgeführt und der Regelkreis beginnt von Neuem. So wird durch eine kontinuierliche Überwachung und Rückkopplung in jeder betrieblichen Situation die für diesen Zeitpunkt notwendige Maßnahme eingeleitet. Ein solches System ist in punkto Reaktionsvermögen und Ergreifung von Maßnahmen gegenüber einem Menschen als Disponent überlegen.

Durch rasches Handlungsvermögen können verplante Pufferzeiten zwischen Zügen wesentlich reduziert werden und der Kapazitätsverbrauch des einzelnen Zuges sinkt. Vergleicht man die Kapazitätsbilanz zwischen einem konventionellen Bahnbetrieb mit jenem mit Integrated Real Time Rescheduling, so werden neue nutzbare Kapazitäten geschaffen, ohne an Stabilität einbüßen zu müssen (Abbildung 40).



**Abbildung 40: Vergleich des Kapazitätsverbrauches für bestehende und angestrebte Planungs- und Betriebsprozesse [LÜT09]**

Solche Systeme eines umfassenden Ansatzes zur Optimierung von stark belasteten Strecken befinden sich in einigen Ländern gerade in der Entwicklung oder in der Testphase. Im Zuge dieser Arbeit werden drei europäische Ansätze aufgezeigt: Das „PULS 90“ wird in der Schweiz bei der SBB Division Infrastruktur, das System „Free Float“ in Deutschland bei der DB Netz AG und das System „Het Spoor Meester“ in den Niederlanden von Pro Rail entwickelt und getestet. Anschließend wird die Umsetzbarkeit von Real Time Rescheduling bei S-Bahnen analysiert.

#### **6.2.4. Schweiz: PULS 90**

PULS 90 wurde durch die SBB-Division Infrastruktur initiiert, um den dichten, integralen Taktfahrplan innerhalb der Schweiz weiter auszubauen, ohne die Infrastruktur laufend adaptieren zu müssen.

Um Leistungssteigerungen nicht auf Kosten der Qualität zu erreichen, hatte das Programm PULS 90 das Ziel, die geforderte Leistungssteigerung durch neue Planungsprozesse und Betriebsprozesse zu gewährleisten. Ziel von PULS 90 ist es, die strenge Unterteilung der drei Hauptphasen, strategische Infrastrukturplanung, Fahrplanentwicklung und operativen Tagesbetrieb, durch integrierte Methoden aufzulösen. Hauptaugenmerk liegt auf Planungsmethoden, die während aller drei Prozessphasen benutzt werden sollen [PUL07].

Derzeit verläuft der Informations- und Datenfluss aus technischen und organisatorischen Gründen vorwiegend in einer Richtung. Rückkopplungen zwischen den beteiligten Akteuren sind nur bedingt und mit hohem manuellem Aufwand möglich.

Im Zuge des Projektes wurde die Wichtigkeit der Rückkopplungen von Regelkreisen in allen Projektphasen deutlich. Diese Erkenntnisse haben massive Auswirkungen auf den Produktionsprozess, auch die Steuerung der Züge wird in einen Regelkreis integriert. Dispositionsentscheidungen sollen formalisiert und mithilfe von automatisierten Methoden, dem dynamischen Reschedulingprozess, vereinfacht werden. Die maximale Leistungsfähigkeit dieser neuartigen Prozesse kann nur dann voll umgesetzt werden, wenn der Informationsfluss zwischen allen Beteiligten am Prozess verbessert wird [PUL07]. Die Akteure müssen den aktuell gültigen Produktionsplan kennen und geeignete Hilfsmittel zur Verfügung haben, um das Einhalten der Vorgaben zu ermöglichen.

Der Produktionsprozess soll in Zukunft, wie in Abbildung 41 dargestellt, aus zwei Regelkreisen bestehen. Der äußere Reschedulingprozess berechnet einen neuen Produktionsplan mit Einbeziehung aller notwendigen, aktuellen Daten. Der innere Regelkreis wird aufgrund neuer Prozesse und mithilfe von



Infrastrukturteilen. Dadurch wird es möglich, innerhalb kürzester Zeit neue Produktionspläne zu generieren [WÜS06].

Das Konzept der sogenannten Verpulsung bietet eine transparente Möglichkeit zur Planung und Steuerung von Großknoten. Es basiert auf einem räumlich-zeitlichen Raster, wobei die Zeit in Pulse aufgeteilt wird. Bei der Erstellung des Pulsrasters wird die Kompatibilität der Sperrzeitentrepfen der Trassen mit denjenigen in den Nachbarpulsen optimiert und damit die Durchlassfähigkeit maximiert [PUL07].

Die neuen Planungs- und Produktionsprozesse bilden die Basis, um eine kostengünstige Leistungssteigerung des Netzes zu ermöglichen. Zur Umsetzung von PULS 90 ist eine Vielzahl von organisatorischen, technischen und prozessorientierten Anpassungen nötig:

- Dynamisches Rescheduling in Echtzeit
- Hohe Produktionspräzision unterstützt von technischen Hilfsmitteln
- Durchgehender Datenfluss und Informationskette
- Zeitgesteuerter Produktionsbetrieb
- Zeitdiskretisierung der Kapazitätsengpassbereiche

#### 6.2.4.1. Praktische Umsetzung PULS 90 in einem Pilotprojekt

Das System PULS 90 wurde bereits, im Zuge einer Leistungsuntersuchung des Verkehrsknotens Luzern, erfolgreich in einem Pilotprojekt angewandt. Für diesen Zweck wurden die aktuellen Verspätungen der Züge analysiert und daraus folgend fünf verschiedene Verspätungsszenarien definiert. Für diese Szenarien wurden drei Varianten untersucht:

- Die erste Variante wurde ohne den Rescheduling-Prozess durchgeführt.
- Die zweite Variante wurde mit Rescheduling und neuartigem Betriebslenkungsprozess ermittelt.
- Für die dritte Variante wurde zwar der neue Rescheduling-Prozess durchgeführt, jedoch wurde dieser nicht mit dem neuen Betriebslenkungsprozess ergänzt.

Für jede Variante wurden die Szenarien simuliert und dabei evaluiert, welche die betrieblich optimale Lösung durch diesen stark belasteten Flaschenhals darstellt [LLM07].

Das Resultat war eine erhebliche Reduktion der Verspätungen in diesem Abschnitt. So konnten schon mit der Variante 3, also dem bloßen Durchführen des Rescheduling-Prozesses ohne zusätzlichen neuen Betriebslenkungsprozess, die Verspätungen der Nahverkehrszüge um 10% bis 24% reduziert werden. Bei einem gemeinsamen, sinnvollen systemumfassenden Ansatz von Rescheduling Prozess und neuer computerunterstützter Betriebslenkung ist dieser Wert auf deutlich mehr als 50% angestiegen. Beim ebenso berücksichtigten Fernverkehr wurde sogar eine Verringerung der Verspätung um bis zu 78% erreicht. Die Stabilität wurde auf diese Weise deutlich gesteigert.

Eine wesentliche Erkenntnis in der Praxis war die Notwendigkeit, die Betriebslenkung sekundengenau durchzuführen. Selbst eine geringe Abweichung von wenigen Sekunden, kann Folgeverspätungen bei weiteren Zügen hervorrufen [LLM07]. Durch geringe Ungenauigkeiten kann die Leistungsfähigkeit um 40% sinken.

