

# **Analyse und Simulation von Entstörungsstrategien bei der Automatisierung von U-Bahnsystemen**

vorgelegt von  
Diplom-Ingenieur  
Kai Frederik Zastrow  
aus Berlin

Vom Fachbereich 10  
– Verkehrswesen und angewandte Mechanik –  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
– Dr.-Ing. –  
genehmigte Dissertation

Berlin 2000

D 83

**Analyse und Simulation  
von Entstörungsstrategien  
bei der Automatisierung von U-Bahnsystemen**

vorgelegt von  
Diplom-Ingenieur  
Kai Frederik Zastrow  
aus Berlin

Vom Fachbereich 10  
– Verkehrswesen und angewandte Mechanik –  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
– Dr.-Ing. –  
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. J. Siegmann  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. P. Mnich  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. E. Schnieder

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 03. November 2000

Berlin 2000

D 83

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der IFB Institut für Bahntechnik GmbH in Berlin.

Ich danke Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Mnich, dem Leiter des Fachgebietes Betriebssysteme elektrischer Bahnen am Institut für Straßen- und Schienenverkehr der TU Berlin, für seine Unterstützung der Arbeit sowie die Übernahme des ersten Gutachters.

Herrn Professor Dr.-Ing. Eckehard Schnieder, dem Leiter des Instituts für Regelungs- und Automatisierungstechnik der TU Braunschweig, danke ich für seine Förderung der Arbeit sowie die Übernahme des zweiten Gutachters.

Eine wichtige Voraussetzung dieser Arbeit sind die zur Verfügung gestellten Betriebsdaten der Berliner und Pariser U-Bahn. Ich danke daher den Herren Dr.-Ing. Ewald Schlechter (BVG, Berlin) und Jean-Paul Schneider (RATP, Paris), die durch ihre Bereitstellung der Daten diese Arbeit ermöglicht haben.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Meike und meinen Eltern, dass sie mich während der Anfertigung dieser Arbeit stets unermüdlich unterstützt haben.

Kai Frederik Zastrow

## 0 Einleitung

Durch eine zunehmende Privatisierung im Verkehrssektor wächst der Druck auf die Verkehrsunternehmen, kundenorientierter und wirtschaftlicher zu arbeiten. Dabei wird in der Regel versucht, die Kundenorientierung durch spezielle Marketingstrategien und die Wirtschaftlichkeit durch eine Verschlankeung der Unternehmensstruktur zu erzielen. Neben diesen existieren betrieblich-technische Maßnahmen, die notwendig sind, um weitere wesentliche Feinziele zu erreichen:

- Leistungssteigerung des Fahrbetriebs
  - Erhöhung der Transportkapazität
  - Verringerung der Fahrzeit
- Kostensenkung des Fahrbetriebs
  - Optimierung des Betriebsmitteleinsatzes
  - Optimierung des Personaleinsatzes
  - Optimierung des Energiebedarfs
- Qualitätssteigerung
  - Erhöhung der Sicherheit
  - Erhöhung der Verfügbarkeit
  - Erhöhung der Pünktlichkeit
  - Verbesserung der Fahrgastlenkung

Die Einführung neuer Technik und die Automatisierung der Verkehrssysteme sind daher wichtige Schritte für eine bessere Kundenorientierung und Wirtschaftlichkeit der Verkehrsunternehmen [MNI 89]. Bei beidem handelt es sich nicht nur um die Beschaffung von Technik, sondern auch um die entsprechende Anpassung der Arbeitsweise des Unternehmens an die neue Technik [SCH 98].

Der für die Automatisierung von Verkehrssystemen wichtige Begriff „automatischer Betrieb“ wird leider selbst in der Fachwelt uneinheitlich benutzt. In dieser Ausarbeitung ist er im Sinne von Manless Train Operation (MTO) definiert, d. h. im Regelfahrbetrieb ist kein Betriebspersonal erforderlich.

Die technischen Grundlagen des automatischen Betriebs wurden in Deutschland bereits Ende der 70er-Jahre des 20. Jahrhunderts entwickelt. Jedoch scheiterten Pilotanwendungen wie PUSH in Hamburg [WIE 85] und SELTRAC in Berlin [IFB 88] in der praktischen Umsetzung Mitte der 80er-Jahre. Ursache waren nicht technische Unzulänglichkeiten sondern zum einen der mangelnde wirtschaftliche Druck auf die Verkehrsunternehmen sowie zum anderen massive Widerstände der Personalvertretungen. Außerhalb Deutschlands wurden diese Produkte jedoch eingesetzt und weiterentwickelt, z. B. SELTRAC in Vancouver, London und Kuala Lumpur. Heute existieren weltweit zahlreiche automatisch betriebene U-Bahnsysteme, während es in Deutschland neben den People Movern am Flughafen Frankfurt/Main und an der Universität Dortmund (sogenannte H-Bahn) bisher kein einziges gibt (siehe Kapitel 3).

In den 90er-Jahren gerieten die Verkehrsunternehmen vermehrt unter wirtschaftlichen Druck, sodass wieder mehrere Pilotanwendungen zum automatischen Betrieb (Berlin, Frankfurt/Main und Nürnberg) entstanden [MÜL 00]. Entsprechend dieser Entwicklung ist es vorstellbar, dass zu Beginn des dritten Jahrtausends die in den letzten 25 Jahren entstandenen Erfahrungen zum automatischen Betrieb auch in Deutschland umgesetzt werden, um auch hier von den oben genannten Vorteilen der Automatisierung profitieren zu können.

Einerseits bringt die Automatisierung für den Betrieb neue Störungsarten mit sich, andererseits eröffnen sich durch die Automatisierung innovative Möglichkeiten der Entstörung, die in konventionellen Verkehrssystemen nicht eingesetzt werden könnten.

Die vorliegende Ausarbeitung ist aus dieser Motivation heraus entstanden. Ihr Ziel ist es aufzuzeigen, wie durch Einsatz von Automatisierungseinrichtungen Betriebsstörungen reduziert und damit der Betriebsablauf optimiert werden kann.

Einführend wird dazu in Kapitel 1 erläutert, welche Funktionen die Automatisierung umfassen kann, um den entsprechenden Umfang eines Automatisierungssystems abgrenzen zu können. Anschließend werden in Kapitel 2 die Ursachen möglicher Störungen analysiert und ihr Einfluss auf den Betrieb entsprechend klassifiziert. Die Häufigkeit und die Art der in realen automatisierten U-Bahnsystemen auftretenden Betriebsstörungen werden in Kapitel 3 in einer Schwachstellenanalyse untersucht. Daraufhin werden in Kapitel 4 die Charakteristika des Prozesses U-Bahnbetrieb auf Grund mathematischer Modelle analysiert, so dass auf dieser Basis Schlussfolgerungen für Entstörungsstrategien gezogen werden können. Anschließend werden in Kapitel 5 aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen Entstörungsstrategien zur Optimierung des Betriebsablaufs abgeleitet. In Kapitel 6 werden die Einsatzmöglichkeiten künstlicher Neuronaler Netze zur Betriebssimulation als Teil einer in Kapitel 5 entwickelten Entstörungsstrategie untersucht, die alle betrieblichen und technischen Eigenschaften des U-Bahnbetriebs in einem integrierten Zusammenhang berücksichtigt. Abschließend wird in Kapitel 7 beispielhaft aufgezeigt, wie die in Kapitel 6 untersuchte Strategie auf ein konkretes U-Bahnsystem umgesetzt werden kann.

Um die Ausarbeitung in einem übersichtlichen Rahmen zu halten, beschränken sich die Betrachtungen auf den U-Bahnbetrieb einer Linie. Dennoch können die meisten Aspekte auch auf ein gesamtes U-Bahnsystem oder andere Verkehrssysteme übertragen werden, wie z. B. Busse, Trams und S-Bahnen.

Mit dieser Ausarbeitung ist die Hoffnung verbunden, dass durch die Anwendung der beschriebenen Entstörungsstrategien in Zukunft die oben genannten Ziele Leistungssteigerung, Kostensenkung und Qualitätssteigerung näher rücken und die Verkehrsunternehmen ihre Kundenorientierung und Wirtschaftlichkeit verbessern können.

## 1 Zusammenfassung und englisches Abstract

Ziel der Arbeit ist es aufzuzeigen, wie durch den Einsatz von Automatisierungseinrichtungen Betriebsstörungen reduziert werden können. Als Arbeitsschwerpunkte erfolgen eine Analyse des U-Bahnbetriebs und eine Simulation des Betriebs mit Hilfe von Neuronalen Netzen.

Zum einen wird anhand grundlegender theoretischer und praktischer Aspekte der U-Bahnbetrieb dahingehend analysiert, welche Funktionen in einem U-Bahnsystem automatisiert werden können. Allgemein lassen sich diese Funktionen in die Bereiche Fahren (ATO), Sichern (ATP) und Leiten (ATS) gliedern. Zum anderen werden verschiedene Arten von Betriebsstörungen analysiert und in ihren Auswirkungen klassifiziert, um anschließend die Schwachstellen realer automatisierter U-Bahnsysteme in Lille, London, Lyon, Paris, Tokio, Vancouver und Berlin quantitativ und qualitativ zu untersuchen.

Das beim Linienbetrieb mehrerer Züge auftretende Phänomen der Aufschaukelung von Verspätungen steht im Mittelpunkt der darauf folgenden mathematischen Herleitungen und einer Analyse realer Betriebsdaten. Nach einer Betrachtung der Verspätungsverteilungen von automatischen und konventionellen U-Bahnsystemen wird die Sicht der Fahrgäste erörtert. Die daraus abgeleiteten Qualitätskenngrößen sind Ausgangspunkt für die Entwicklung von Entstörungsstrategien. Diese erfolgt sowohl bezüglich der Art der Betriebsstörungen als auch bezüglich des Automatisierungsgrades des U-Bahnsystems. Abschließend wird eine besonders vielversprechende Entstörungsstrategie, die eine Simulation des U-Bahnbetriebs erfordert vertieft betrachtet.

Zur Anwendung dieser Strategie wird untersucht, ob Neuronale Netze ein geeignetes Mittel sind, um das Prozessverhalten des U-Bahnbetriebs vorherzusagen und auf welche Weise sie zur Simulation des U-Bahnbetriebs eingesetzt werden können. Dazu werden reale Betriebsdaten sowohl einer konventionell betriebenen U-Bahnlinie in Berlin als auch einer automatisch betriebenen U-Bahnlinie in Paris herangezogen. Die Analyse und Bewertung der Betriebssimulation bezieht sich auf die Struktur des Neuronalen Netzes, die Bereinigung der Trainingsdaten und den Einfluss der Eingangsparameter. Schließlich werden die Simulationsergebnisse für den konventionellen und den automatischen U-Bahnbetrieb verglichen und bereits heute vorhandenen Möglichkeiten zur Fahrzeitprognose gegenübergestellt.

Abschließend wird am Beispiel der Berliner U-Bahn aufgezeigt, in welcher Form die untersuchte Entstörungsstrategie unter Verwendung Neuronaler Netze in die Praxis umgesetzt werden könnte. Mit Hilfe einer Analyse der vorhandenen Betriebsstruktur werden notwendige Maßnahmen zur Modifizierung dargestellt.

## **Analysis and Simulation of Anti-Disturbance Strategies in Context with the Automation of Subway Systems**

### **Abstract**

The aim of this work is to show how operational disturbances in mass transportation systems can be reduced with the aid of automation facilities. The focus of this examination is an analysis of subway operation and a simulation using neural networks.

The first step of this investigation is to analyze the basic theoretic and practical aspects of subway operation. This leads to functions which might be automated. These functions can be classified into three areas: Automatic Train Operation (ATO), Automatic Train Protection (ATP) and Automatic Train Supervision (ATS). Then, different types of disturbances are analyzed and classified. This information is used as the basis for a quantitative and qualitative weak point analysis of the automatic subway systems in Lille, London, Lyon, Paris, Tokyo, Vancouver and Berlin.

The oscillating effect of delays which appears in line operations is the central point of the following mathematical derivations and analysis of real operational data. After examining the delay distributions of conventional and automatic subway systems, the passenger's opinions are discussed. The development of anti-disturbance strategies is formulated from the quality parameters derived from the above examinations. The type of disturbance as well as the degree of automation have thus been incorporated into the investigation. Finally, a very promising strategy which uses a simulation of the subway operation is examined more deeply.

To apply this strategy, neural networks are examined according to their appropriateness in predicting the behavior of subway operation and in which configuration they should be deployed to maximize their benefits. Real operational data of a conventional subway line in Berlin and of an automatic subway line in Paris are used to accomplish this. The analysis and evaluation refers to the structure of the neural network, the purgation of training data, and the influence of input parameters. Finally, the simulation results of conventional and automatic operation are compared with each other and with current available possibilities of trip time prediction.

Using the example of the Berlin subway, it is shown how a developed anti-disturbance strategy using neural networks could be applied to a real subway system. An analysis of the present operational structures and the modification measures necessary to incorporate a neural network anti-disturbance strategy are also presented.

## 2 Verzeichnisse

### 2.1 Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Zusammenfassung und englisches Abstract .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Verzeichnisse.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1</b>	<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3</b>	<b>Nomenklatur .....</b>	<b>10</b>
<b>2.4</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Funktionen der Automatisierung.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Bereich Fahren.....</b>	<b>14</b>
3.1.1	Grundfunktionen des Fahrens.....	15
3.1.2	Umsetzen eines Fahrprofils .....	15
3.1.3	Umsetzen der Fahrtenart.....	15
<b>3.2</b>	<b>Bereich Sichern .....</b>	<b>16</b>
3.2.1	Sichern von Zugfahrten .....	16
3.2.2	Fahrgastsicherheit.....	17
<b>3.3</b>	<b>Bereich Leiten .....</b>	<b>17</b>
3.3.1	Betriebsplanung.....	17
3.3.2	Betriebsdurchführung.....	17
3.3.3	Betriebsüberwachung und -disposition .....	18
<b>4</b>	<b>Ursachen von Betriebsstörungen .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>Technische Ursachen.....</b>	<b>20</b>
4.1.1	Zentrale Bedien- und Anzeigeeinrichtungen.....	21
4.1.2	Zentrale Leit- und Sicherungseinrichtungen .....	21
4.1.3	Dezentrale Leit-, Sicherungs- und Energieversorgungseinrichtungen .....	21
4.1.4	Komponenten an der Streckenperipherie .....	22
4.1.5	Komponenten in den Bahnhöfen .....	22
4.1.6	Fahrzeug .....	22
4.1.7	Kommunikationseinrichtungen .....	23
4.1.8	Fahrweg .....	23
4.1.9	Bahnhofs- und Ingenieurbauwerke.....	23
<b>4.2</b>	<b>Betriebliche Ursachen .....</b>	<b>23</b>
4.2.1	Betriebs- und Instandhaltungsplanung .....	23
4.2.2	Betriebs- und Instandhaltungsdurchführung .....	24
4.2.3	Betriebsüberwachung und -disposition .....	24
<b>4.3</b>	<b>Externe Ursachen .....</b>	<b>25</b>
4.3.1	Umwelt .....	25
4.3.2	Fahrgäste.....	25
4.3.3	Vandalismus .....	25
<b>5</b>	<b>Schwachstellenanalyse automatisierter U-Bahnsysteme .....</b>	<b>27</b>
<b>5.1</b>	<b>Lille: VAL-System .....</b>	<b>30</b>



<b>5.2</b>	<b>London: Docklands Light Railway .....</b>	<b>30</b>
<b>5.3</b>	<b>Lyon: Linie D .....</b>	<b>31</b>
<b>5.4</b>	<b>Paris: Linie 14 (Météor).....</b>	<b>32</b>
<b>5.5</b>	<b>Tokio: Yurikamome Line .....</b>	<b>32</b>
<b>5.6</b>	<b>Vancouver: Sky Train.....</b>	<b>32</b>
<b>5.7</b>	<b>Berlin: Linie U5 .....</b>	<b>33</b>
5.7.1	Kenngröße Istkilometer zu Plankilometer.....	33
5.7.2	Kenngröße Pünktliche Zugfahrten/Gesamtzahl der Zugfahrten.....	35
5.7.3	Fazit für Berliner U-Bahn.....	38
<b>5.8</b>	<b>Zusammenfassung der Schwachstellenanalyse.....</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>Charakteristika des U-Bahnbetriebs .....</b>	<b>42</b>
<b>6.1</b>	<b>Betriebsablauf eines Zuges .....</b>	<b>42</b>
<b>6.2</b>	<b>Phänomen der Aufschaukelung von Verspätungen .....</b>	<b>44</b>
6.2.1	Mathematisches Modell der Aufschaukelung .....	44
6.2.2	Anwendung des Modells der Aufschaukelung.....	48
6.2.3	Übertragbarkeit des Modells der Aufschaukelung auf den realen Betrieb .....	51
<b>6.3</b>	<b>Verteilung von Verspätungen.....</b>	<b>54</b>
<b>6.4</b>	<b>Sicht der Fahrgäste.....</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>Entwicklung von Entstörungsstrategien .....</b>	<b>60</b>
<b>7.1</b>	<b>Art der Betriebsstörung .....</b>	<b>60</b>
7.1.1	Technische Ursachen.....	60
7.1.2	Betriebliche Ursachen .....	61
7.1.3	Externe Ursachen.....	61
<b>7.2</b>	<b>Automatisierungsgrad des U-Bahnsystems.....</b>	<b>61</b>
7.2.1	Automatisches Fahren (ATO) .....	61
7.2.2	Automatisches Sichern (ATP).....	62
7.2.3	Automatisches Leiten (ATS).....	63
<b>7.3</b>	<b>Fazit zu den entwickelten Entstörungsstrategien .....</b>	<b>66</b>
<b>8</b>	<b>Betriebssimulation mit künstlichen Neuronalen Netzen.....</b>	<b>68</b>
<b>8.1</b>	<b>Das Prinzip Neuronaler Netze.....</b>	<b>68</b>
<b>8.2</b>	<b>Vorgehensweise beim Einsatz Neuronaler Netze.....</b>	<b>71</b>
<b>8.3</b>	<b>Vorgehensweise bei der Modellbildung des U-Bahnbetriebs .....</b>	<b>74</b>
8.3.1	Phase 1a: Sammeln von Daten aus dem realen Betrieb .....	75
8.3.2	Phase 1b: Auswahl repräsentativer Datensätze .....	75
8.3.2.1	Streckenabschnitt (Parameter A).....	76
8.3.2.2	Tag (Parameter B) .....	78
8.3.2.3	Soll-Abfahrtszeit am Startbahnhof (Parameter C) .....	78
8.3.2.4	Abfahrtszeit am Startbahnhof (Parameter D).....	79
8.3.2.5	Soll-Zugfolgezeit am Startbahnhof (Parameter E).....	79
8.3.2.6	Zugfolgezeit am Startbahnhof (Parameter F) .....	80
8.3.2.7	Soll-Fahrzeit (Parameter G) .....	81
8.3.2.8	Fahrzeit des Vorgängerzuges (Parameter H).....	81
8.3.3	Phase 2: Festlegen einer geeigneten Struktur des Neuronalen Netzes .....	82
8.3.4	Phase 3: Trainieren des Netzes mit den ausgewählten Datensätzen .....	83
8.3.5	Phase 4: Validieren des trainierten Netzes mit Testdaten .....	83
<b>8.4</b>	<b>Bewertung des Einflusses der Simulationsparameter.....</b>	<b>83</b>
8.4.1	Einfluss der Netzstruktur und der Bereinigung der Trainingsdaten.....	86

8.4.2	Einfluss der Eingangsparameter .....	93
<b>8.5</b>	<b>Bewertung der Eignung zur Simulation des U-Bahnbetriebs .....</b>	<b>100</b>
<b>9</b>	<b>Umsetzung auf ein konkretes U-Bahnsystem.....</b>	<b>106</b>
<b>9.1</b>	<b>Automatische Betriebsdatenerfassung .....</b>	<b>106</b>
<b>9.2</b>	<b>Durchführung der Simulation.....</b>	<b>107</b>
<b>9.3</b>	<b>Modifikation des Fahrplans .....</b>	<b>108</b>
<b>9.4</b>	<b>Systembetrachtung.....</b>	<b>109</b>
<b>10</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>110</b>
<b>11</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>112</b>
<b>12</b>	<b>Normen und Richtlinien .....</b>	<b>114</b>
<b>13</b>	<b>Weitere Quellen .....</b>	<b>115</b>
<b>Lebenslauf.....</b>		<b>116</b>

## 2.2 Abkürzungsverzeichnis

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ATC	Automatic Train Control
ATM	Asynchronous Transfer Mode
ATO	Automatic Train Operation
ATP	Automatic Train Protection
ATS	Automatic Train Supervision
BERTA	Produktbezeichnung des Fahrplanverwaltungssystems der Berliner U-Bahn
BOStrab	Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung
CCTV	Closed Circuit Television
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung)
DIN	Deutsches Institut für Normung
ELA	Elektrische Lautsprecher Anlage
EN	Europäische Norm
IEC	International Electrotechnical Commission
IH	Instandhaltung
ISO	International Standardization Organisation
LISI	Leit-, Informations- und Sicherungssystem
MDT	Mean Down Time
MLP	Multi Layer Perceptron
MOBY-V	Produktbezeichnung der Firma SIEMENS
MTO	Manless Train Operation
MUT	Mean Up Time
PC	Personal Computer
QM	Qualitätsmanagement
PUSH	Prozessrechnergesteuertes U-Bahn-Automations-System Hamburg
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability, Safety
RBF	Radial Basis Function
RLFoF	BOStrab-Richtlinie für den Fahrbetrieb ohne Fahrzeugführer
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SELTRAC	Produktbezeichnung der Firma Alcatel SEL
SIL	Safety Integrity Level
STAR	Systemtechnik für den Automatischen Regelbetrieb
SW	Software
UITP	Union Internationale des Transports Publics
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen

## 2.3 Nomenklatur

Baugruppe	Gemäß Instandhaltungskonzept tausch- und prüfbare Einheit.
Betriebsstörung	Betriebslage, bei der die Leistungsfähigkeit des U-Bahnsystems gemäß der Spezifikation eingeschränkt ist oder mindestens eine Verspätung vorliegt, die einen definierten Grenzwert überschreitet.
Betrieb, automatischer	Betriebsform, bei der der Regelfahrbetrieb kein Betriebspersonal erfordert.
Betrieb, konventioneller	Betriebsform, bei der der Regelfahrbetrieb Betriebspersonal erfordert.
Entstörungsstrategien	Strategien zur Verhinderung und Begrenzung von Betriebsstörungen.
Fahrbetrieb	Überbegriff für das Einstellen und Sichern der Fahrwege, das Abfertigen und Führen der Züge sowie das Rangieren (gemäß BOStrab).
Fahrprofil	Kennlinie, die die Fahrzeuggeschwindigkeit $v$ in Abhängigkeit vom Fahrzeugort $x$ angibt.
Fahrstraße	Technisch gesicherter Fahrbereich, der sich aus mehreren Fahrgabschnitten zusammensetzen kann. Die Sicherung umfasst alle stationären und beweglichen Fahrwegelemente sowie die Stationssicherung dieses Fahrbereiches. Eine Fahrstraße wird nach Abschluss der Fahrwegprüfung festgelegt.
Fahrgabschnitt	Kleinste von der Betriebsleittechnik verwaltete Einheit des Fahrwegs.
Gefahrenfall	Situation, die potentiell einen Schaden für den Menschen beinhaltet.
Instandhaltungskonzept	Konzept für die betriebliche und organisatorische Durchführung der Instandhaltung.
pünktlich	Mit einer Verspätung, die einen definierten Grenzwert nicht überschreitet.
Redundanz	Vorhandensein von mehr funktionsfähigen Mitteln in einer Einheit, als für die Erfüllung der geforderten Funktion notwendig sind.
Regelbetrieb	Betriebslage, bei dem alle betrieblichen Vorgänge spezifikationsgemäß ohne Einschränkung der Leistungsfähigkeit des U-Bahnsystems ablaufen und alle Verspätungen einen definierten Grenzwert nicht überschreiten.
Safety Integrity Level (SIL)	Eine von einer festgelegten Anzahl diskreter Stufen für die Spezifizierung der ausreichenden Sicherheit (siehe DIN EN 50129).
Takt	Fahrplanmäßige Zugfolgezeit.
Ticketing	Prozesse, die für das Fahrgeldmanagement und die Zugangskontrolle von Fahrgästen erforderlich sind (einschließlich Verkauf, Abrechnung, Marktforschung usw.).

Für alle Begriffe, die in der Ausarbeitung nicht explizit definiert werden, gelten die Definitionen nach DIN, EN, ISO und IEC.

## 2.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundfunktionen der Automatisierung .....	14
Abbildung 2: Ursachen von Betriebsstörungen.....	20
Abbildung 3: Technische Struktur eines typischen U-Bahnsystems .....	20
Abbildung 4: Automatische U-Bahnsysteme weltweit .....	27
Abbildung 5: Einflussgrößen auf die Verfügbarkeit .....	28
Abbildung 6: Mögliche Zustände einer Betrachtungseinheit .....	29
Abbildung 7: Zeitliche Anteile technischer Störungen .....	30
Abbildung 8: Verteilung der Anzahl der Fahrzeugstörungen.....	31
Abbildung 9: Zeitliche Aufteilung der Störungen.....	32
Abbildung 10: Verfügbarkeit der Berliner U-Bahn.....	33
Abbildung 11: Ursachen für ausgefallene Fahrplankilometer .....	34
Abbildung 12: Ursachen für ausgefallene Fahrplankilometer auf der U5.....	35
Abbildung 13: Ursachen für Fahrzeugstörungen.....	35
Abbildung 14: Pünktliche Fahrten (bis fünf Minuten verspätet).....	36
Abbildung 15: Pünktliche Fahrten (bis 20 Minuten verspätet) .....	36
Abbildung 16: Verspätungsursachen im Bereich von fünf bis 20 Minuten.....	37
Abbildung 17: Verspätungsursachen im Bereich über 20 Minuten.....	37
Abbildung 18: Verspätungsursachen im Bereich von fünf bis 20 Minuten auf der U5 .....	38
Abbildung 19: Verspätungsursachen im Bereich über 20 Minuten auf der U5.....	38
Abbildung 20: Ursachen von Betriebsstörungen bezogen auf Verfügbarkeitskenngrößen .....	39
Abbildung 21: Vergleich der Verfügbarkeit von U-Bahnsystemen .....	40
Abbildung 22: Betriebsablauf eines Zuges.....	42
Abbildung 23: Einflussgrößen auf die Fahrplanlage eines Zuges .....	44
Abbildung 24: Betriebsszenario mit einer Primärverspätung von einer Minute .....	49
Abbildung 25: Betriebsszenario mit Primärverspätungen von zwanzig Sekunden .....	50
Abbildung 26: Realer Verlauf der Abweichung von der planmäßigen Zugfolgezeit .....	52
Abbildung 27: Entstehung von Zugpaaren im realen Betrieb .....	53
Abbildung 28: Typische Verspätungsverteilung auf der Berliner Linie U2.....	54
Abbildung 29: Typische Verspätungsverteilung auf der Berliner Linie U7.....	55
Abbildung 30: Typische Verspätungsverteilung auf der Pariser Linie 14 (Météor) .....	55
Abbildung 31: Reale mittlere Wartezeit bei einem Drei-Minutentakt .....	59
Abbildung 32: Prozess U-Bahnbetrieb als Black Box.....	64
Abbildung 33: Fahrplanerstellung mit Hilfe von Betriebserfahrung.....	65
Abbildung 34: Ist-Zustand und Vision der Fahrplanerstellung .....	66
Abbildung 35: Verbindung betrieblicher und fahrgastbezogener Anforderungen .....	67

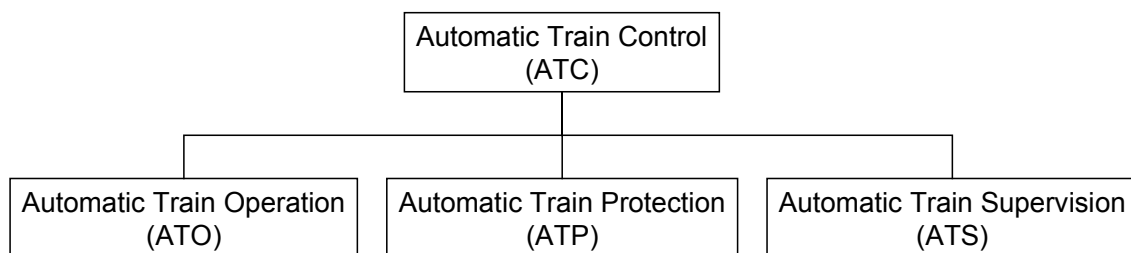
Abbildung 36: Aufbau eines Neuronenkomplexes.....	69
Abbildung 37: Mathematisches Modell eines Neurons.....	69
Abbildung 38: Funktionsgraph der Sigmoidfunktion.....	70
Abbildung 39: Funktionsgraph des Tangens Hyperbolicus .....	71
Abbildung 40: Phasen beim Einsatz Neuronaler Netze.....	72
Abbildung 41: Beispiel für die Struktur eines Neuronalen Netzes.....	72
Abbildung 42: Trainingsphase mit dem Backpropagation-Algorithmus.....	73
Abbildung 43: Herleitung der Vorgehensweise zur Modellbildung U-Bahnbetrieb .....	74
Abbildung 44: Ein- und Ausgangsparameter des Neuronalen Netzes.....	76
Abbildung 45: Fahrzeit auf der gesamten Linie U7 (RSP-R) für verschiedene Abfahrtszeiten (Beispiel).77	
Abbildung 46: Fahrzeit auf einem Teil der Linie U7 (RSP-BLI) für verschiedene Abfahrtszeiten (Beispiel) .....	77
Abbildung 47: Fahrzeit auf der Linie U7 für zwei verschiedene Wochentage (Beispiel) .....	78
Abbildung 48: Fahrzeit auf der Linie U7 in Abhängigkeit von der Abfahrtszeit (Beispiel).....	79
Abbildung 49: Fahrzeit auf der Linie U7 in Abhängigkeit von der Soll-Zugfolgezeit am Startbahnhof (Beispiel) .....	80
Abbildung 50: Fahrzeit auf der Linie U7 in Abhängigkeit von der Zugfolgezeit am Startbahnhof (Beispiel) .....	80
Abbildung 51: Fahrzeit auf der Linie U7 in Abhängigkeit von der Soll-Fahrzeit (Beispiel).....	81
Abbildung 52: Fahrzeit auf der Linie U7 in Abhängigkeit von der Fahrzeit des Vorgängerzuges (Beispiel) .....	82
Abbildung 53: Vorgehensweise zur Bewertung der Simulationsparameter.....	84
Abbildung 54: Original- und simulierte Fahrzeiten im Vergleich (Beispiel).....	85
Abbildung 55: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Mittelwert der Abweichung, Betriebsdaten Berlin.....	87
Abbildung 56: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Mittelwert des Betrages der Abweichung, Betriebsdaten Berlin.....	87
Abbildung 57: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Standardabweichung der Abweichung, Betriebsdaten Berlin.....	88
Abbildung 58: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Maximale positive Abweichung, Betriebsdaten Berlin.....	88
Abbildung 59: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Maximale negative Abweichung, Betriebsdaten Berlin.....	89
Abbildung 60: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Mittelwert der Abweichung, Betriebsdaten Paris.....	90
Abbildung 61: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Mittelwert des Betrages der Abweichung, Betriebsdaten Paris.....	90
Abbildung 62: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Standardabweichung der Abweichung, Betriebsdaten Paris.....	91
Abbildung 63: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Maximale positive Abweichung, Betriebsdaten Paris.....	91
Abbildung 64: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Maximale negative Abweichung, Betriebsdaten Paris.....	92