Ein wesentlicher Punkt für das Gelingen der Ziele, ist der bessere Informationsaustausch zwischen den beteiligten Akteuren. Im Speziellen ist die Anzeige des aktuellen Produktionsplanes für den Triebfahrzeugführer von erheblicher Bedeutung.

### 6.2.5. Deutschland: „Free Float“

Um die Kapazität und Qualität des bestehenden Schienennetzes nachhaltig zu steigern, hat die DB Netz AG ein Programm mit dem Namen „Free Float“ installiert. Ziel von Free Float ist es, Prozesse, Methoden und Algorithmen integriert weiterzuentwickeln, um so eine intensivere Nutzung des Schienennetzes zu ermöglichen. Das Innovationsprogramm „Free Float“ umfasst sowohl die Forschung und Entwicklung, als auch die Umsetzung in die Praxis. Das Programm erfordert beispielsweise eine Harmonisierung der in Prozessen eingesetzten Modelle und Verfahren sowie konsistente Daten für alle Prozessschritte [WÖR08].

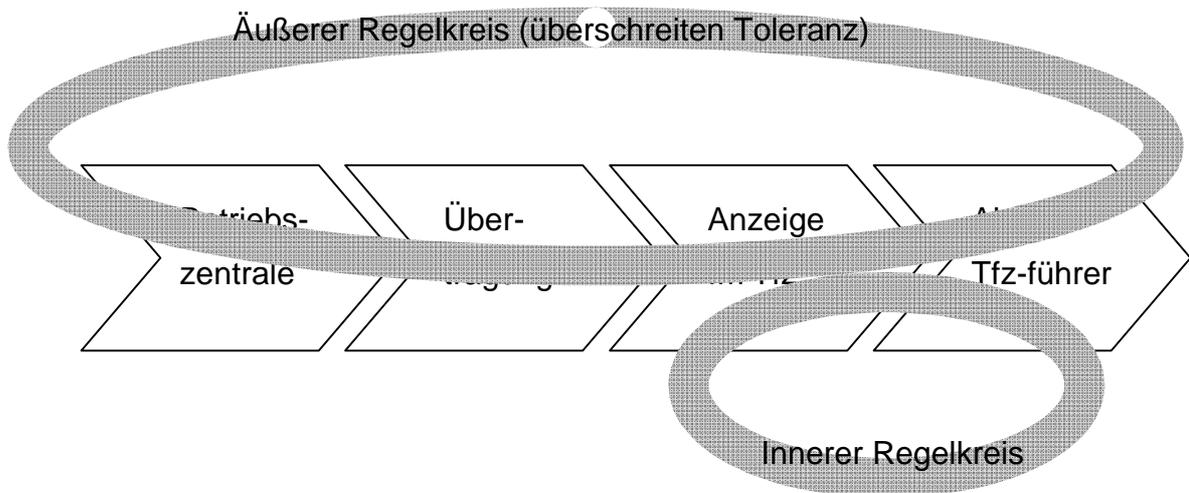
Ein wesentlicher Aspekt ist die Betriebslenkung, die innerhalb dieses Programmes als Zuglaufregelung bezeichnet wird. Heute erfolgt die Information für den Triebfahrzeugführer nur in Ausnahmefällen manuell mittels Zugfunk [DBB1].

Ziel der Zuglaufregelung ist es, die Züge mit möglichst geringer Abweichung zur Fahrplanlage kapazitätsoptimal zu führen. Dadurch sinken der Kapazitätsverbrauch, die Zugfolgeverspätungen und der Energieverbrauch. Somit profitieren alle Beteiligten von der Zuglaufregelung:

- Infrastrukturbetreiber: höhere Kapazität, höhere Pünktlichkeit
- Eisenbahnverkehrsunternehmen: mehr Trassenangebote in Engpässen, höhere Pünktlichkeit, geringerer Energieverbrauch
- Fahrgäste, Kunden: höhere Qualität des Angebotes in Pünktlichkeit und Menge

Um diese Vorteile generieren zu können, muss ein Zug möglichst nahe an der sinnvollen Soll-Linie geführt werden. Für diesen Zweck berechnet die Zuglaufregelung Fahrempfehlungen, mit deren Hilfe der Triebfahrzeugführer einen Konflikt mit einem anderen Zug vermeidet. Die Fahrempfehlung besteht aus einer Zeit-Weg-Linie für den Zug und enthält zusätzlich eine Angabe, wie weit der Toleranzbereich zur Abweichung von diesem ist. Das bedeutet dem Triebfahrzeugführer steht ein zeitlicher Bereich zur Verfügung, ohne dass es zu einem Konflikt mit anderen Zügen kommt.

Der Regelkreis zur Zuglaufregelung besteht im Wesentlichen aus den folgenden Hauptpunkten:



**Abbildung 42: Regelkreise der Zuglaufregelung**

In der Betriebszentrale ist die prognostizierte zeitliche Lage der Züge bekannt. Auf dieser Grundlage können auftretende Konflikte gelöst werden und mit Unterstützung der EDV wird eine Zeit-Weg-Linie für jeden Zug ermittelt. Ist der Konflikt gelöst, werden die weiteren Zwangspunkte identifiziert. Das sind jene Punkte, an denen sich die Sperrzeiten zweier Züge einander annähern. Zu diesen Zwangspunkten soll der Zug nun zeitlich optimaler gesteuert werden. Abhängig von dem Abstand der beiden Punkte gibt es einen unterschiedlich großen Lösungsraum, innerhalb dessen die Zeit-Weg-Linie liegen darf [OET08].

Für die Übertragung auf den Führerstand wurde der GSM-R Kanal aufgrund seiner weiten Verbreitung ausgewählt. Für diese Übertragung haben sich drei Arten angeboten:

- Mündliche Übertragung: erfordert bei Abweichungen einen hohen manuellen Einsatz in der Disposition
- Datenfernübertragung: große Datenmengen übertragbar, jedoch bei Benutzen des Zugfunkes unterbrochen, erforderliche Signalstärke sehr hoch
- Kurzmitteilung SMS: geringe Datenmengen übertragbar, permanent verfügbar

Aufgrund der ständigen Verfügbarkeit wurde der Übertragungsweg per SMS gewählt

Die Anzeige auf dem Triebfahrzeug sollte so einfach wie möglich gehalten werden und bei Möglichkeit kein neues Anzeigegerät innerhalb des Führerstandes benötigen. Aus diesem Grund entschloss man sich zur Anzeige auf dem EBUA-Bordgerät<sup>1</sup>. Die Zeit-Weg-Linie wird mittels GSM-R automatisch an das Triebfahrzeug übermittelt. Das EBUA-Bordgerät zeigt dem Triebfahrzeugführer jederzeit den gewünschten Fahrzustand (Fahrempfehlung), die Abweichung von der ermittelten Fahrweise und den zeitlichen Spielraum an, um weder den hinteren Zug zu behindern, noch selbst vom vorfahrenden Zug behindert zu werden [WÖR08].

Um dies zu ermöglichen, muss die Ist-Lage jedes Zuges bekannt sein. In diesem Fall konnte auf eine Softwarelösung zurückgegriffen werden, die im Zuge des Projektes „Energiesparende Fahrweise“ entwickelt wurde. Durch die Aktion des Triebfahrzeugführers wird die Lage des Zuges verändert. Solange sich der Zug innerhalb der Toleranzgrenzen der Zeit-Weg-Linie bewegt, hat der Triebfahrzeugführer die Funktion des Reglers (innerer Regelkreis). Überschreitet die Abweichung eine Toleranz zur Vorbeugung gegen Konflikte, wird in der Betriebszentrale eine neue Konfliktlösung durchgeführt und eine neue Fahrempfehlung berechnet (äußerer Regelkreis) [OET08].

#### 6.2.5.1. Vorbereitung für den praktischen Einsatz

Zu den zu definierenden Daten für die Zuglaufregelung gehören die Zwangspunkte, also jene Punkte, die zum erforderlichen Zeitpunkt mit der erforderlichen Geschwindigkeit erreicht werden sollen. Diese Punkte sind größtenteils betrieblich geprägt, sodass bei stark belasteten Streckenabschnitten jeder Vorsignalsichtpunkt ein Zwangspunkt sein kann. Zwangspunkte bestehen bei der Zugregelung immer dann, wenn der Mindestabstand der Sperrzeiten zweier Züge unterschritten wird. Die Anzeige der Fahrempfehlung ist nur solange sinnvoll, solange der Zug abweichend zur Zeit-Weg-Linie des Fahrplanes

---

<sup>1</sup> EBUA-Bordgerät = Elektronischer Buchfahrplan und Langsamfahrstellen - Bordgerät

unterwegs ist. Der Lösungsraum, der für die Berechnung der Dispositionsmaßnahme zur Verfügung steht, wird durch die Sperrzeiten der benachbarten Züge eingeschränkt. Bei der Berechnung der Zeit-Weg-Linie werden fahrdynamische Aspekte berücksichtigt [OET08]. Als schwierig erweist sich die Berechnung bei Unterwegshalten, da hier die Haltezeiten eine wesentliche Rolle spielen.

Die Genauigkeit der Zuglaufregelung muss sich im Sekundenbereich bewegen, daher ist es notwendig, dass diese genauen Daten im Triebfahrzeug angezeigt werden. Die Übertragung per SMS, wie oben erläutert, ist aber auf geringe Datenmengen beschränkt. Es werden daher keine Zeit-Weg-Linien übertragen, sondern nur Fahrzustände. Für diesen Zweck wurden acht Fahrzustände definiert, die sich jeweils mit einer einzigen physikalischen Größe eindeutig definieren lassen (Tabelle 5).

Nr.	Fahrzustand	Charakteristische Größe
0	Halt	Weg $s$ =konstant
1	Beschleunigen mit voller Zugkraft	Zugkraft $Z=Z(v)$
2	Beschleunigen mit reduzierter Zugkraft	Zugkraft $Z$ durch konst. Faktor $x$ reduziert
3	Beharren	Geschwindigkeit $v$ =konstant
4	Ausrollen	Zugkraft $Z=0$
5	Bremsen ausschließlich mit Nutzbremse	Bremskraft $F_B=F_B(v)$
6	Bremsen mit reduz. Bremsverzögerung	Bremsverzögerung $a$ abschnittsweise konst. und durch konst. Abminderungsfaktor reduz.
7	Bremsen mit voller Bremsverzögerung	Bremsverzögerung $a$ abschnittsweise konst.

**Tabelle 5: Fahrzustände beim System „Free Float“**

In Kombination mit dem Ort, der Geschwindigkeit und der Zeit lässt sich daraus auf dem Anzeigegerät am Führerstand die in der Betriebszentrale berechnete Zeit-Weg-Linie eindeutig rekonstruieren und anzeigen. Diese Berechnung erfolgt mithilfe des Fahrzeitintegrals [OET08]. Die Anzeige am Führerstand lautet beispielsweise somit: „Ausrollen“ oder „Fahre  $x$  km/h langsamer“.

#### 6.2.5.2. „Free Float“-Zuglaufregelung in der Praxis

Die ersten erfolgreichen Tests wurden im Jahr 2006 im Knotenpunkt Rastatt durchgeführt. Zum damaligen Zeitpunkt wurden unter erhöhtem manuellen Aufwand die Fahrempfehlungen ermittelt und über Zugfunk an die Triebfahrzeugführer übermittelt. Die Tests ergaben, dass durch Free Float eine um 18% bessere Ausnutzung der Kapazitäten ermöglicht wird [WÖR08].

Aufgrund der Erfahrungen wurde die Notwendigkeit von Algorithmen zur Berechnung der Fahrempfehlungen und der funktionierenden Information von der Betriebszentrale an den Triebfahrzeugführer evaluiert. Die grundlegenden Verfahrenselemente wurden in einer Laborsoftware umgesetzt. Diese wurde dann im Korridor Karlsruhe – Basel getestet. Die Versuchssoftware wurde in der Betriebszentrale Karlsruhe in Probetrieb genommen. Das Tool für die Anzeige im Fahrzeug, wurde auf speziellen Versuchslaptops installiert, die zusätzlich mit einer mobilen GPS-Ortungsanlage ausgerüstet wurden. Diese mobilen Einheiten waren zu Versuchszwecken bereits am genannten Korridor Karlsruhe – Basel im Einsatz. Als besondere Herausforderung zeigt sich in diesem Prozess die Zusammenführung von Infrastruktur-, Fahrplan- und Zugmeldedaten [OET08].

Die Zuglaufregelung unterstützt den Triebfahrzeugführer bei der Wahl einer möglichst vorausschauenden Fahrweise [WÖR08]. Damit sorgt Free Float dafür, dass Systemreserven in einen abgestimmten rückgekoppelten Prozess nutzbar gemacht werden, und somit die Kapazität besser genutzt und die Pünktlichkeit erhöht wird [DBN08].

## 6.2.6. Niederlande: „Het Spoor Meester“

Zur Erhöhung der Betriebseffizienz wird in den Niederlanden das Entwicklungsprogramm „Dynamisches Verkehrsmanagement“ durchgeführt. Wesentlicher Bestandteil ist der „Het Spoor Meester“, dessen Ziel eine bestmögliche Unterstützung der handelnden Personen im Eisenbahnbetrieb ist. Das Programm wurde 2003 von Pro Rail initiiert und mit wichtigen niederländischen Eisenbahnverkehrsunternehmen und der TU Delft entwickelt und getestet. Es soll den Mensch im komplexen System Eisenbahn unterstützen und nicht ersetzen. Basis des Projektes ist es, dass Fahrdienstleiter und Triebfahrzeugführer permanent den gleichen, aktuellen Informationsstand über Signalbilder und Fahrwege haben. Auf diese Weise können pünktlichere Züge geführt, weniger Energie verbraucht und den Reisenden ein höherer Fahrkomfort geboten werden. Damit der Triebfahrzeugführer sein Fahrverhalten an die betrieblichen Zustände anpassen kann, werden mithilfe des Systems „RouteLint“ aktuelle Informationen von der Betriebszentrale an Bord der Züge übermittelt. Das sind vor allem Fahrplaninformationen, Verspätungen, eingestellte Fahrwege, Infrastrukturstörungen und Zugpositionen auf Grundlage ermittelter Daten [AHW07].