Abbildung 65: Beispiel einer Simulation mit einem 5#30#1-Netz (RBF).....	92
Abbildung 66: Einfluss der Eingangsparameter, Mittelwert der Abweichung, Betriebsdaten Berlin .....	94
Abbildung 67: Einfluss der Eingangsparameter, Mittelwert des Betrages der Abweichung, Betriebsdaten Berlin .....	94
Abbildung 68: Einfluss der Eingangsparameter, Standardabweichung der Abweichung, Betriebsdaten Berlin .....	95
Abbildung 69: Einfluss der Eingangsparameter, Maximale positive Abweichung, Betriebsdaten Berlin..	95
Abbildung 70: Einfluss der Eingangsparameter, Maximale negative Abweichung, Betriebsdaten Berlin..	96
Abbildung 71: Einfluss der Eingangsparameter, Mittelwert der Abweichung, Betriebsdaten Paris .....	97
Abbildung 72: Einfluss der Eingangsparameter, Mittelwert des Betrages der Abweichung, Betriebsdaten Paris .....	97
Abbildung 73: Einfluss der Eingangsparameter, Standardabweichung der Abweichung, Betriebsdaten Paris .....	98
Abbildung 74: Einfluss der Eingangsparameter, Maximale positive Abweichung, Betriebsdaten Paris....	98
Abbildung 75: Einfluss der Eingangsparameter, Maximale negative Abweichung, Betriebsdaten Paris..	99
Abbildung 76: Bewertung der Eignung zur Simulation des U-Bahnbetriebs, Mittelwert der Abweichung .....	101
Abbildung 77: Bewertung der Eignung zur Simulation des U-Bahnbetriebs, Mittelwert des Betrages der Abweichung.....	102
Abbildung 79: Bewertung der Eignung zur Simulation des U-Bahnbetriebs, Standardabweichung der Abweichung.....	103
Abbildung 80: Bewertung der Eignung zur Simulation des U-Bahnbetriebs, Maximale positive Abweichung.....	104
Abbildung 81: Bewertung der Eignung zur Simulation des U-Bahnbetriebs, Maximale negative Abweichung.....	104
Abbildung 82: Hardwarestruktur der Zugidentifikation und Zuglaufüberwachung.....	107
Abbildung 83: Grunddaten des Fahrplanverwaltungssystems BERTA (Beispiel) [BVG].....	108
Abbildung 84: Der U-Bahnbetrieb als Regelkreis.....	109

### 3 Funktionen der Automatisierung

In diesem Kapitel wird definiert, welche Funktionen in einem U-Bahnsystem automatisiert werden können. Die Funktionen der Automatisierung sind bisher nicht einheitlich in einem Standard oder einer Norm definiert. Für eine systematische Vorgehensweise ist jedoch eine definierte Struktur notwendig. Daher wurde die folgende Struktur auf Basis einschlägiger Erfahrungen aus der Projektarbeit mit Herstellern und Betreibern von Nahverkehrssystemen (u. a. [HAN] und [STA]) erarbeitet.

Die Automatisierung von U-Bahnsystemen lässt sich in verschiedene Funktionen gliedern, um ihren entsprechenden Umfang abzugrenzen. In der obersten Betrachtungsstufe ist dabei eine Einteilung in die Bereiche Fahren, Sichern und Leiten sinnvoll, an die sich die weiteren Untergliederungen anfügen. Die Automatisierung dieser drei Bereiche wird im Englischen bezeichnet mit Automatic Train Operation (ATO), Automatic Train Protection (ATP) und Automatic Train Supervision (ATS). Entsprechend Abbildung 1 lassen sich diese drei Grundfunktionen mit dem Begriff Automatic Train Control (ATC) zusammenfassen. Die Summe der Komponenten, die diese Funktionen ausführen, wird auch als ATC-System bezeichnet.



**Abbildung 1: Grundfunktionen der Automatisierung**

In dieser Ausarbeitung ist der Begriff „automatischer Betrieb“ im Sinne von Manless Train Operation (MTO) definiert, d. h., im Regelfahrbetrieb ist kein Betriebspersonal erforderlich.

Dies bezieht sich bewusst auf den Fahrbetrieb, da selbstverständlich auch bei automatischem Betrieb mit Personal besetzte Betriebsleitstellen Überwachungsfunktionen ausführen können. Für die Instandhaltung und zur Erhöhung der Qualität von Service und Sicherheit für die Fahrgäste ist der Einsatz von Personal ebenfalls weiterhin zu empfehlen.

Neben den Bereichen Fahren, Sichern und Leiten ist auch eine Automatisierung in den Bereichen Haustechnik und Fahrgastservice möglich. Da diese Bereiche für das Durchführen von Zugfahrten nur mittelbar von Bedeutung sind, werden für sie im Rahmen dieser Ausarbeitung keine Entstörungsstrategien betrachtet.

#### 3.1 Bereich Fahren

Eine Automatisierung des Bereichs Fahren erfolgt durch Funktionen, die dem Begriff Automatic Train Operation (ATO) zugeordnet werden.



### 3.1.1 Grundfunktionen des Fahrens

Die Grundfunktionen des Fahrens bestehen aus

- Anfahren: Die Bremsen werden gelöst und die Antriebsmotoren beschleunigen den Zug mit einem festgelegten Beschleunigungsverlauf.
- Beschleunigen: Die Antriebsmotoren beschleunigen den Zug während der Fahrt mit einem festgelegten Beschleunigungsverlauf bis zu einer vorgegebenen Geschwindigkeit  $v_{\text{soll}}$ .
- Rollen: Weder die Antriebsmotoren noch die Bremsen üben eine Kraft aus, so dass der Zug rollt und keine Antriebsenergie zwischen Zug und Strecke übertragen wird.
- Beharren: Die Antriebsmotoren üben gerade soviel Kraft aus, dass die aktuelle Geschwindigkeit  $v_{\text{soll}}$  gehalten wird.
- Bremsen: Die Bremsen und/oder die Antriebsmotoren verzögern den Zug mit einem festgelegten negativen Beschleunigungsverlauf bis zu einer vorgegebenen Geschwindigkeit  $v_{\text{soll}}$ .
- Anhalten: Die Bremsen und/oder die Antriebsmotoren verzögern den Zug mit einem festgelegten negativen Beschleunigungsverlauf bis zur Geschwindigkeit  $v=0$ .
- Halt: Die Bremsen halten den Zug im Stillstand  $v=0$ .

### 3.1.2 Umsetzen eines Fahrprofils

Unter Zuhilfenahme der Grundfunktionen des Fahrens wird ein bestimmtes Fahrprofil umgesetzt. Dieses kann beispielsweise eine zeitoptimierte oder eine energieoptimierte Fahrweise berücksichtigen. Randbedingungen für das Fahrprofil sind die Strecken- und Fahrzeugparameter. Die Einhaltung der Randbedingungen wird durch den Bereich Sichern überwacht. Die Auswahl eines Fahrprofils im Rahmen der Randbedingungen erfolgt durch den Bereich Leiten.

### 3.1.3 Umsetzen der Fahrtenart

Die betrieblichen Randbedingungen für eine Zugfahrt hängen von der Fahrtenart ab, deren Auswahl ebenfalls durch den Bereich Leiten erfolgt. Fahrtenarten lassen sich wie folgt gliedern:

- Regelzugfahrt: Fahrt mit Fahrgästen von einem vorgegebenen Startbahnhof zu einem vorgegebenen Zielbahnhof mit Halt an Zwischenbahnhöfen nach Fahrplan.
- Kehrfahrt: Fahrt auf zwei nacheinander eingestellten Fahrstraßen, bevor die zweite Fahrstraße befahren wird, findet ein Richtungswechsel statt.
- Aussetzfahrt: Fahrt in ein Bahnsteig- oder Aufstellgleis mit anschließendem Abrüsten des Zuges.
- Einsetzfahrt: Fahrt in ein Bahnsteig- oder Streckengleis nach vorherigem Aufrüsten des Zuges.

- Linksfahrt: Fahrt entgegen der Regelfahrtrichtung eines Streckengleises (der Begriff Linksfahrt wird gewählt, weil in Deutschland bei zweigleisigen U-Bahnsystemen die Regelfahrtrichtung rechts ist<sup>1</sup>).
- Pendelfahrt: Fahrt auf einem für andere Züge gesperrten Gleis in beide Fahrrichtungen zwischen mindestens zwei Bahnhöfen.
- Kuppelfahrt: Fahrt mit stark reduzierter Geschwindigkeit in ein besetztes Gleis zum Ankuppeln an einen anderen Zug.
- Betriebsfahrt: Fahrt ohne Fahrgäste zu betrieblichen Zwecken. Der Zug muss nicht an jedem Bahnhof halten.
- Fahrt auf Ersatzauftrag: Fahrt mit reduzierter Geschwindigkeit nach Erhalt eines Ersatzauftrages von der Leitstelle. Diese automatische Fahrt darf aus Sicherheitsgründen nur in besonderen Fällen ausgeführt werden und dient Entstörungszwecken. Sie ist mit einer Fahrt auf mündlichen Auftrag im konventionellen Betrieb vergleichbar.

Neben diesen automatischen Fahrten sind als Rückfallebene verschiedene personalgeführte Fahrten denkbar, wie z. B. das Fahren auf Sicht bei Betriebsstörungen.

## 3.2 Bereich Sichern

Eine Automatisierung des Bereichs Sichern erfolgt durch Funktionen, die dem Begriff Automatic Train Protection (ATP) zugeordnet werden.

Generell teilt sich der Bereich Sichern in die Unterbereiche Sichern von Zugfahrten und Fahrgastsicherheit, wobei sich beide auf die objektive Sicherheit im Sinne von „Safety“ beziehen, im Gegensatz zur subjektiven Sicherheit „Security“, auf die im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht eingegangen wird.

### 3.2.1 Sichern von Zugfahrten

Zugfahrten werden durch folgende Funktionen gesichert:

- Fahrwegsicherung: Bevor und während eine Zugfahrt über eine Fahrstraße erfolgt, werden alle zugehörigen Weichen (inklusive Flankenschutz gewährende) form-schlüssig festgelegt und gegen Verstellen gesichert. Ebenso werden Fahrten entgegen der Richtung der festgelegten Fahrstraße verhindert.
- Abstandshaltung: Der Abstand von einem Zug bis zum nächsten sicherungstechnisch erfassbaren Hindernis (andere Züge, Gleisabschlüsse, nicht festgelegte Fahrwege) wird so geregelt, dass der Abstand mindestens dem aktuellen Bremsweg des Zuges entspricht.
- Sichern gegen Überschreitung der zulässigen Geschwindigkeit: Es wird sichergestellt, dass ein Zug beim Befahren eines Streckenabschnitts nicht die für diesen Abschnitt zulässige Höchstgeschwindigkeit überschreitet.

---

<sup>1</sup> Weltweit gibt es U-Bahnsysteme mit sowohl rechts als auch links als Regelfahrtrichtung.

- **Sichern der Zugvollständigkeit:** Ein Zug wird kontinuierlich auf Vollständigkeit überwacht. Im Falle einer ungewollten Zugtrennung wird für alle Einheiten eine Zwangsbremung eingeleitet.
- **Detektion von Entgleisungen:** Eine Entgleisung wird erkannt und unverzüglich eine Zwangsbremung eingeleitet.

### **3.2.2 Fahrgastsicherheit**

Die Fahrgastsicherheit wird durch die Funktionen Schutz der Fahrgäste in den Zügen und Schutz der Fahrgäste auf den Bahnsteigen gewährleistet. Die Schutzfunktionen sind für sich ordnungsgemäß verhaltende Fahrgäste ausgelegt. Es ist nicht Aufgabe der Schutzfunktionen, grob fahrlässig handelnde oder vorsätzlich gegen Betriebsvorschriften verstoßende Personen zu schützen.

- **Schutz der Fahrgäste in den Zügen:** Fahrgäste in Zügen sind durch eine entsprechende Ansteuerung der Fahrgasttüren vor einem versehentlichen Verlassen des Zuges außerhalb des Bahnsteigs oder während sich der Zug in Bewegung befindet zu schützen. Ein Ausnahmefall besteht bei Gefahren im Fahrgastraum eines Zuges (z. B. Feuer). In solchen Fällen wird Fahrgästen das Verlassen des Fahrgastraumes bei Stillstand des Zuges ggf. auch außerhalb von Bahnsteigen ermöglicht.
- **Schutz der Fahrgäste auf den Bahnsteigen:** Fahrgäste auf Bahnsteigen werden vor Gefahren durch fahrende Züge oder Berührung mit stromführenden Einrichtungen geschützt.

## **3.3 Bereich Leiten**

Eine Automatisierung des Bereichs Leiten erfolgt durch Funktionen, die dem Begriff Automatic Train Supervision (ATS) zugeordnet werden.

Insbesondere der Bereich Leiten ist für Entstörungsstrategien, die den Kern der vorliegenden Ausarbeitung bilden, von großer Bedeutung, da in diesem Bereich Maßnahmen zur Entstörung eingeleitet und durchgeführt werden.

Der Bereich Leiten lässt sich in vier Unterbereiche aufteilen.

### **3.3.1 Betriebsplanung**

Die Betriebsplanung erfolgt durch das Erstellen eines detaillierten Fahrplans. Dieser enthält alle notwendigen Angaben für die Durchführung des automatischen Betriebs (u. a. Angaben über zu befahrende Fahrstraßen sowie Fahr-, Aufenthalts- und Kehrzeiten und über zu benutzende Fahrzeuge). Der Fahrplan kann flexibel gestaltet sein, indem er keine Abfahrtszeiten sondern nur Zeittakte für das Einsetzen von Zugfahrten vorgibt oder sich am aktuellen Fahrgastaufkommen orientiert.