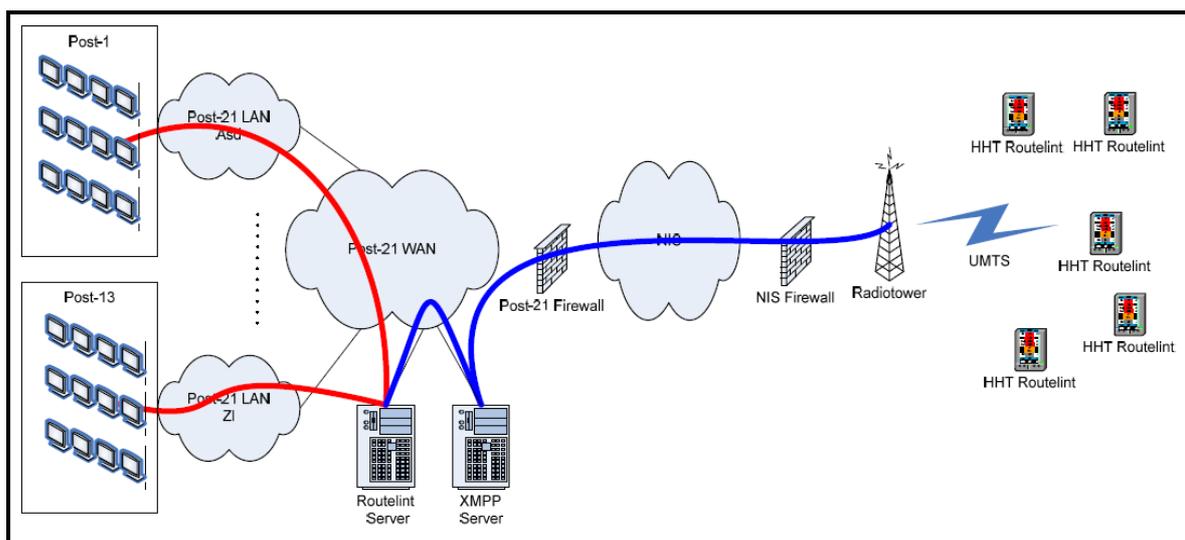


Abbildung 43: Darstellung der wesentlichen Komponenten des „Het Spoor Meester“

Aus der Informationsparität zwischen Fahrdienstleiter und Triebfahrzeugführer ergibt sich ein System mit mehreren Komponenten (Abbildung 43). Das Herzstück ist der „Het Spoor Meester“-Server. Dieser kombiniert die Daten aus den Servern

und der Betriebszentrale zu den maßgeblichen Informationen für Fahrdienstleiter und Triebfahrzeugführer. Während beim Fahrdienstleiter ein zusätzlicher Bildschirm Informationen über alle im „Het Spoor Meester“-System registrierten Züge gibt, war diese Schnittstelle am Führerstand schwieriger zu lösen. Ziel war eine anschauliche, einfache Anzeigeart für die notwendigen Informationen in Anlehnung an das System „Route Lint“ zu finden. Die Anzeige besteht aus einer 9 mal 3 Matrix [AHW07]. Die Informationen werden durch farbliche Erkennungen zusätzlich visualisiert, beispielsweise ist der eigene Zug in Blau dargestellt (siehe Abbildung 44).

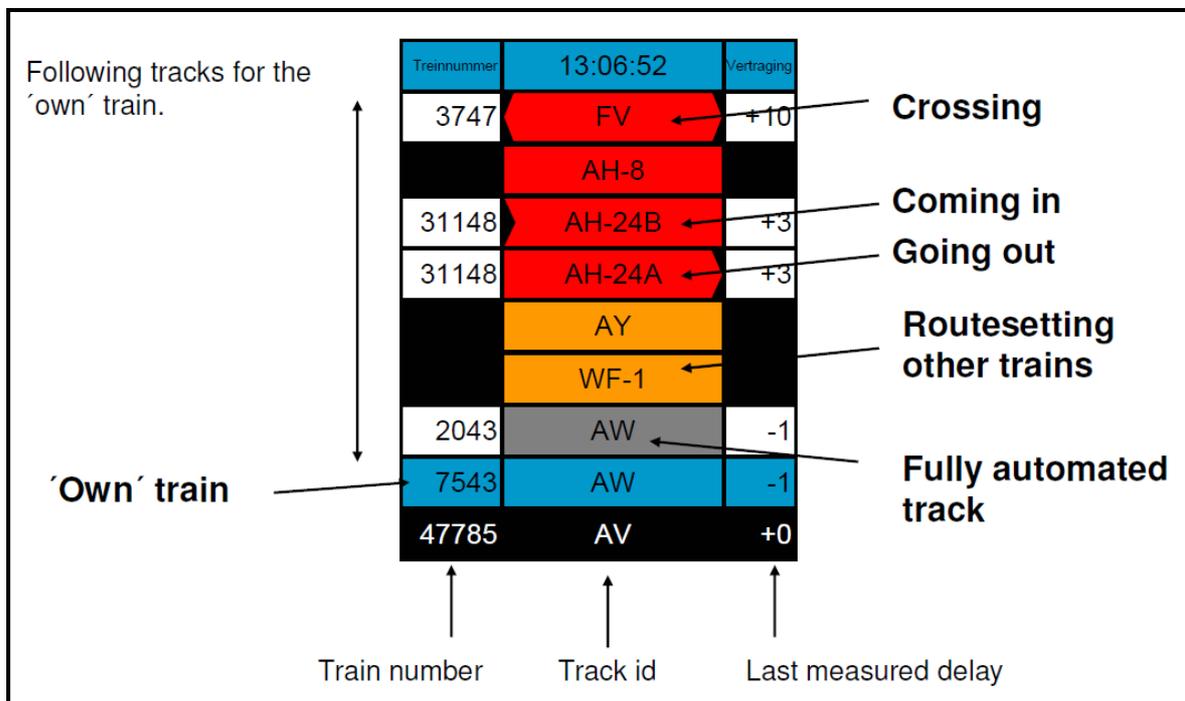


Abbildung 44: Schnittstelle Mensch-Maschine Bordgerät „Route Lint“ [KLE09]

#### 6.2.6.1. „Het Spoor Meester“ in der Simulation und in der Praxis

Im Rahmen des Projektes wurde ein Simulator entwickelt, mit dem die Qualität durch situationsabhängige Informationen getestet werden konnte. Ein Testbetrieb mit 70 Triebfahrzeugführern wurde durchgeführt, um dabei die Zusammenarbeit zwischen Triebfahrzeugführern und Fahrdienstleitern, das Fahren von Zügen im Konvoi, die Einhaltung vorgegebener Fahrplantrassen sowie das Verhalten in Konfliktsituationen als einer der Hauptwirkungspunkte des Systems zu simulieren. In den Simulationsdurchläufen schalteten die Triebfahrzeugführer bei einem sich abzeichnenden Konflikt in „Route Lint“ von Antrieb auf Auslauf und konnten somit

einen Stillstand des Zuges vermeiden. Außerdem wurde im Mittel nur zwei statt drei Mal unnötig gebremst [AHW07].

Das System „Route Lint“ zeigt fünf unterschiedliche Phasen an.

Phase 1	Antrieb
Phase 2	Auslauf
Phase 3	Wiederantrieb
Phase 4	Fahrt mit maximaler Geschwindigkeit
Phase 5	Bremsen

**Tabelle 6: Phasen im System „Route Lint“**

Im November und Dezember 2005 wurde das System „Het Spoor Meester“ erstmals zwischen Rotterdam und Doordrecht im praktischen Eisenbahnbetrieb getestet. Der Ablauf war so eingetaktet, dass jeden zweiten Tag mit „Route Lint“ gefahren wurde, und an den anderen Tagen ohne. Diese Tests wurden in einer Leitzentrale in Rotterdam koordiniert und überwacht. Das Ergebnis waren kürzere Sperrzeiten und somit eine geringere Kapazitätsbelegung. Zusätzlich wurden in ausgewählten Nahverkehrstriebwagen erstmals auch zwischen den Halten die verfügbaren Informationen über die Abweichung vom Fahrplan mitgeteilt. Eine kürzere Reaktionszeit durch dieses frühere Erkennen führte zu einer schnelleren Reduktion der Verspätungen. Triebfahrzeugführer können näher an der geplanten Trasse fahren und verursachen dadurch weniger Behinderungen anderer Züge [AHW07].