### **3.3.2 Betriebsdurchführung**

Der automatische Betrieb wird gemäß Fahrplan durchgeführt: Züge werden entsprechend auf- und abgerüstet, Fahrstraßen werden eingestellt, Fahraufträge (mit Vorgabe der Fahrtenart und des Fahrprofils) werden gegeben usw.

### **3.3.3 Betriebsüberwachung und -disposition**

Die Betriebsüberwachung und -disposition erfolgt in der Regel von einer zentralen Leitstelle aus. Mit einer Zuglaufüberwachung werden Orte und Geschwindigkeiten der Züge inklusive Fahrplanlage kontinuierlich dargestellt. Auf Anzeigeeinrichtungen werden außerdem Gleisbilder mit den eingestellten Fahrstraßen angezeigt. Die Zustände aller am Betrieb beteiligten Komponenten werden erfasst und angezeigt.

Das Fahrgastaufkommen wird ebenfalls erfasst und dargestellt.

Alle Informationen werden entsprechend ihrer Wichtigkeit protokolliert.

Im Fall eines Abweichens des Betriebs vom vorgegebenen Fahrplan werden Maßnahmen zur Entstörung eingeleitet. Hierzu kann der Fahrplan kurzfristig abgeändert werden, um einen Notbetrieb aufrecht zu halten.

## 4 Ursachen von Betriebsstörungen

In diesem Kapitel wird auf die Ursachen von Betriebsstörungen unter Berücksichtigung ihrer betrieblichen Auswirkungen eingegangen. Dabei werden sowohl im konventionellen als auch im automatischen Betrieb auftretende Betriebsstörungen betrachtet.

Die folgenden Definitionen wurden auf Basis einschlägiger Erfahrungen aus der Projektarbeit mit Herstellern und Betreibern von Nahverkehrssystemen (u. a. [HAN] und [STA]) erarbeitet und orientieren sich an der Norm DIN EN 50126.

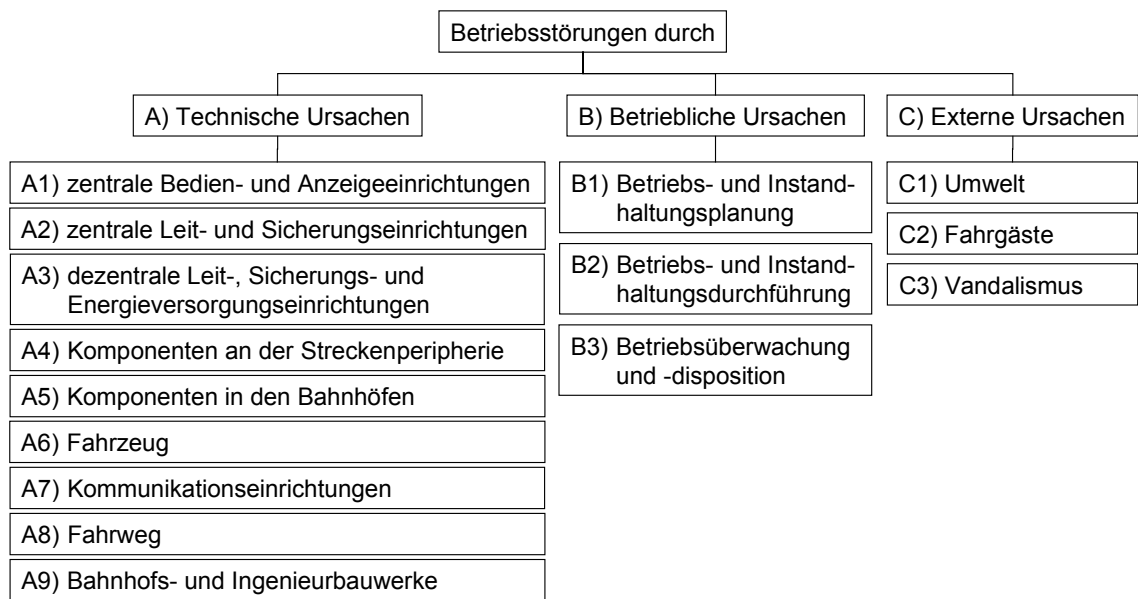
### **Klassifizierung der betrieblichen Auswirkungen von Betriebsstörungen**

Um eine systematische Vorgehensweise zu ermöglichen, erfolgt eine betriebliche Klassifizierung der Störungen in Anlehnung an DIN EN 50126.

- Klasse 1, Unkritische Störung:  
Die Störung wirkt sich nicht auf den Fahrbetrieb aus; sie hat meist nur komforteinschränkende Folgen. Störungen der Klasse 1 sind beispielsweise Teilausfälle der Fahrgastraumheizung, Ausfälle von Fahrtreppen und Ausfälle der Fahrgastinformation.
- Klasse 2, Kritische Störung, Betriebsbehinderung:  
Der Fahrbetrieb wird durch die Störung behindert, er kann jedoch weiterhin aufrecht erhalten werden. Störungen der Klasse 2 sind beispielsweise Beeinträchtigungen am Gleisoberbau, die zur Einrichtung einer Langsamfahrstelle führen, Störungen der Haltestellen-Gefahrraum-Überwachung, die die Weiterfahrt mit Hilfe einer Rückfallebene erlauben und Störungen von Hilfsbetrieben eines Zuges, die eine verlangsamte Weiterfahrt erfordern.
- Klasse 3, Signifikante Störung, Betriebsstillstand:  
Der Fahrbetrieb ist durch die Störung an mindestens einer Stelle unterbrochen. Störungen der Klasse 3 sind beispielsweise unter den Zug gelangte Fahrgäste, Zugentgleisungen und -auffahrten, technische Störungen, die eine Weiterfahrt des Zuges verhindern.

### **Ursachen für Betriebsstörungen**

Die Ursachen für Betriebsstörungen lassen sich gemäß Abbildung 2 in drei Bereiche gliedern.

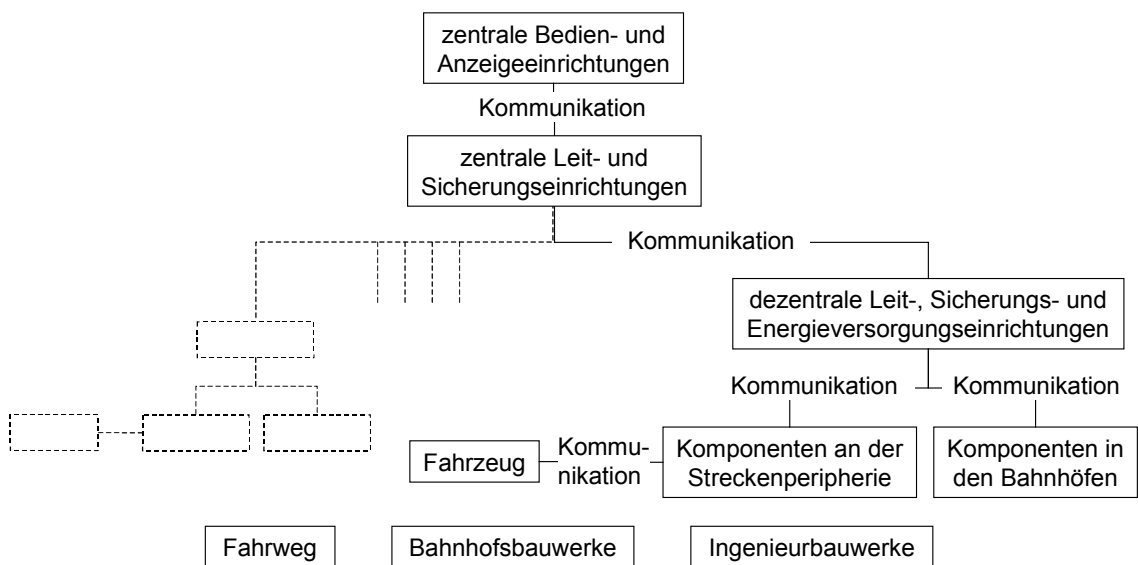


**Abbildung 2: Ursachen von Betriebsstörungen**

Die drei Bereiche werden in den Kapiteln 4.1, 4.2 und 4.3 weiter untergliedert.

#### 4.1 Technische Ursachen

Um die technischen Ursachen von Betriebsstörungen betrachten zu können, muss die Struktur des U-Bahnsystems definiert sein. In Abbildung 3 ist die technische Struktur eines typischen U-Bahnsystems dargestellt.



**Abbildung 3: Technische Struktur eines typischen U-Bahnsystems**

#### **4.1.1 Zentrale Bedien- und Anzeigeeinrichtungen**

Die zentralen Bedien- und Anzeigeeinrichtungen befinden sich in der Betriebsleitstelle. Sie bilden die Mensch-Maschine-Schnittstelle der ATS-Funktionen.

Im Regelbetrieb ist die Aufgabe des Betriebspersonals in der Betriebsleitstelle das Überwachen des Betriebsablaufs. Im gestörten Betrieb muss das Personal aktiv durch dispositive Maßnahmen in das Betriebsgeschehen eingreifen.

##### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

Sobald eine weitere Betriebsstörung auftritt, die dispositive Maßnahmen des Personals erfordert, kann dieses nicht mehr eingreifen. Das bedeutet, dass es in kurzer Zeit zu einem Betriebsstillstand (Klasse 3) kommt.

Aufgrund der Schwere eines solchen Ausfalls sind die zentralen Bedien- und Anzeigeeinrichtungen in der Regel mit Hilfe von Redundanz hoch zuverlässig ausgelegt.

#### **4.1.2 Zentrale Leit- und Sicherungseinrichtungen**

Die zentralen Leit- und Sicherungseinrichtungen befinden sich in der Regel in unmittelbarer Nähe zur Betriebsleitstelle. Hier werden in erster Linie die Funktionen des Bereichs Leiten (ATS-Funktionen) ausgeführt. Ein Ausfall einer Komponente bedeutet den Ausfall der zugehörigen Funktion, wie beispielsweise

- Zuglaufüberwachung,
- Zuglenkung,
- Stellwerksbedienung,
- Telekommunikation,
- Melde- und Überwachungsfunktionen,
- Diagnose.

##### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

Ein Ausfall bewirkt einen Betriebsstillstand (Klasse 3).

Aufgrund der Schwere eines solchen Ausfalls sind die zentralen Leit- und Sicherungseinrichtungen in der Regel mit Hilfe von Redundanz hoch zuverlässig ausgelegt.

#### **4.1.3 Dezentrale Leit-, Sicherungs- und Energieversorgungseinrichtungen**

Zu diesen Komponenten gehören insbesondere Stellwerke, Unterwerke und dezentrale Bereichsrechner. Sie übernehmen den streckenseitigen Anteil der ATO- und ATP-Funktionen sowie der Energieversorgung für einen bestimmten örtlichen Bereich und dienen der Datenverdichtung zwischen Streckenperipherie und zentraler Leitstelle.

##### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

Ein Ausfall bewirkt in dem zugehörigen örtlichen Bereich einen Betriebsstillstand (Klasse 3).

Aufgrund der Schwere eines solchen Ausfalls sind die dezentralen Leit-, Sicherungs- und Energieversorgungseinrichtungen in der Regel mit Hilfe von Redundanz hoch zuverlässig ausgelegt.

#### **4.1.4 Komponenten an der Streckenperipherie**

Zu diesen Komponenten gehören u. a. Weichenstellantriebe, Gleisfreimeldeeinrichtungen, Komponenten zur Zugbeeinflussung, Antennen, Signale, Pumpen, Wehrkammertore sowie Einrichtungen zur Tunnelbeleuchtung und Notausstiegsüberwachung.

##### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

Ein Ausfall bewirkt in der Regel eine Betriebsbehinderung (Klasse 2) und nur in seltenen Fällen einen Betriebsstillstand (Klasse 3). Bevor die Komponente wieder in Stand gesetzt wird, kann der Betrieb im betreffenden Bereich häufig mit eingeschränkter Leistung weitergeführt werden. Hierzu kommen in der Regel Rückfallebenen zum Tragen, wie beispielsweise die Ausgabe von Ersatzfahraufträgen.

#### **4.1.5 Komponenten in den Bahnhöfen**

Hier ist zu unterscheiden in den Fahrbetrieb unmittelbar beeinflussende Komponenten, wie Nothaltschalter und Einrichtungen zur Haltestellen-Gefahrraum-Überwachung, und Komponenten der Haustechnik und des Fahrgastservices, wie Fahrtreppen, Aufzüge, CCTV-Kameras, Beschallungs- und Ticketingeinrichtungen.

##### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

Erstere verhalten sich wie Komponenten an der Streckenperipherie (siehe 4.1.4), das heißt, sie bewirken in der Regel eine Betriebsbehinderung (Klasse 2), die mit Hilfe einer Rückfallebene einen eingeschränkten Betrieb erlaubt. Ein Ausfall der Komponenten der Haustechnik und des Fahrgastservices erfordert keine unmittelbaren betrieblichen Gegenmaßnahmen, da es sich lediglich um unkritische Störungen (Klasse 1) handelt, die nach dem entsprechenden Instandhaltungskonzept beseitigt werden.

#### **4.1.6 Fahrzeug**

Die Komponenten eines Fahrzeugs besitzen für den Fahrbetrieb eine sehr unterschiedliche Relevanz. Dementsprechend vielschichtig sind auch die Auswirkungen eines Ausfalls.

##### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

Ein Betriebsstillstand (Klasse 3) kann u. a. durch einen Ausfall des Antriebssystems, des Bremssystems sowie der ATO- und ATP-Komponenten bewirkt werden.

Eine Betriebsbehinderung (Klasse 2) kann u. a. durch einen Ausfall der Fahrgasttüren, von Hilfsbetrieben sowie einen Teilausfall des Antriebssystems bewirkt werden.

Unkritische Störungen (Klasse 1) können u. a. durch den Ausfall von Komponenten der Fahrgastinformation und durch Teilausfälle der Fahrgastraumheizung und der Fahrgastraumbeleuchtung bewirkt werden.



#### **4.1.7 Kommunikationseinrichtungen**

Kommunikationseinrichtungen dienen zur Verbindung aller bisher aufgeführten technischen Ebenen. Sie dienen zur Übertragung von Steuerbefehlen (von höheren zu tieferen Ebenen), von Meldungen (von tieferen zu höheren Ebenen) sowie Sprach- und Bild-Informationen.

##### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

Zu einem Betriebsstillstand (Klasse 3) kommt es beim Ausfall der Übertragungseinrichtungen für Steuerbefehle und Meldungen. Daher sind diese in der Regel mit Hilfe von Redundanz hoch zuverlässig ausgelegt.

Ein Ausfall der Übertragungseinrichtungen für Sprach- und Bild-Informationen bewirkt eine unkritische Störung (Klasse 1).

#### **4.1.8 Fahrweg**

Zum Fahrweg gehören der Gleisober- und -unterbau und die Fahrleitungsanlagen.

##### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

Störungen des Fahrwegs können je nach Schweregrad betriebliche Auswirkungen aller drei Klassen bewirken. So können beispielsweise Schienenausbrüche zu unkritischen Störungen, Betriebsbehinderungen oder Betriebsstillständen führen.

#### **4.1.9 Bahnhofs- und Ingenieurbauwerke**

Die Bahnhofsbauwerke umfassen u. a. Bahnsteige, Bahnsteigzugänge, Zwischengeschosse und Empfangshallen. Zu den Ingenieurbauwerken zählen u. a. Brücken, Viadukte, Tunnel, Stützmauern.

##### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

Störungen an Bahnhofs- und Ingenieurbauwerken können wie beim Fahrweg je nach Schweregrad betriebliche Auswirkungen aller drei Klassen bewirken.

### **4.2 Betriebliche Ursachen**

#### **4.2.1 Betriebs- und Instandhaltungsplanung**

Da es für die Betriebs- und Instandhaltungsplanung keine exakt definierte Soll-Größe gibt, wird hier nicht von Störungen oder Fehlern, sondern von Mängeln gesprochen.

Typische Mängel bei der Betriebs- und Instandhaltungsplanung sind

- Mängel im Betriebs- und Instandhaltungskonzept:  
Es bestehen konzeptbedingt Engpässe bzw. Schwachstellen bei der Durchführung von Betrieb und Instandhaltung, z. B. können die festgelegten Strategien zur Entstörung unzureichend sein.
- Mängel in der Personaleinsatzplanung:  
Es steht nicht genügend Personal für den planmäßigen Betrieb oder die Instandhaltung zur Verfügung.

- **Mängel in der Betriebsmitteleinsatzplanung:**  
Es stehen nicht genügend Fahrzeuge für den planmäßigen Betrieb oder nicht genügend Material für die Instandhaltung zur Verfügung.
- **Mängel in der Fahrplangestaltung:**  
Der Fahrplan berücksichtigt das Fahrgastaufkommen unzureichend.

### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

Mängel im Betriebs- und Instandhaltungskonzept können zu Betriebsstörungen aller drei Klassen führen.

Stehen auf Grund von Mängeln in der Personal- und Betriebsmitteleinsatzplanung nicht genügend Personal und Fahrzeuge zur Verfügung, kommt es zum Ausfall von Zugfahrten. Dies verursacht bei im planmäßigen Regelbetrieb ausgelasteten Zügen Fahrgaststauungen, die zu Verspätungen von Zugfahrten führen. Das Gleiche geschieht, wenn der Fahrplan das Fahrgastaufkommen unzureichend berücksichtigt. Beides bewirkt eine Betriebsbehinderung (Klasse 2).

#### **4.2.2 Betriebs- und Instandhaltungsdurchführung**

Fehler bei der Betriebs- und Instandhaltungsdurchführung bedeuten, dass die Durchführung von Betrieb und Instandhaltung von der Betriebs- und Instandhaltungsplanung abweicht:

- **Fehler bei der Durchführung des Betriebs:**  
Je höher der Automatisierungsgrad des U-Bahnsystems ist, desto weniger Handlungen des Personals sind im Regelbetrieb erforderlich und desto geringer ist die Möglichkeit, dass bei der Durchführung des Regelbetriebs durch das Personal verursachte Betriebsstörungen auftreten. Bei einem vollständig automatisierten U-Bahnsystem, das alle Funktionen gemäß Kapitel 3 umfasst, können diese Störungen daher theoretisch nicht auftreten.
- **Fehler bei der Durchführung der Instandhaltung:**  
Wenn die Durchführung der Instandhaltung nicht der Instandhaltungsplanung entspricht, kann dies zu Störungen der Betriebsanlagen und Fahrzeuge führen. Dies bedeutet entweder, dass diese nicht planmäßig einsatzbereit sind, oder, dass es während des Einsatzes zu Störungen kommt.

### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

Wenn Betriebsanlagen und Fahrzeuge auf Grund von Fehlern bei der Durchführung der Instandhaltung nicht planmäßig einsatzbereit sind, verursacht dies Ausfälle von Zugfahrten. Dadurch werden Fahrgaststauungen erzeugt, die zu Betriebsbehinderungen (Klasse 2) führen. Störungen, die während des Einsatzes von Betriebsanlagen und Fahrzeugen auftreten, können zu allen in Kapitel 4.1 genannten Auswirkungen führen.

#### **4.2.3 Betriebsüberwachung und -disposition**

Fehler bei der Betriebsüberwachung und -disposition bedeuten, dass im gestörten Betrieb die Entstörung im Rahmen der durch das System gegebenen Möglichkeiten suboptimal durchgeführt wird. Dies beruht auf Fehlentscheidungen, die aus einer Nichtbe-

achtung der festgelegten Entstörungsstrategien bzw. Inkompetenz der Entscheidungsträger resultieren.

### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

Fehler bei der Durchführung von Entstörungsmaßnahmen im gestörten Betrieb verursachen keine neue Betriebsstörung, sondern verlängern die Dauer der bestehenden Betriebsstörung.

## **4.3 Externe Ursachen**

### **4.3.1 Umwelt**

Störungen durch Umwelteinflüsse entstehen dann, wenn Niederschlag, Blitzschlag, elektromagnetische Einflüsse, Wind, Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit oder geologische Veränderungen die in der Systemauslegung berücksichtigten Grenzwerte überschreiten. Diese Einflüsse bewirken z. B. Aufrüstprobleme von Fahrzeugen, Probleme beim Stellen von Weichen, einen verminderten Reibungsbeiwert der Kraftübertragung Rad/Schiene oder sogar eine Blockierung der Strecke durch Hindernisse wie umgefallene Bäume.

### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

Im Fall von Zugfahrtausfällen oder der Verminderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit kommt es zu Betriebsbehinderungen (Klasse 2). Bei einer Streckenblockierung durch Hindernisse kommt es zum Betriebsstillstand (Klasse 3).

### **4.3.2 Fahrgäste**

Fahrgäste verursachen eine Vielzahl verschiedener Betriebsstörungen. Typische Störungen in Verbindung mit Fahrgästen sind u. a.

- Blockierung der Fahrgasttüren,
- akute Erkrankung,
- Manipulation von Fahrgasttüren, Nothaltschaltern und Einrichtungen der Haltestellen-Gefahrraum-Überwachung,
- unbefugtes Eindringen in nicht für Fahrgäste vorgesehene Bereiche,
- Fahrgastunfall (ohne Vorsatz oder Suizid).

### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

Die meisten von Fahrgästen verursachten Betriebsstörungen bewirken eine Betriebsbehinderung (Klasse 2), in seltenen Fällen (z. B. Fahrgast unter Zug) auch einen Betriebsstillstand (Klasse 3).

### **4.3.3 Vandalismus**

Vandalismus bedeutet die fahrlässige oder mutwillige Beschädigung oder Zerstörung von Fahrzeugen und Betriebsanlagen.

### **Auswirkungen einer Betriebsstörung**

In der Regel verursacht Vandalismus unkritische Störungen (Klasse 1), die den Komfort einschränken (Beschädigung von Einrichtungen der Fahrgastinformation, Sitzen, Fenstern etc.) In besonders schweren Fällen kann er auch zu Betriebsbehinderungen (Klasse 2) oder Betriebsstillstand (Klasse 3) führen, wenn für den Fahrbetrieb notwendige Betriebsmittel zerstört werden, z. B. Fahrzeugfenster oder Komponenten der Zug-sicherungstechnik. In diesem Fall spricht man auch von Sabotage.

## 5 Schwachstellenanalyse automatisierter U-Bahnsysteme

Nachdem die Funktionen der Automatisierung definiert und mögliche Ursachen für Betriebsstörungen beschrieben sind, sollen nun die Schwachstellen realer automatisch betriebener U-Bahnsysteme untersucht werden.

Seit den frühen 80er-Jahren des 20. Jahrhunderts existieren weltweit zahlreiche automatisch betriebene U-Bahnsysteme. Schwerpunktmäßig stammen diese aus Japan und Frankreich (siehe Abbildung 4), zwei Ländern, die schon frühzeitig die Vorteile des automatischen schienengebundenen Personennahverkehrs erkannt und sich entsprechend zu Nutze gemacht haben.

In Deutschland wurden zwar Ende der 70er-Jahre Systeme zum automatischen U-Bahnbetrieb entwickelt, wie beispielsweise PUSH in Hamburg [WIE 85] und SELTRAC in Berlin [IFB 88], sie kamen jedoch nicht über die Erprobungsphase hinaus zum praktischen Einsatz. Das gleiche gilt für die automatisch betriebene M-Bahn [AEG 92], die Ende der 80er-Jahre auf einer Teststrecke in Berlin mit Fahrgästen erprobt wurde. Lediglich zwei fahrerlose Verkehrsmittel, die auf Grund ihrer Bauart jedoch nicht als U-Bahn zu bezeichnen sind, befinden sich in Deutschland heute im Regaleinsatz:

- die H-Bahn auf dem Gelände der Universität Dortmund [GIE 84] und
- der People Mover auf dem Flughafen Frankfurt am Main [JAN 97].

Insofern kann, was automatisch betriebene U-Bahnsysteme betrifft, von einem Technologievorsprung Japans und Frankreichs auf diesem Gebiet gesprochen werden.



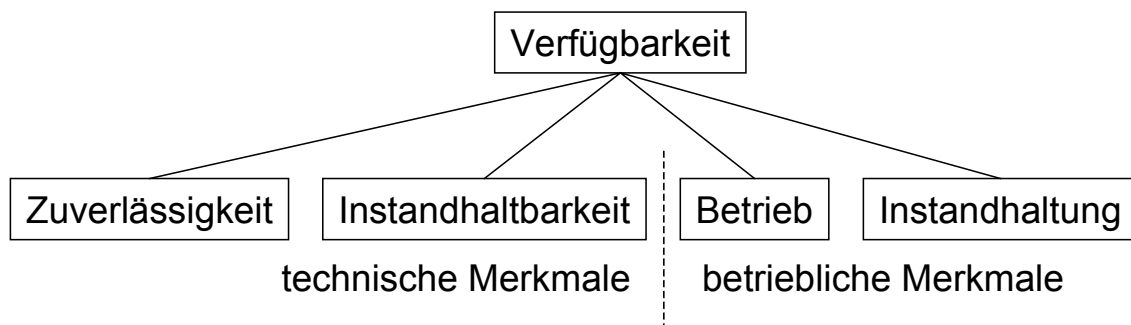
**Abbildung 4: Automatische U-Bahnsysteme weltweit**

In Abbildung 4 sind alle automatisch betriebenen U-Bahnsysteme weltweit dargestellt. Daneben gibt es noch eine Vielzahl von automatischen Flughafenzubringern und People Movern, die sich jedoch in Bauart, Kapazität und Betriebskonzept von den genannten Systemen unterscheiden und daher nicht aufgeführt sind. Automatischer Betrieb

bedeutet (siehe Kapitel 1), dass für den Regelfahrbetrieb kein Betriebspersonal erforderlich ist.

Für eine Schwachstellenanalyse sind detaillierte Betriebsdaten notwendig, die jedoch auf Grund des Konkurrenzdrucks schwierig zu erhalten sind. In diesem Kapitel werden recherchierte Daten aus den Jahren 1996 bis 2000 von den automatisch betriebenen U-Bahnsystemen Lille, London, Lyon, Paris, Tokio und Vancouver analysiert und ausgewählte Kenngrößen dargestellt. Die Ergebnisse können zum Teil auf weitere Städte übertragen werden, da viele Automatisierungs-Komponenten in mehreren Städten eingesetzt werden, sodass von Ähnlichkeiten im Ausfallverhalten ausgegangen werden kann.

Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Verfügbarkeit. Sie wird gemäß DIN EN 50126 sowohl durch technische als auch durch betriebliche Merkmale geprägt (siehe Abbildung 5).



**Abbildung 5: Einflussgrößen auf die Verfügbarkeit**

Hieraus wird deutlich, dass Hersteller und Betreiber eines Systems gemeinsam die Verantwortung für die Verfügbarkeit tragen.

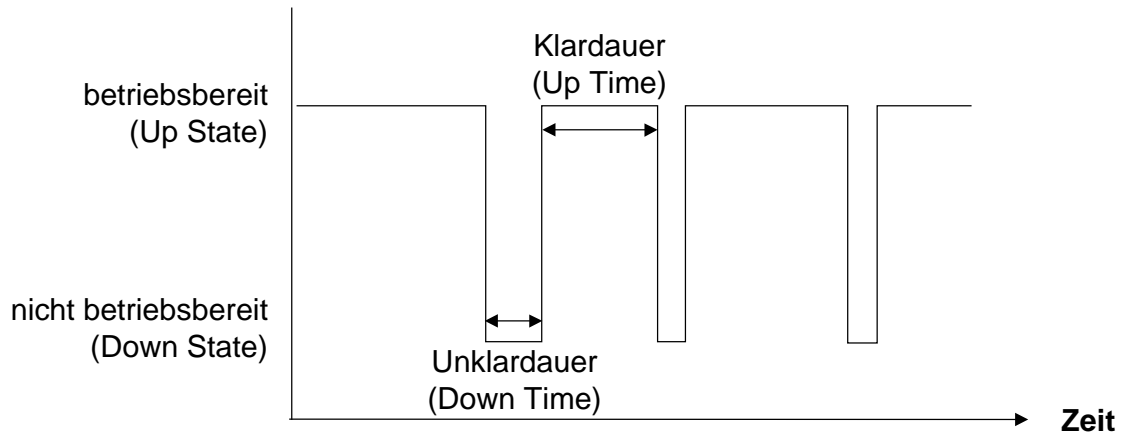
Für die Verfügbarkeit sind zwei Betrachtungsebenen zu unterscheiden:

- Subsysteme und Einzelkomponenten,
- das Gesamtsystem.

### **Verfügbarkeit von Subsystemen und Einzelkomponenten**

Es wird davon ausgegangen, dass jede Betrachtungseinheit zwei Zustände einnehmen kann: Sie ist betriebsbereit (Up State) oder sie ist nicht betriebsbereit (Down State) (siehe Abbildung 6). Dabei ist anzumerken, dass betriebsbereit nicht bedeutet, dass die Betrachtungseinheit betrieben werden muss. Beispielsweise sind Reservezüge in der Aufstellanlage in der Regel betriebsbereit (Up State), auch wenn sie gerade nicht betrieben werden.

Die Zeit, in der die Betrachtungseinheit betriebsbereit ist, wird als Klardauer bezeichnet (Up Time), die Zeit, in der die Betrachtungseinheit nicht betriebsbereit ist, wird als Unklardauer bezeichnet (Down Time).



**Abbildung 6: Mögliche Zustände einer Betrachtungseinheit**

Für jede reparierbare Betrachtungseinheit lassen sich somit zwei statistische Kenngrößen ableiten<sup>2</sup>:

- die mittlere Klardauer: Mean Up Time (MUT),
- die mittlere Unklardauer: Mean Down Time (MDT).

Sie können auch auf bestimmte Betriebsstörungen bezogen werden und lassen sich statistisch aus einem realen Betrieb ermitteln.