Aufgrund der erfolgsversprechenden Ergebnisse der Testphase, hat sich ProRail in enger Kooperation mit namhaften Eisenbahnverkehrsunternehmen dazu entschlossen, das System landesweit zu erproben. Davon verspricht man sich neben einem geringeren Energieverbrauch einen Anstieg der Pünktlichkeit im gesamten Netz auf 88%.

### 6.2.7. Anwendung von Fahrerassistenzsystemen bei S-Bahnen

In dem Forschungsprojekt „Intermobil Region Dresden“ wurde für die S-Bahn Linie 1 von DB Regio das Fahrerassistenzsystem ENA-Flex-S entwickelt. Bei den Untersuchungen wurde als Anwendungsfall eine S-Bahn betrachtet, weil hier wegen der häufigen Halte mit einem Fahrerassistenzsystem große Einsparungen erzielt werden können [STR05]. S-Bahnen sind häufig potenziellen Konfliktsituationen ausgesetzt, wie zum Beispiel dem Zusammenführen mehrerer Linien auf einer Stammstrecke.

Im niederländischen Eisenbahnnetz werden Gleisfreimeldedaten sekundengenau erfasst. Mit TNV-Prepare, einem an der TU Delft entwickeltem Programm ist es möglich, diese Daten zu ordnen und statistisch auszuwerten. ProRail stellte die Daten von der Strecke Utrecht – Den Bosch aus dem März 2004 zur Verfügung. Diese Daten mussten nach Zugarten analysiert werden, um geeignete Modellverteilungen zu finden.

Je nach Konfliktsituation ergeben sich unterschiedliche Ziele. Bei einem Zugfolgekonflikt wird der nachfahrende Zug mit so geringem Abstand als möglich hinter Zug 1 fahren, ohne aber in Konflikt mit ihm zu geraten. Daher müssen für diesen Fall Zielpunkte definiert werden, die zu einer bestimmten Zeit erreicht werden dürfen. Diese beiden Züge sollten außerdem den Streckenabschnitt möglichst kurz blockieren.

Das Verhalten des Zuges wird vom Zugbeeinflussungssystem bestimmt:

- Linienförmige Zugbeeinflussungssysteme: LZB, ETCS-L2

Hier werden die Steuerungsmöglichkeiten durch das Fahrerassistenzprogramm nicht beeinflusst.

- Punktförmige Zugbeeinflussungen: PZB, ETCS-L1

Das Fahrerassistenzsystem ist mit Besonderheiten umsetzbar, da Informationen über den aktuellen Signalzustand nur an diskreten Datenpunkten auf die Züge übertragen werden. So kann das Vorsignal (Vorbeifahrt kurz nach „Frei werden“) als Zielpunkt dienen. Das Fahrerassistenzsystem liefert auch bei PZB-Systemen Lösungen, mit denen die Fahrqualität in einem begrenzten Ausmaß verbessert wird.

Unabhängig von der Geschwindigkeit des Zuges ist es immer optimal, wenn dieser zum Zeitpunkt der Signalfreigabe genau auf der Bremskurve vor dem Signal ankommt [ALB05].

Um den Zug optimal zu steuern, ist es wichtig, einen beschriebenen Zielpunkt mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit und einer bestimmten Zeit zu erreichen. Dazu müssen von den Betriebszentralen die Fahrempfehlungen den Triebfahrzeugführern mitgeteilt werden. Diese Information soll auf möglichst einfache und leicht verständliche Weise erfolgen. Eine dementsprechende Anzeigevorrichtung im Führerstand und gesicherte Übertragungswege sind dafür Voraussetzung, da eine manuelle Übertragung per Zugfunk sehr starken Personaleinsatz in der Betriebszentrale erfordert.

Im S-Bahnbereich mit den charakteristischen kurzen Haltestellenabständen und niedrigeren Geschwindigkeiten lassen sich durch das vorausschauende Fahren unplanmäßige Halte auf der freien Strecke reduzieren und somit die Fahrzeit durch den Verlust des Abbrems-, Halte- und Anfahrvorgangs verkürzen (siehe Kapitel 5.3.1).

Ein wichtiger Faktor für die praktische Anwendung solcher Systeme liegt in der Zuverlässigkeit der prognostizierten Fahrzeitkurven. Bei den für S-Bahnen interessanten Prognosezeiträumen zwischen 100sec und 200sec liegen die Standardabweichungen der Fahrzeit bei 5 bis 15 Sekunden. Mit zunehmender Prognosedauer nimmt die Standardabweichung zu. Bei Halten im prognostizierten Zeitraum ist mit deutlichen Schwankungen von bis zu 30sec zu rechnen [ALB05].

Die Stationshaltezeit zeigt sich bei den Prognosesystemen als Stellhebel mit einer großen Ungenauigkeit, während die Fahrzeitkurven auf freien Strecken relativ genau prognostiziert werden können. Wichtig ist beim Einsatz solcher Systeme eine in der Praxis umsetzbare Annahme der Stationsaufenthaltszeit, die in weiterer Folge eingehalten werden muss. Im gegenteiligen Fall werden diese Fahrerassistenzsysteme ad absurdum geführt und die gewünschten Effekte sind nicht generierbar.

## 7. Schlussfolgerungen

S-Bahnstrecken haben eine spezielle Rolle im Netz der Eisenbahnen. Hohe Fahrgast- und Zugfrequenzen müssen auf einer meist schon viele Jahre vorhandenen Infrastruktur bewältigt werden. Bei den in dieser Arbeit untersuchten S-Bahnssystemen zeigt sich, dass die jeweilige vorhandene Kapazität an ihre Grenzen stößt.

Besondere Engpässe sind die sogenannten Schnellbahn-Stammstrecken, also jene Bereiche, wo mehrere Außenäste in einen gemeinsamen Streckenabschnitt münden. Diese Bereiche werden mit einer sehr hohen Zugdichte und kurzen Zugfolgezeiten betrieben. Um die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur zu erhöhen, wurden in München und Zürich bereits Adaptierungsarbeiten an der Infrastruktur durchgeführt.

In dieser Arbeit wurden aufbauend auf dem Ansatz der Kapazitätsbilanz die wesentlichen Parameter und Kennzahlen für die Kapazitätsermittlung bei S-Bahn-systemen ermittelt. Die Auswirkungen von Veränderungen dieser Kennzahlen sind prinzipiell ähnlich, für eine detaillierte Aussage muss jedoch die jeweilige Infrastruktur speziell untersucht werden.