Aus diesen beiden Kenngrößen können weitere statistische Größen berechnet werden. Die Summe von MUT und MDT wird als Taktzeit bezeichnet. Die Verfügbarkeit  $V$  einer Betrachtungseinheit ergibt sich wie folgt (gemäß DIN EN 50126):

$$V = \frac{\sum \text{Klardauern}}{\text{Gesamtzeit}} = \frac{\text{mittlere Klardauer}}{\text{Taktzeit}} = \frac{\text{MUT}}{\text{MUT} + \text{MDT}}. \quad (\text{Gleichung 1})$$

### Verfügbarkeit des Gesamtsystems

Für die Betrachtung des Gesamtsystems muss eine andere Berechnungsmethode herangezogen werden, da das Gesamtsystem mehr als nur zwei mögliche Zustände einnehmen kann. Die Verfügbarkeit des Gesamtsystems kann bezüglich der ausgefallenen Fahrplankilometer ausgedrückt werden:

$$V_{\text{Fahrplankilometer}} = \frac{\text{Istkilometer}}{\text{Plankilometer}}, \quad (\text{Gleichung 2})$$

oder bezüglich der verspäteten Zugfahrten:

$$V_{\text{Pünktlichkeit}} = \frac{\text{Anzahl der pünktlichen Zugfahrten}}{\text{Gesamtzahl der Zugfahrten}}. \quad (\text{Gleichung 3})$$

<sup>2</sup> Die hier benutzten statistischen Kenngrößen entsprechen der Definition nach DIN EN 50126. Die Mean Time Between Failures (MTBF) wird bewusst nicht benutzt, da diese Größe in verschiedenen Normen und Richtlinien unterschiedlich definiert ist (VDI-Richtlinie 4001 und DIN EN 50126 contra DIN 40041).

Beide Kenngrößen sind unabhängig von der spezifischen Linienlänge und der Linienauslastung.

Plankilometer beziehen sich auf den aktuellen Fahrplan, das heißt, Baustellen, planmäßiger Pendelverkehr, Sonderzüge usw. sind berücksichtigt.

Für die Anzahl pünktlicher Zugfahrten ist ein Bezug zum Ausmaß der zulässigen Verspätung notwendig, z. B. bis zu drei Minuten verspätet.

## 5.1 Lille: VAL-System

Der erste Abschnitt des VAL-Systems (Véhicules Automatiques Légers) wurde 1983 eröffnet. Heute existieren zwei Linien mit einer Länge von insgesamt 45 km mit 62 Stationen, die alle mit Bahnsteigtüren ausgerüstet sind. Das Automatisierungssystem stammt von MATRA.

Monatlich gibt es im Durchschnitt zwei technisch bedingte Betriebsstörungen mit einer mittleren Dauer von sechs Minuten und zehn Betriebsstörungen mit einer mittleren Dauer von drei Minuten. Alle weiteren technisch bedingten Betriebsstörungen liegen unterhalb einer Minute [LIL].

Das Verhältnis Istkilometer zu Plankilometer beträgt 99,97 %.

Das System VAL wird außer in Lille noch in Chicago, Paris, Taipeh und Toulouse eingesetzt.

## 5.2 London: Docklands Light Railway

Der erste Abschnitt der Docklands Light Railway wurde 1987 eröffnet. Heute wird sie auf einer Länge von 27 km mit 33 Stationen (alle ohne Bahnsteigtüren) betrieben. Das automatische Fahren auf elektrische Sicht (moving block) wird durch das Automatisierungssystem SELTRAC von ALCATEL ermöglicht.

Das Verhältnis Istkilometer zu Plankilometer beträgt 98 % [LON].

Insgesamt machen technische Störungen 56 % der zeitlichen Unverfügbarkeit aus. Sie gliedern sich qualitativ wie folgt.

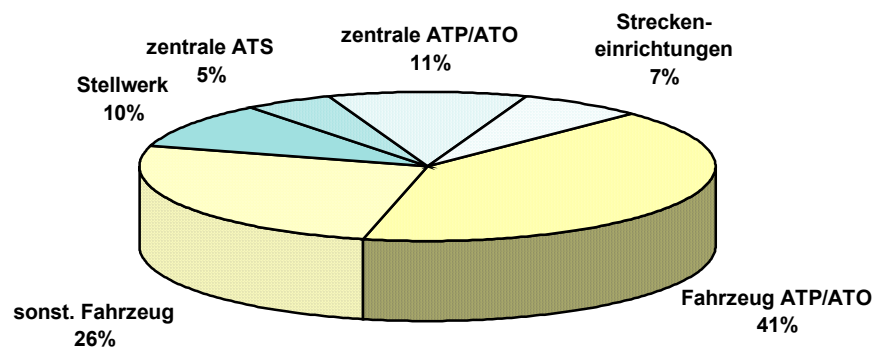
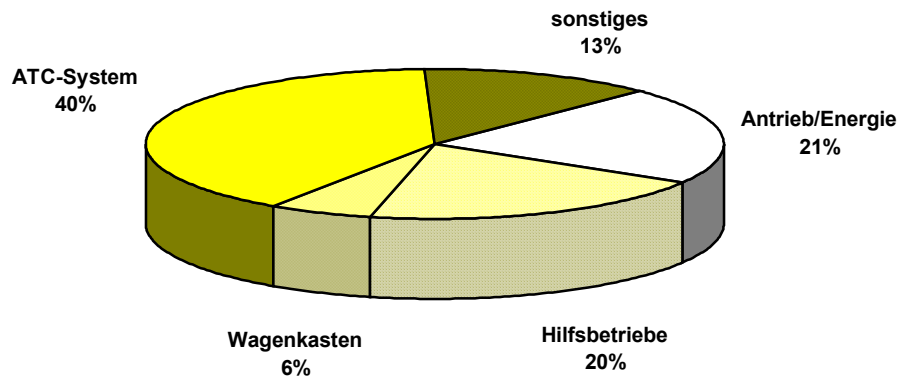


Abbildung 7: Zeitliche Anteile technischer Störungen





**Abbildung 8: Verteilung der Anzahl der Fahrzeugstörungen**

Das Automatisierungssystem SELTRAC wird außer in London beispielsweise noch in automatisch betriebenen U-Bahnsystemen in Ankara, Kuala Lumpur und Vancouver eingesetzt.

### 5.3 Lyon: Linie D

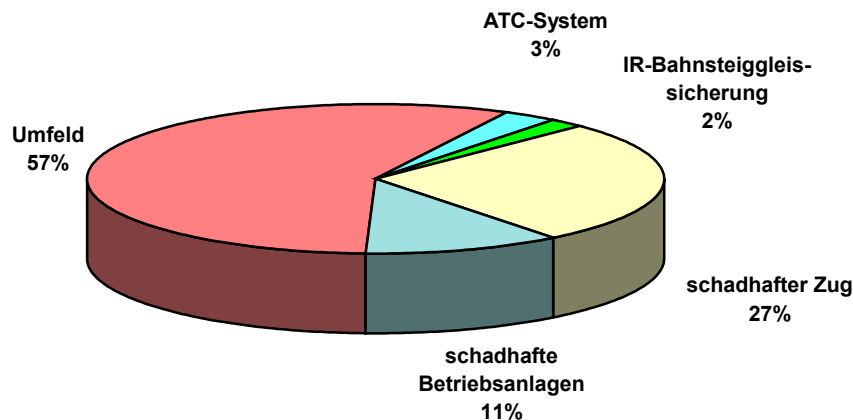
Die Linie D der Lyoner U-Bahn wurde 1992 als automatische U-Bahn in Betrieb genommen. Sie umfasst 15 Stationen auf einer Länge von 11,5 km. Das hier eingesetzte Automatisierungssystem von MATRA mit der Bezeichnung MAGGALY (Métro Automatique Grand Gabarit de l'Agglomération Lyonnaise) ermöglicht das automatische Fahren auf elektrische Sicht (moving block).

Zugunsten einer Infrarotüberwachung wurde auf Bahnsteigtüren verzichtet.

Die Unverfügbarkeit des Gesamtsystems liegt im Mittel bei 1,5 % (18 Minuten pro Tag von 20 Stunden Betrieb). Das Verhältnis Istkilometern zu Plankilometern beträgt 98,5 % [LYO].

43 % der Störungen sind auf technische Ursachen zurückzuführen, wie Fahrzeugstörungen (27 %), Störungen an Betriebsanlagen (11 %), ATC-Komponenten (3 %) und Infrarot-Bahnsteiggleissicherung (2 %).

57 % der Störungen sind durch externe Einflüsse bedingt, wie Fahrgäste im Bahnsteiggleis (14 %), Manipulation der Infrarot-Bahnsteiggleissicherung (11 %), Auslösung der Türkantenüberwachung (9 %), Fehlauflösung der Infrarot-Bahnsteiggleissicherung (8 %), Mißbrauch von Notrufsprechstellen (5 %), Fehlalarm ohne bekannte Ursache (5 %), Vandalismus und Sabotage (4 %).



**Abbildung 9: Zeitliche Aufteilung der Störungen**

#### **5.4 Paris: Linie 14 (Météor)**

Im Herbst 1998 wurde Météor, die Linie 14 der Pariser Métro, in Betrieb genommen. Die vollständig unterirdisch verlaufende und mit Bahnsteigtüren ausgerüstete Linie bedient sieben Stationen auf einer Länge von 7,2 km. Sie ist mit dem Automatisierungssystem SAET von MATRA ausgerüstet.

Das Verhältnis Istkilometer zu Plankilometer beträgt 99 % [PAR].

Die Pünktlichkeit beträgt 99,2 %. Für den Météor ist Pünktlichkeit wie folgt definiert: Die Fahrgäste müssen in der Nebenverkehrszeit maximal sechs Minuten und in der Hauptverkehrszeit maximal drei Minuten warten.

#### **5.5 Tokio: Yurikamome Line**

Die Linie Yurikamome wurde 1995 als automatische Hochbahn in Betrieb genommen. Sie umfasst zwölf Stationen auf einer Länge von 11,9 km, ist vollständig aufgeständert und ist von ihrer Transportkapazität her mit einer U-Bahn vergleichbar. Es werden auf den Stationen Bahnsteigtüren benutzt.

Das Verhältnis Istkilometer zu Plankilometer beträgt 99,85 % [TOK].

Die überwiegende Mehrheit der Betriebsstörungen wird durch Umwelteinflüsse (Taifun) und Fahrgäste (Missbrauch von Alarmschaltern) verursacht. Technische Störungen treten hauptsächlich im Leitsystem der Fahrzeuge auf.

#### **5.6 Vancouver: Sky Train**

Der erste Abschnitt des Sky Train wurde 1986 eröffnet. Heute befinden sich auf der Länge von 28,5 km insgesamt 20 Stationen. Das automatische Fahren auf elektrische Sicht (moving block) wird durch das Automatisierungssystem SELTRAC von ALCA-TEL ermöglicht. Anstatt Bahnsteigtüren werden Druckmatten in den Bahnsteiggleisen zur Detektion von Personen im Gleis eingesetzt.

Das Verhältnis Istkilometern zu Plankilometern beträgt 99,4 %. Das Verhältnis von pünktlichen Zugfahrten (weniger als zwei Minuten Verspätung) zur Gesamtzahl der Zugfahrten beträgt 95,0 % [VAN].

Die Verspätungen werden überwiegend durch Fahrgäste verursacht. Große Verspätungen werden teilweise durch extreme Umweltbedingungen verursacht, z. B. starken Schneefall.

## 5.7 Berlin: Linie U5

Bei der Berliner U-Bahn gibt es bisher keinen automatischen fahrerlosen Regelbetrieb. Anfang der 80er-Jahre wurde das Automatisierungssystem SELTRAC nach einem erfolgreichen Testbetrieb auf der Linie U4 nicht in den Regelbetrieb übernommen.

Im Rahmen des Projektes STAR (System-Technik für den Automatischen Regelbetrieb) wird der automatische Betrieb auf einem Streckenabschnitt der Linie U5 zwischen den Bahnhöfen Friedrichsfelde und Biesdorf-Süd erprobt [CZE 99] [RIT 00]. Nach einem erfolgreichen Erprobungsabschluss soll die gesamte Referenzlinie U5 (18,4 km, 19 Stationen) entsprechend ausgerüstet werden. Um den Vergleich mit anderen automatischen Betrieben zu ermöglichen, ist daher eine Betrachtung der im konventionellen Betrieb vorhandenen Schwachstellen sinnvoll.

### 5.7.1 Kenngröße Istkilometer zu Plankilometer

Die Verfügbarkeits-Kenngröße Istkilometer zu Plankilometer (Gleichung 2) ergibt sich wie in Abbildung 10 dargestellt [BVG].

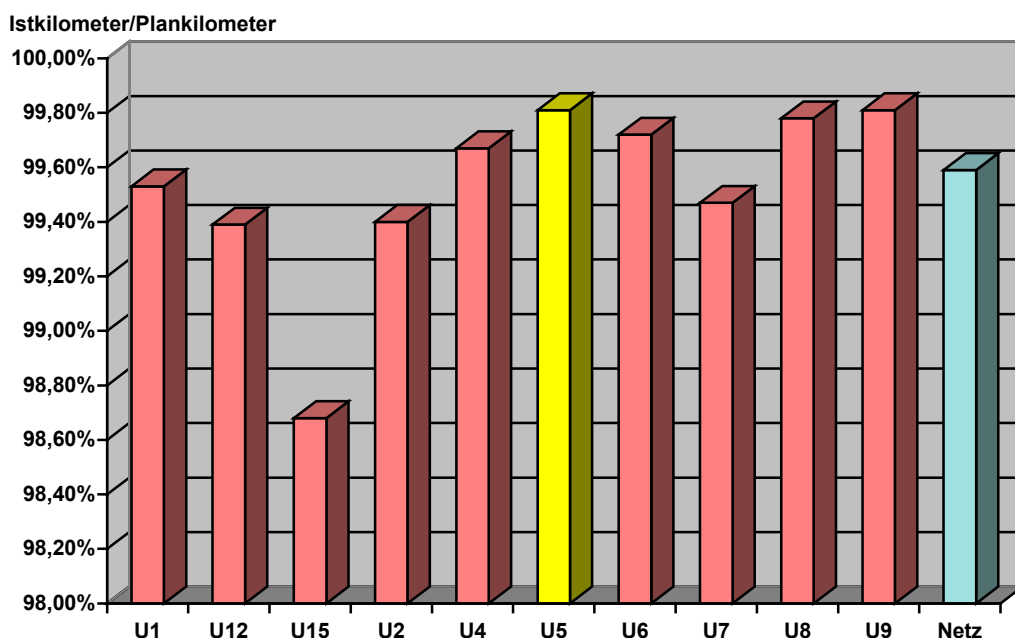
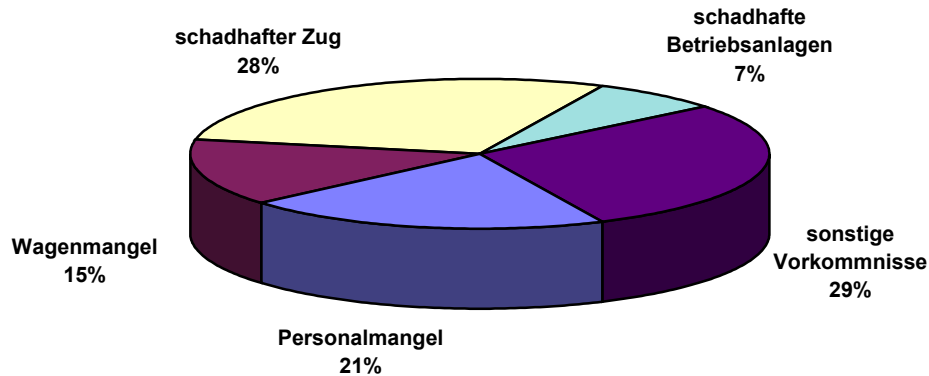


Abbildung 10: Verfügbarkeit der Berliner U-Bahn

Es ergibt sich ein Mittelwert von 99,59 % über alle Linien. Der Wert der U5 liegt bei 99,81 %.

### Ursachen für ausgefallene Fahrplankilometer

Die Ursachen für ausgefallene Fahrplankilometer ergeben sich wie in Abbildung 11 dargestellt.

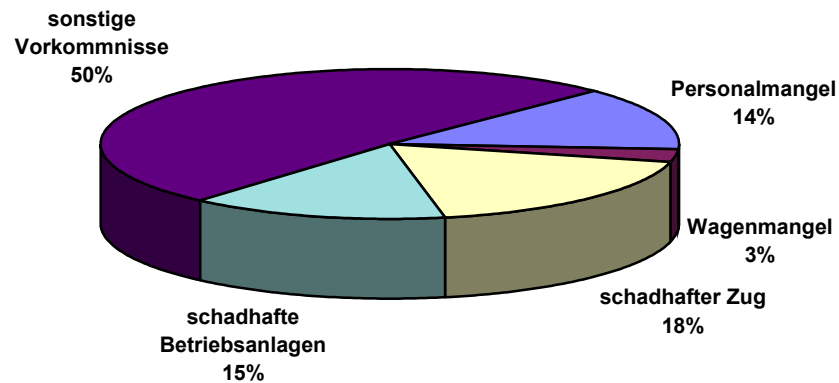


**Abbildung 11: Ursachen für ausgefallene Fahrplankilometer**

Beim Wagenmangel handelt es sich um Defizite in der Instandhaltungsplanung sowie in der Einteilung von Standzügen, die als Reserve vorgehalten werden. Zu sonstigen Betriebsvorkommnissen gehören solche, die durch Fahrgäste, Umwelteinflüsse oder Feuerwehreinsätze verursacht sind.

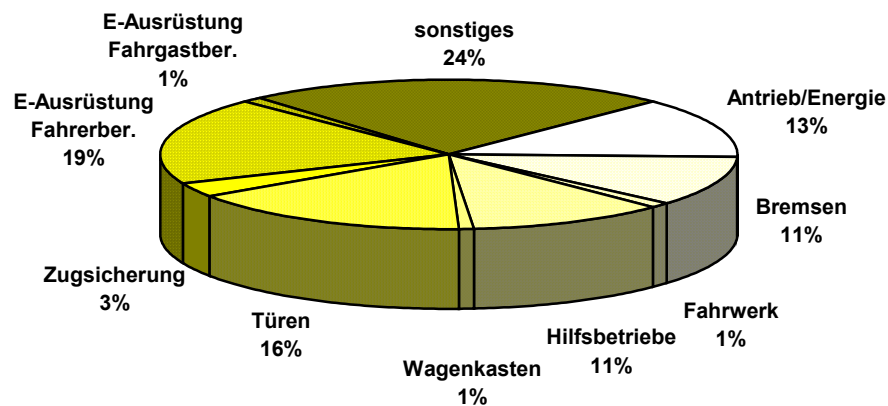
Gemäß der Aufteilung in Kapitel 4 können die Bereiche Betriebsanlagen und schadhafte-r Zug als technische, Personal-mangel und Wagenmangel als betriebliche und die sonstigen Betriebsvorkommnisse als externe Ursachen eingeordnet werden.

Betrachtet man die U5 getrennt, so ergeben sich die Ursachen wie in Abbildung 12 dargestellt.



**Abbildung 12: Ursachen für ausgefallene Fahrplankilometer auf der U5**

Für das gesamte Netz ergibt sich der durch schadhafte Züge verursachte Anteil wie in Abbildung 13 dargestellt.

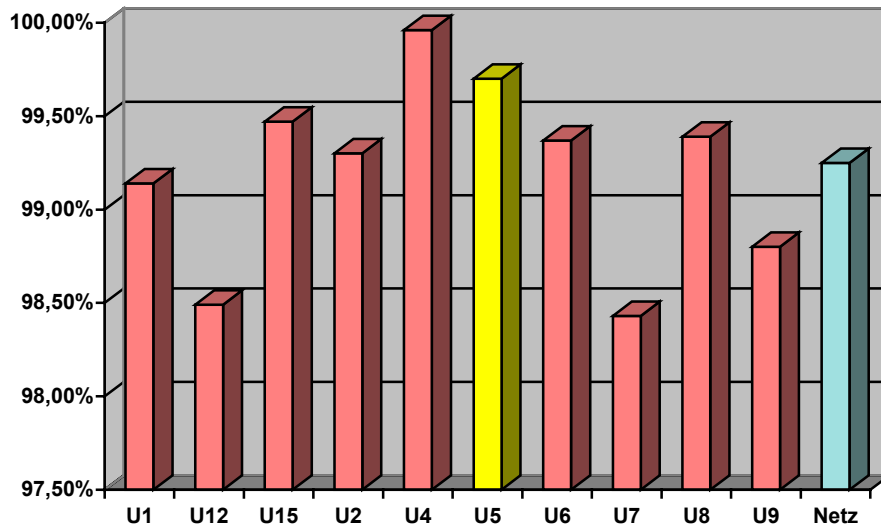


**Abbildung 13: Ursachen für Fahrzeugstörungen**

### 5.7.2 Kenngröße Pünktliche Zugfahrten/Gesamtzahl der Zugfahrten

Eine weitere Kenngröße ist der prozentuale Anteil der pünktlichen Zugfahrten zur Gesamtzahl der Zugfahrten (Gleichung 3). Es wird dabei unterschieden zwischen Verspätungen über fünf Minuten und Verspätungen über 20 Minuten.

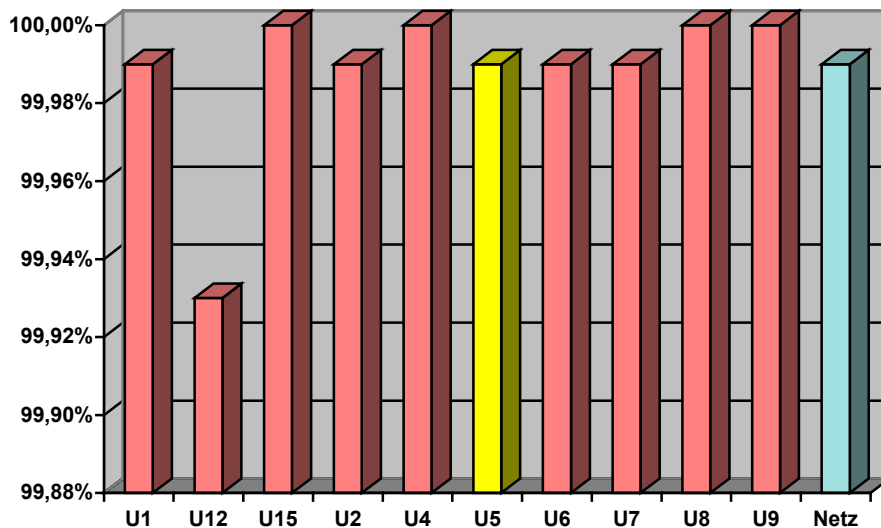
**Pünktliche Fahrten  
/Gesamtzahl Fahrten**



**Abbildung 14: Pünktliche Fahrten (bis fünf Minuten verspätet)**

Insgesamt sind 99,25 % aller Zugfahrten bis zu fünf Minuten verspätet. Auf der U5 beträgt der Wert 99,70 %.

**Pünktliche Fahrten  
/Gesamtzahl Fahrten**



**Abbildung 15: Pünktliche Fahrten (bis 20 Minuten verspätet)**

Insgesamt sind 99,99 % aller Zugfahrten bis zu 20 Minuten verspätet. Auf der U5 beträgt der Wert ebenfalls 99,99 %.

## Ursachen für Verspätungen

Die Verspätungsursachen ergeben sich wie folgt:

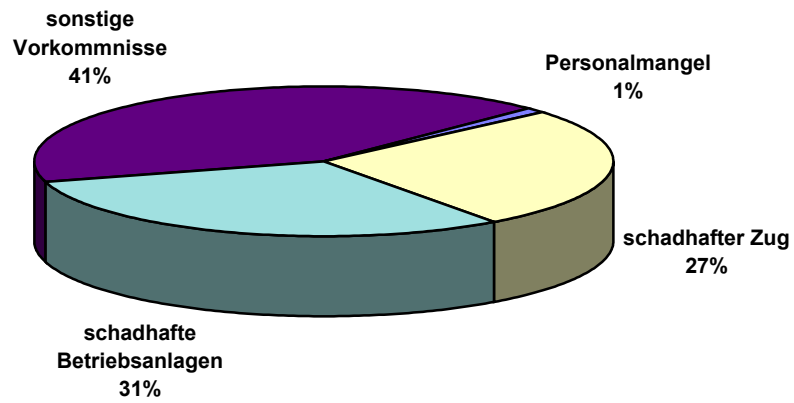


Abbildung 16: Verspätungsursachen im Bereich von fünf bis 20 Minuten

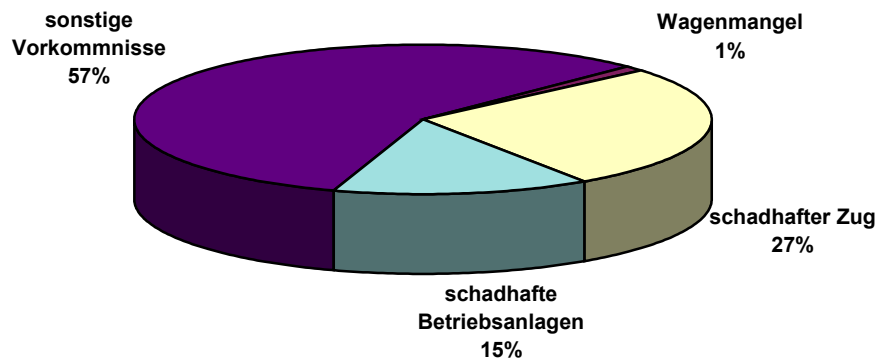
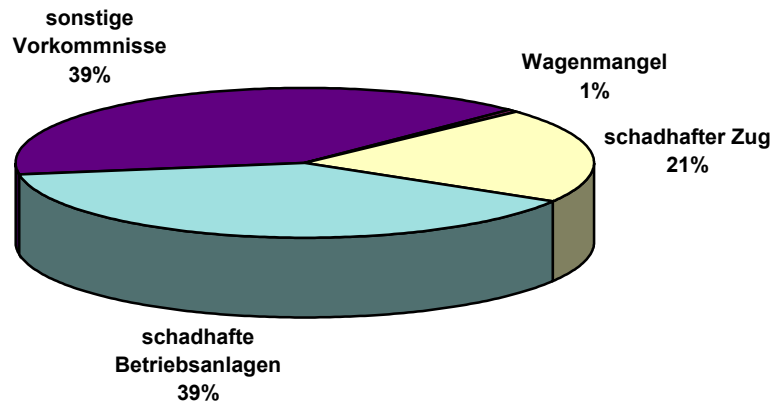
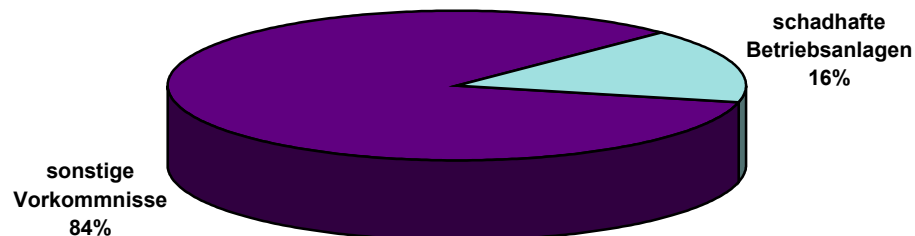


Abbildung 17: Verspätungsursachen im Bereich über 20 Minuten

Betrachtet man die U5 getrennt, so ergeben sich die folgenden Ursachen:



**Abbildung 18: Verspätungsursachen im Bereich von fünf bis 20 Minuten auf der U5**



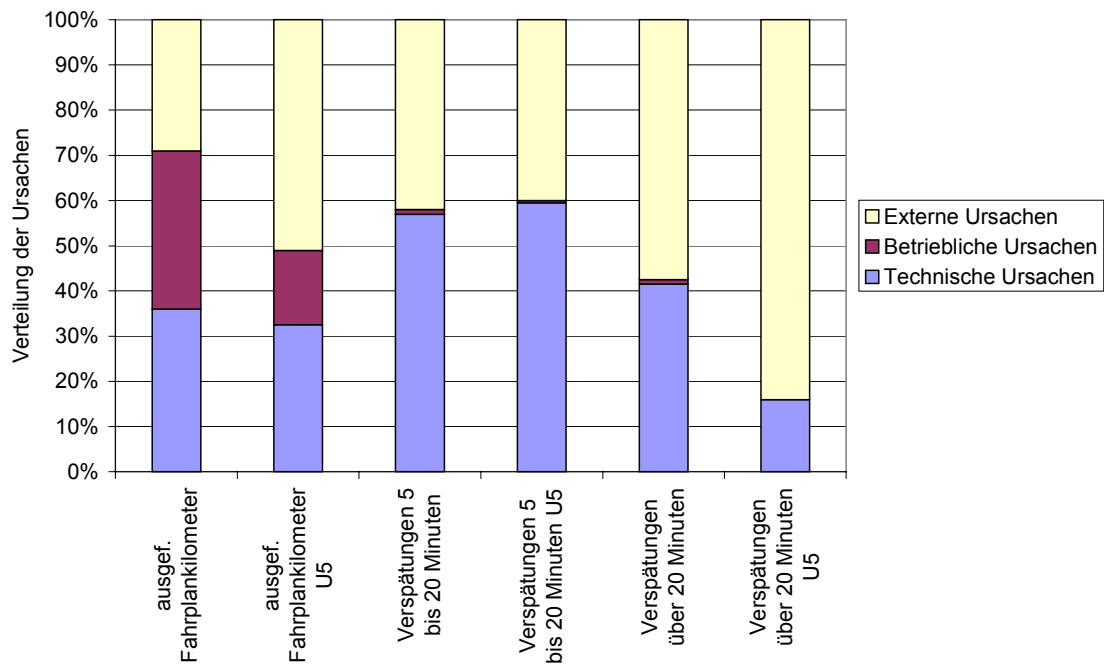
**Abbildung 19: Verspätungsursachen im Bereich über 20 Minuten auf der U5**

Zu den sonstigen Vorkommnissen zählen auch Fahrgastunfälle. Bei der Berliner U-Bahn gibt es im Monatsdurchschnitt ca. drei Fahrgastunfälle. Ein Fahrgastunfall verursacht in der Regel eine Betriebsunterbrechung von über einer Stunde.

### 5.7.3 Fazit für Berliner U-Bahn

Die Verteilung der Ursachen von Betriebsstörungen für die oben dargestellten Verfügbarkeitskenngrößen ist in Abbildung 20 dargestellt.