Eine wesentliche Rolle für die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur spielen die Größe und vor allem die Situierung der Reserve- und Pufferzeiten im Netz. Das Modell der prozentuellen Reservezeit pro Zug ist insbesondere bei den S-Bahn-Stammstrecken mit den engen Haltestellenabständen nicht optimal. Zur Verminderung des Kapazitätsverbrauches ist es besser, generelle Pufferzeiten für einen Abschnitt zu definieren, und diese nicht den einzelnen Zügen zuzuordnen. Wenn es die Gegebenheiten erlauben, ist es für die Leistungsfähigkeit des gesamten S-Bahnnetzes sinnvoll, die Pufferzeiten in die Außenäste zu verlegen, um bei den Stammstrecken nahezu die ganze Kapazität für die reine Fahrzeit zu nutzen. Durch die Verlegung von Fahrzeitreserven in die sogenannten Ausgleichszonen, kann die Wahrscheinlichkeit erhöht werden, dass die Züge zur vorgegebenen Zeit in den hochbelasteten Abschnitt einfahren. Die Gefahr von Verspätungsübertragungen wird dadurch verringert. Durch diese Verdichtungszone muss der Zug die ihm vorgegebene Trasse einhalten.

Voraussetzung für diese Verlegung der Fahrzeitreserven in die Ausgleichszonen ist einerseits die vorhandene Kapazität in den Außenästen und andererseits eine genau definierte und betriebsoptimierte Fahrt durch den Verdichtungsabschnitt.

Die Stationsaufenthaltszeit spielt bei der genauen Bemessung der Pufferzeiten eine wichtige Rolle. Zwar gibt es rechnerische Methoden zur Abschätzung, durch die Fahrgastwechselzeiten und die Abfertigungszeit des Zugbegleiters ist diese im betrieblichen Alltag aber wesentlich von manuellen Faktoren abhängig. Eine Erhöhung der Haltezeit kann durch die Verlängerung der Sperrzeit eines Blockes erhebliche Auswirkungen auf den Betrieb des Streckenabschnittes haben. Systeme mit automatischer, zeitgesteuerter Abfertigung könnten helfen, diese Problematik der verlängerten Stationsaufenthaltszeiten zu verringern.

Die angeführten Punkte sind Grundlagen für den Planungs- und Umsetzungsprozess für die bessere Ausnutzung der Kapazität. Diese genutzte infrastrukturelle Kapazität kann durch Adaptierungen an den Sicherungssystemen oder durch verbesserte Betriebslenkung erhöht werden.

Als Adaptierungen an der Infrastruktur wurden im Zuge dieser Arbeit die Sicherungs- und Zugbeeinflussungssysteme untersucht. Diese haben einen wesentlichen Einfluss auf die Kapazität der Strecken. Näher betrachtet wurde lediglich das Fahren im festen Raumabstand. Eine optimale Blockteilung hat keine Blockabschnitte gleicher Länge, sondern weist gleich hohe Sperrzeiten für die Abschnitte auf. Bei S-Bahnsystemen ist von Vorteil, dass wegen der gleichen Haltemuster und Geschwindigkeiten, optimale Blocklängen ermittelt werden können. Die Schwachstelle bei diesen Betrachtungen ist die angenommene Haltezeit in den Stationen, die eine wesentliche Rolle spielt.

In dieser Arbeit steht die Untersuchung bestehender S-Bahnsysteme im Vordergrund. Die möglichen Maßnahmen zur besseren Ausnutzung der Kapazität mit Berücksichtigung der vorhandenen Infrastruktur werden aufgezeigt.

Eine Möglichkeit zu einer Erhöhung der Kapazität besteht in der Anordnung von Mehrabschnittssignalisierungen. Dieses System wird bei der S-Bahn Zürich angewandt und ermöglicht ein Nachrücken zum Bahnsteig. Durch das Auf- und Abwerten des Geschwindigkeitsbegriffes kann mit diesem System die Zugfolgezeit minimiert und der Betriebsfluss erhöht werden.

Auf der S-Bahn München wurde die Erhöhung der Kapazität beispielsweise durch den Einbau einer linienförmigen Zugbeeinflussung realisiert. Mit 30 Zügen pro Stunde pro Richtung erreicht die S-Bahn München aufgrund der linienförmigen Zugbeeinflussung(LZB) und optimierter Betriebslenkung die höchste Anzahl an Zügen. Die LZB ermöglicht eine sehr enge Abschnittsteilung mittels LZB-Blockkennzeichen. Diese Abschnitte können auf bis zu 50m reduziert sein. Innerhalb der LZB wird jeder Zug kontinuierlich überwacht und Informationen über Zielentfernung und Geschwindigkeitsänderungen per Multifunktionsanzeigergerät mitgeteilt. Nachteil dieser Variante zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit ist einerseits die Betriebseinschränkung während Bauzeit und die Baukosten, andererseits die notwendige Ausrüstung der eingesetzten Fahrzeuge mit diesem System. Ebenso führt diese aufwändige Streckenausrüstung zu höheren laufenden Kosten. Im Sinne einer ganzheitlichen Kostenaufschlüsselung müssen sowohl Bau-, als auch Betriebs- und Erhaltungskosten in einer „Life Cycle Costs“-Betrachtung dargestellt sein.

Die kostengünstigste Lösung für Kapazitätsprobleme ist es, die derzeit für die Stabilität vorgesehenen Kapazitäten (Pufferzeiten) zu verringern. Wenn die Züge mit einer hohen Genauigkeit durch die Streckenabschnitte geführt werden können, sind geringere Kapazitäten für die Sicherstellung der Qualität nötig, weswegen die freien Kapazitäten für weitere Zugtrassen verwendet werden können. Auf diese Weise wird eine höhere Nutzung der Kapazität erzielt.

Durch eine effiziente Betriebslenkung können die Züge sekundengenau durch den stark belasteten Abschnitt geführt werden. Dadurch kann ein außerplanmäßiges Halten auf der freien Strecke vermieden werden. Die Züge werden mittels Fahrempfehlungen so „gelotst“, dass sie vorgegebene Zielorte (Signale) zeitoptimal (Signal auf „Freie Fahrt“) erreichen. Alleine durch dieses Nicht-Anhalten kann die Fahrzeit wesentlich reduziert werden. Eine kürzere Belegung des Blockabschnittes ist die Folge. Um diese Effekte zu erzielen, sind intelligente, computerunterstützte Betriebslenkungsprogramme erforderlich.

Das Kapazitätsproblem ist nicht nur bei innerstädtischen Bahnen existent. Auch bei anderen hochbelasteten Streckenabschnitten ist in vielen Eisenbahnnetzen dieses Problem vorhanden. Für diese Engpässe im Netz wurden in vielen Ländern Projekte mit dem Ziel der besseren, betrieblichen Ausnutzung der Kapazität

durchgeführt und befinden sich in Test- oder Entwicklungsphasen. Bei diesen Systemen handelt es sich um sogenannte Real Time Rescheduling Modelle. Dabei werden dem Zug durch Interaktion mit den Betriebszentralen die notwendigen Informationen gegeben, um kapazitätsoptimal zu verkehren. Das System basiert auf einer sekundengenauen, situationsbezogenen und systemumfassenden Anpassung der Fahrpläne. Herzstück dieser Systeme sind die computerunterstützten Dispositionsprogramme, welche eine Neuberechnung eines konfliktfreien Fahrplanes innerhalb kurzer Zeit durchführen. Solche Systeme sind in einigen europäischen Ländern in der Entwicklung und im Testeinsatz. Mit diesen Systemen kann die Ausnutzung der Kapazität verbessert werden. Dies gilt auch für den S-Bahnverkehr, wo jedoch eine hohe Genauigkeit und Disziplin der handelnden Personen Voraussetzung ist. Nur bei genauer Umsetzung durch die handelnden Personen, kann durch das Dispositionssystem eine Prognose der nächsten Betriebsschritte erfolgen und so ein aktueller und situationsbezogener Fahrplan erstellt werden. Bei der S-Bahn mit ihren vielen Halten und Einflüssen sind diese Prognosen schwierig. Daher ist die sinnvolle Einführung und Umsetzung eines solchen Systems schwieriger als bei „Überlandstrecken“.

Diese Arbeit hat gezeigt, dass viele Faktoren für eine Erhöhung der Kapazitätsausnutzung verantwortlich sind. Ihre Lage im Planungs- und Betriebsprozess und ihre gegenseitigen Einflüsse machen für ein optimiertes Ergebnis eine gesamtheitliche, systemumfassende Betrachtung notwendig.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kapazitätsverbrauch nach UIC 406 .....	5
Abbildung 2: Tabelle: Richtwerte überlastete Infrastruktur nach UIC .....	6
Abbildung 3: Kapazitätsverbrauch nach UIC 406 .....	8
Abbildung 4: Belegungszeit bei Sicherungssystem mit Haupt-/Vorsignalen.....	10
Abbildung 5: Liniennetzplan Schnellverbindungen Wien.....	12
Abbildung 6: Darstellung der Funktionsweise des Simulationstools Open Track .	13
Abbildung 7: Aufbau der Infrastruktur der S-Bahn-Stammstrecke Wien in Open Track .....	14
Abbildung 8: Sperrzeitentreppe zweier S-Bahnen auf der Schnellbahn- Stammstrecke .....	16
Abbildung 9: Geschwindigkeits-Weg-Diagramm der schnellstmöglichen S-Bahn- Fahrzeit Wien Meidling – Wien Floridsdorf.....	17
Abbildung 10: Zeit-Weg Diagramm für die schnellstmögliche S-Bahn Fahrt Wien Meidling – Wien Floridsdorf.....	18
Abbildung 11: Kapazitätsverbrauch der Schnellbahn in der Hauptverkehrszeit (Darstellung lt. UIC 406).....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
Abbildung 12: Schematische Darstellung Nachrücksignal.....	22
Abbildung 14: S-Bahn Netz München .....	23
Abbildung 15: Vergleich der Nachrücksequenzen ohne (links) und mit LZB (rechts) .....	24
Abbildung 16: Multifunktionalgerät MFA der Baureihe 423.....	25
Abbildung 17: S-Bahn Netz Stuttgart.....	26
Abbildung 18: S-Bahn Netz Rhein Main .....	27
Abbildung 19: Schematischer Aufbau eines typischen S-Bahn-Netzes.....	28
Abbildung 20: Zeit-Weg-Diagramm: Trassenverbrauch verschiedener Zuggattungen, rot-EC, braun-Güterzug, blau-S-Bahn [ÖBB2] .....	31
Abbildung 21: Darstellung von Pufferzeiten zwischen den Trassen bzw. Sperrzeiten.....	32
Abbildung 22: Darstellung von Pufferzeiten in einer Puffertrasse.....	33
Abbildung 23: Gleichmäßige Verteilung der Fahrzeitreserven .....	35
Abbildung 24: Punktuelle Verteilung der Fahrzeitreserven.....	35

Abbildung 25: Vergleich: gleichmäßige - punktuelle Verteilung der Reservezeit	36
Abbildung 26: Trassenvarianten in der Ausgleichszone, fixe Trassen in Verdichtungszone.....	37
Abbildung 27: Realisierte Beförderungszeit [ÖBB00] .....	38
Abbildung 28: Vergleich Bildfahrplan:.....	44
Abbildung 29: Beispiel eines modernen Fahrzeugs für die S-Bahn Zürich [stadlerrail.com] .....	45
Abbildung 30: Untersuchter Abschnitt mittels Open Track .....	47
Abbildung 31: Geschwindigkeit-Weg-Diagramm Freie Fahrt.....	48
Abbildung 32: Geschwindigkeit-Weg Diagramm Variante: „Halt beim Signal“.....	49
Abbildung 33: Zeit-Weg-Diagramm Variante: „Halt beim Signal“ .....	49
Abbildung 34: Geschwindigkeit-Weg Diagramm Var.: „ Reduzierte Höchstgeschwindigkeit“ .....	50
Abbildung 35: Zeit-Weg Diagramm Var.: „ Reduzierte Höchstgeschwindigkeit“ ...	51
Abbildung 36: Signalisierungen des freien Fahrweges [THM05] .....	55
Abbildung 37: Blocklänge ist gleich Haltestellenabstand [ÖPN09] .....	56
Abbildung 38: Der Haltestellenabstand ist in 2 Blöcke aufgeteilt [ÖPN09] .....	57
Abbildung 39: Disposition und Eisenbahnbetrieb heute [LÜT08].....	62
Abbildung 40: Darstellung der Grundidee eines Real Time Rescheduling Systems [LÜT06] .....	64
Abbildung 41: Vergeich des Kapazitätsverbrauches für bestehende und angestrebte Planungs- und Betriebsprozesse [LÜT09].....	66
Abbildung 42: Aufbau des Integrated Real-Time Rescheduling Systems [LÜT08]	68
Abbildung 43: Regelkreise der Zuglaufregelung.....	72
Abbildung 44: Darstellung der wesentlichen Komponenten des „Het Spoor Meester“ .....	76
Abbildung 45: Schnittstelle Mensch-Maschine Bordgerät „Route Lint“ [KLE09] ...	77

## Literaturverzeichnis

- [AHW07] T. Albrecht, J.v. Luipen, Ingo Hansen, Adeodat Weeda; „Bessere Echtzeitinformation für Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter“; Eisenbahningenieur (58), 06/2007
- [AKB08] H.-R. Akermann, T. Büker; „Ziel Pünktlichkeit: Fahrplanstabilitätsuntersuchungen für die SBB“, ETR 11/2008
- [ALB05] T. Albrecht; „Energiesparende und verspätungsmindernde Zugsteuerung in Konfliktsituationen“; Signal + Draht (97); 12/2005
- [BLI02] J. Blieberger, B. Burgstaller, G.H. Schmidt; „Informatik Grundlagen“; Springer New York; 2002
- [DBB1] Deutsche Bahn AG: „Richtlinie 420.01 – Betriebszentralen der DB Netz AG“
- [DBN08] W. Bohrer; „Free Float steigert Kapazität und Pünktlichkeit“; DB Netz Nachrichten Ausgabe 3/08, 09.2008
- [DBS10] DB Systemtechnik; Stammstrecke München; [www.db-systemtechnik.de](http://www.db-systemtechnik.de) 11.03.2010
- [FRI11] B. Friedrich; „Forschungsprojekt: Untersuchung und Entwicklung einer optimierten Steuerung des Fahrgastwechsels zur Steigerung der Bedienqualität im ÖPNV“; Institut für Verkehrstelematik, Straßenwesen und Städtebau Hannover
- [GRÖ00] T. Gröger, „Simulation des Vorganges der Trassenvergabe und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung“, Werkzeuge für Planung und Führung des Betriebs, RWTH Aachen, 2000
- [HAW10] T. Hackstein, C. Weber; „Anwendung der PZB 90 bei Regelvorsignalabständen <1000m“; Eisenbahningenieur 2/2010
- [HOR08] K. Hornemann, „Leiter Linien- und Punktförmige Zugbeeinflussung DB Systemtechnik; „Neue LZB bei der S-Bahn München“, Signal+Draht(97), 09/2005

- [HÜL06] D. Hürlimann, M. Lüthi; „Simulation mit Open Track – Voraussetzungen, Durchführung und Auswertung“; Eisenbahntechnisches Kolloquium TU Darmstadt; 13.06.2006
- [KLE09] B. Kleinmeijer; “Improving the Railway Traffic Flow by Means of the Routelint System”; ProRail 22.10.2009
- [KRÜ03] M. Krüger; „Zugsicherung in Deutschland – von der LZB zu ETCS“; Eisenbahningenieur 2/2003
- [LLM07] F. Laube, M. Lüthi, G. Medeossi; „Rescheduling and Train Control: A New Framework for Railroad Traffic Control in Heavily Used Networks“, 2007
- [LLÜ08] F. Laube, M. Lüthi; „Making every second count“; Railway Gazette International 164; 2008
- [LÜT08] M. Lüthi; „Weniger Reserven und trotzdem höhere Pünktlichkeit“, Kolloquium Verkehrsmanagement und Verkehrstelematik, Dresden 04.07.2008
- [LÜT09] Marco Lüthi: „Effizienter Bahnbetrieb: Optimierung von Energieverbrauch und Infrastrukturauslastung“, Fachtagung Bahntechnologie „Energieoptimierung“ suissetraffic, Bern 2009
- [LUZ03] Planungsbericht an des Regierungsrat an den Grossen Rat: „Über die S-Bahn Luzern“, 2003
- [LWB09] M. Lüthi, U. Weidemann, S. Bepperling, D. Hürlimann; „Strategien für einen hochwertigen Betrieb von stark belasteten Eisenbahnnetzen“, ZEV Rail 06/07 2009
- [MUT03] Thilo Muthmann: Technische Universität Darmstadt Schriftenreihe D17 Heft B4, Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung, 2004
- [MVV09] Münchener Verkehrs- und Tarifverbund GmbH; „2. S-Bahn Tunnel“; MVV März 2009
- [NAP02] P. Naumann, J. Pacht; „Leit- und Sicherungstechnik im Bahnbetrieb“ Fachlexikon Schriftenreihe für Verkehr und Bahntechnik; Hamburg, Tetzlaff, 2002

- [ÖBB00] ÖBB Betrieb AG, Haslinger: „Kapazitätsmanagement und Qualitätscontrolling im Eisenbahnbetrieb“, 2000
- [ÖBB08] ÖBB Infrastruktur Bau; Vortrag „Grundzüge der Fahrplangestaltung und Leistungsfähigkeit“, Arch+Ing Akademie Wien, 4.12.2008
- [ÖBB2] ÖBB GB Netz: Schlussbericht „Projekt – Betriebliche Kennzahlen“, 2000
- [ÖBV09] Österreichische Bundesbahnen, “Betriebsvorschrift V3” , Ausgabe 1997, DV V3 12/2009
- [OET08] A. Oetting, Leiter Verfahren DB Netz AG; „Zuglaufregelung – Optimierte Steuerung der Züge im Betrieb“, ETR 10/2008
- [ÖPN09] Skriptum TU Wien; “Öffentlicher Personennahverkehr“, 2009
- [OPT00] D. Hürlimann; „Handbuch Open Track – Version 1.3“, ETH Zürich
- [ORS08] K. Ortseifen, F. Salbert; „Blockabschnittslängen bei Mehrabschnittssignalisierung“; Eisenbahningenieur 04/2008
- [OTT04] [www.opentimetable.ch](http://www.opentimetable.ch), 30.04.2008
- [PAB00] Martin Pabst, „U- und S-Bahnfahrzeuge in Deutschland“; Gera Mond Verlag, 2000
- [POT70] G. Potthoff, „Die Zugfolge auf Strecken und in Bahnhöfen“, Transpress 1970
- [PUL07] Weidemann, Lüthi, Wüst, Roos, Laube: „PULS90-ein systemumfassender Ansatz zur Leistungssteigerung von Eisenbahnnetzen“, ETR März 2007
- [SBB01] Schweizerische Bundesbahn, H. Schaffer: Kapazitätssteigerung Schlussbericht Phase 1
- [SCH86] W. Schwanhäußer, „Leistungsfähigkeit und Bemessung von Bahnanlagen“, Beitrag zum Eisenbahnbetriebswirtschaftlichen Kolloquium, 1986
- [SHR10] A. Schöbel, H. Haramina; „State of the Art Report on Train and Traffic Control Commuter Lines“; Cetra 2010

- [SNB08] ÖBB Infra Betrieb; „Schienennetznutzungsbedingungen 2008“, 2008
- [STL04] O. Stalder, F. Laube; „The efficient Railway – a field of Action for Formal Methods“; FORMS Braunschweig 2004
- [STR05] H. Strobel; Das BMBF-Leitprojekt intermobil Region Dresden – intermodale Mobilitätssicherung in mittleren Ballungsräumen durch Integration innovativer Telematik-, Bahn- und Regelungstechnologien (Schlussbericht); TU Dresden; 2005
- [SVA10] Schienenverkehr Aktuell; Minirex Verlag, 03/2010
- [THM05] G. Theeg, U. Maschek; „Analyse europäischer Signalsysteme“; Signal + Draht (97) 6/2005
- [TRÜ08] D. Tuna, B. Rüger; „Fahrzeugseitige Optimierungspotenziale zur Verkürzung der Haltezeit“, ETR 09/2009
- [TSI06] „Technische Spezifikation für Interoperabilität des Teilsystems Verkehrsbetrieb und Verkehrssteuerung“, 2006
- [TUN08] D. Tuna; „Fahrgastwechselzeit im Personenfernverkehr“, Diplomarbeit TU Wien; 2008
- [UIC00] UIC-Kodex 451-1; In den Fahrplänen vorzusehende Fahrzeitzuschläge, um die pünktliche Betriebsabwicklung zu gewährleisten – Fahrzeitzuschläge, Juli 2000
- [UIC04] UIC-Kodex 406: Kapazität, September 2004
- [ULL03] M. Ullis; „Open TimeTable – Werkzeug zur Analyse und Qualitätskontrolle von Fahrplänen“, 06.05.2003
- [VPL09] Schopf, TU Wien: „Skriptum Verkehrsträger und Mobilitätsmanagement“, 2009
- [WBÜ08] K. Waas, T. Büker; „Effiziente Qualitätsanalyse von Fahrplankonzepten“, ETR 11/2008
- [WEI00] T. Weidner; „Prognose der Pünktlichkeit auf angestrebten Fahrplantrassen unter Berücksichtigung der Netzverknüpfungen, der Urverspätungen und der verfügbaren Fahrzeitreserve“, Werkzeuge für Planung und Führung des Betriebs, RWTH Aachen, 2000

[WEI08] U. Weidemann; IT-Rail08 „Die Reserve als Stellhebel im Gesamtprozeß aus Planung, Betrieb und Qualität“, Vortrag IT-Rail 08, 2008

[WÖR08] C. Wörmann; „Free Float – Intensivere Nutzung der Ressource Schiene durch ein integriertes Planungs- und Verkehrsmanagement Schiene“; Schienenverkehr - sicher, leise, effizient; Inno Trans 2008, [www.bmwi.de](http://www.bmwi.de); 09.2008

[WÜS06] R. Wüst; “Dynamic rescheduling based on predefined track slots”; WCRR Montreal 2006