**Abbildung 20: Ursachen von Betriebsstörungen bezogen auf Verfügbarkeitskenngrößen**

Für ausgefallene Fahrplankilometer sind in ähnlichem Maße technische, betriebliche und externe Ursachen verantwortlich. Bei Verspätungen zwischen fünf und 20 Minuten überwiegen technische und bei Verspätungen über 20 Minuten externe Ursachen.

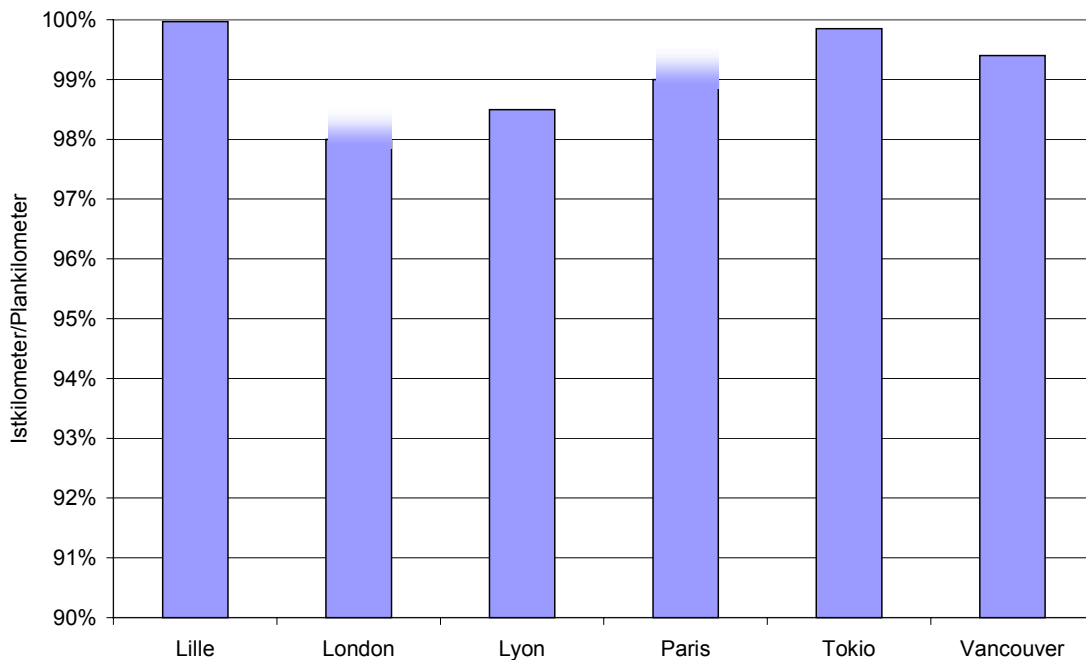
Auf Grund betrieblicher Ursachen wie Personal- und Wagenmangel entstehen vor allem Zugfahrtenausfälle. Dies ist sachlich nachvollziehbar, da Personal und Wagen entweder zur fahrplanmäßig vorgesehenen Zeit zur Verfügung stehen oder nicht; das heißt, diese Ursache macht sich weniger auf Verspätungen bemerkbar.

Die Verfügbarkeit der Linie U5 liegt sowohl auf die ausgefallenen Fahrplankilometer als auch auf die Verspätungen bezogen über dem Durchschnitt des gesamten U-Bahnnetzes. Die Ursachen hierfür hängen jedoch nicht mit dem automatischen Betrieb zusammen, und sollen daher im Rahmen dieser Analyse nicht weiter untersucht werden.

## 5.8 Zusammenfassung der Schwachstellenanalyse

In Abbildung 21 ist die Verfügbarkeit bezüglich der ausgefallenen Fahrplankilometer vergleichend für die analysierten automatischen U-Bahnsysteme dargestellt. Die Angaben für London und Paris enthalten keine Nachkommastellen und sind daher nur als Tendenz zu interpretieren.

Neben der Verfügbarkeit konnten weitere Parameter, wie beispielsweise spezifische Kosten für Betrieb und Instandhaltung, für die betrachteten Systeme nicht ermittelt werden. Daher können die folgenden Darstellungen nicht für Aussagen über das Kosten-Nutzen-Verhältnis der entsprechenden Systeme herangezogen werden.



**Abbildung 21: Vergleich der Verfügbarkeit von U-Bahnsystemen**

Da das VAL-System in Lille bereits seit 1983 im Einsatz ist, handelt es sich um das am meisten ausgereifte System; es besitzt die höchste Verfügbarkeit. Jedoch ist der Sky Train in Vancouver trotz seiner langen Betriebserfahrung (seit 1986) nicht das System mit der zweithöchsten Verfügbarkeit. London und Lyon weisen zwar absolut gesehen hohe aber relativ die niedrigsten Verfügbarkeiten auf.

Diese Tatsachen legen die Schlussfolgerung nahe, dass bei Systemen ohne Bahnsteigtüren (London, Lyon, Vancouver) auf Grund zusätzlicher Betriebsstörungen grundsätzlich von einer geringeren Verfügbarkeit ausgegangen werden muss. Bei diesen extern verursachten Betriebsstörungen handelt es sich um Vorfälle, bei denen Fahrgäste auf dem Bahnsteig stürzen und in das Lichtraumprofil des Zuges geraten, potentielle Selbstmörder vor einfahrende Züge springen und sich Personen aus Leichtsinnigkeit auf das Bahnsteiggleis begeben.

Aus Kostengründen werden von den Betreibern anstatt Bahnsteigtüren teilweise alternative Systeme zur Haltestellen-Gefahrraum-Überwachung favorisiert [CLA 00]. Dies ist auch bei den aktuellen Pilotprojekten zum automatischen Betrieb in Berlin, Frankfurt am Main und Nürnberg der Fall. Gegenüber Bahnsteigtüren besitzen diese Systeme jedoch zwei entscheidende Nachteile:

- Die Manipulation des Systems durch Fahrgäste sowie das unbefugte Eindringen in den überwachten Bereich führen zu erheblichen Verfügbarkeitseinbußen. Zum Beispiel werden bei der automatisch betriebenen Linie D in Lyon ein Drittel aller Betriebsstörungen in Zusammenhang mit der Infrarot-Bahnsteiggleissicherung verursacht (siehe 5.3).
- Unfälle, bei denen Personen direkt vor einfahrende Züge fallen oder springen, können durch das System nicht verhindert werden. Beispielsweise treten im Berliner U-Bahnnetz im monatlichen Durchschnitt drei solcher Fälle auf (siehe 5.7.2).

Nun werden nochmals die technisch verursachten Betriebsstörungen betrachtet. In der folgenden Tabelle ist zusammenfassend neben der Verfügbarkeit der Anteil technischer Ursachen an der Unverfügbarkeit der analysierten automatischen U-Bahnsysteme dargestellt.

Stadt	Verwendung von Bahnsteigtüren	Istkilometer/ Plankilometer	Anteil technischer Ursachen für Unverfügbarkeit
Lille	ja	99,97 %	< 50 %
London	nein	98 %	56 %
Lyon	nein	98,50 %	43 %
Paris	ja	99 %	keine Angaben
Tokio	ja	99,85 %	< 50 %
Vancouver	nein	99,4 %	< 50 %

**Tabelle 1: Verfügbarkeit und Anteil technischer Ursachen an der Unverfügbarkeit für die betrachteten U-Bahnsysteme**

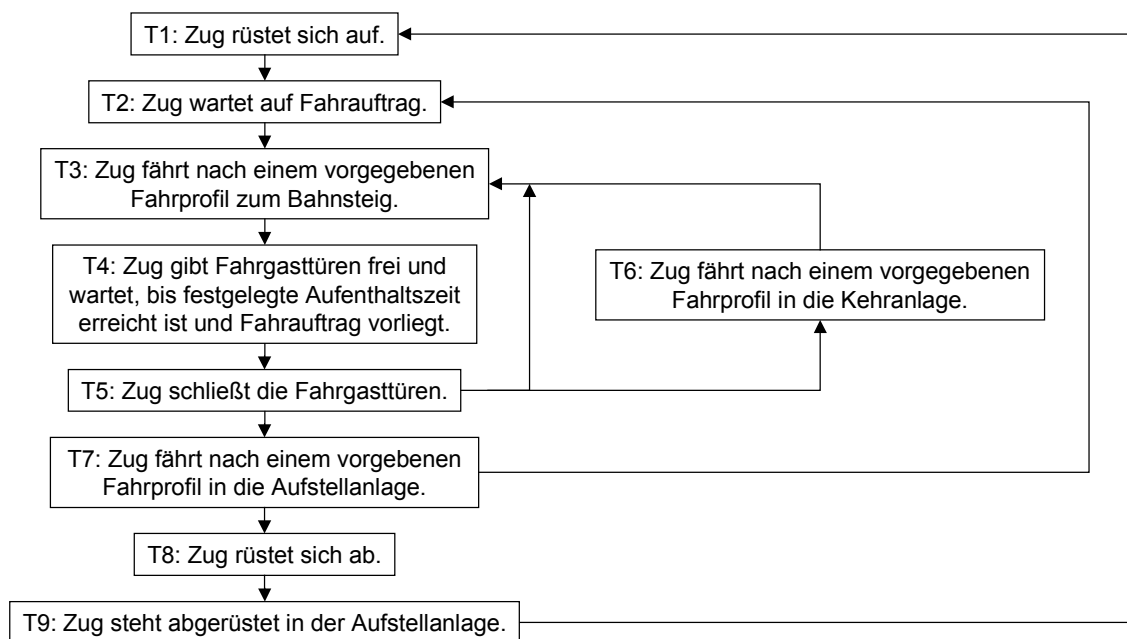
Insgesamt überwiegen bei fast allen untersuchten automatisch betriebenen U-Bahnsystemen (bis auf London) die extern und betrieblich verursachten Betriebsstörungen. Daher zeigt die Schwachstellenanalyse, dass hier das größte Potenzial für Entstörungsstrategien liegt.

## 6 Charakteristika des U-Bahnbetriebs

In diesem Kapitel werden typische Charakteristika des U-Bahnbetriebs analysiert, so dass darauf aufbauend im folgenden Kapitel Entstörungsstrategien definiert werden können.

### 6.1 Betriebsablauf eines Zuges

Ein wesentlicher Teilprozess des U-Bahnbetriebs ist der Betriebsablauf eines Zuges. Dieser ist in Abbildung 22 schematisch dargestellt.



**Abbildung 22: Betriebsablauf eines Zuges**

Die in Abbildung 22 dargestellten Zeiten sind für jeden Zug im Fahrplan berücksichtigt und festgelegt. Befehle zum Auf- und Abrüsten werden gemäß Fahrplan gegeben. Fahraufträge werden gegeben, wenn die Abfahrtszeit gemäß Fahrplan erreicht und die entsprechende Fahrstraße eingestellt ist.

Die Zeit T1 ist durch den Aufbau des Fahrzeugs bedingt. Sie besitzt einen konstanten Anteil (Aktivierung und Selbsttest der Fahrzeugkomponenten) sowie einen Anteil, der von der Umgebungstemperatur abhängt (Vorheizzeit).

T2 ist eine Pufferzeit, die dazu dient, Toleranzen beim Aufrüsten und fahrplanbedingte Wartezeiten im Fahrzeugumlauf auszugleichen. Sie sollte aus energetischen Gründen so weit wie möglich minimiert werden.

Die Zeiten T3, T6 und T7 sind durch Eigenschaften des Fahrzeugs und der Strecke bedingt (Gleisstopologie, zulässige Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungsvermögen etc.). Ferner ist maßgeblich, inwieweit eine energieoptimale oder eine zeitoptimale Fahrweise gewünscht ist.

Die Zeit T4 ist dann optimal, wenn sie exakt der Zeit entspricht, die die Fahrgäste zum Aus- und Einsteigen benötigen. Sie kann für jeden Bahnhof eine ggf. auch tageszeitabhängig festgelegte Konstante sein oder sich dynamisch am Fahrgastaufkommen orientieren. In bestimmten Betriebssituationen kann es auch notwendig sein, die Fahrgasttüren mit den üblichen akustischen und optischen Warnsignalen zu schließen, bevor alle auf dem Bahnsteig wartenden Fahrgäste eingestiegen sind, z. B. um den Aufbau von Verspätungen zu verhindern.

Die Zeit T5 entspricht der Dauer vom Auslösen des Türschließbefehls bis zum endgültigen Schließen aller Fahrgasttüren. Durch Fehlverhalten von Fahrgästen, die die Warnsignale nicht beachten, kann es zu einem mehrfachen Türschließversuch kommen, der die Abfahrt des Zuges entsprechend verzögert.

Die Zeit T8 ist nur durch den Aufbau des Fahrzeugs bedingt und daher konstant.

Die Zeit T9 ergibt sich ausschließlich aus der Fahrzeugeinsatzplanung.

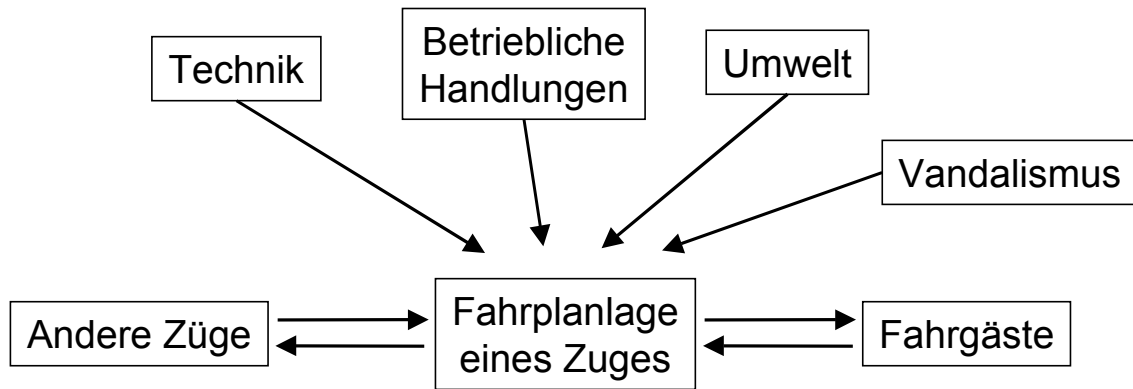
Gemäß der in Kapitel 4 vorgenommenen Aufteilung der Ursachen von Betriebsstörungen werden die Zeiten T1 bis T9 von unterschiedlichen Größen beeinflusst.

- Technische Ursachen beeinflussen die Zeiten T1, T3, T4, T5, T6, T7 und T8.
- Betriebliche Ursachen beeinflussen die Zeiten T2, T3, T4, T6, T7 und T9.
- Externe Ursachen beeinflussen die Zeiten T1, T3, T4, T5, T6 und T7.

Neben diesen Einflussfaktoren auf einen Zug gibt es Wechselwirkungen zwischen den Zügen. Die Zeiten T2, T3, T6 und T7 können direkt von anderen Zügen beeinflusst werden, indem diese das Einstellen von Fahrstraßen und somit die Weiterfahrt eines Zuges verhindern.

Die Beeinflussung erfolgt also nicht nur in einer Richtung von den genannten Faktoren auf einen betrachteten Zug, sondern auch als Rückkopplung von einem Zug auf andere Züge und auf den Faktor Fahrgäste. Auf andere Züge entsteht die direkte Rückkopplung, indem der Zug die für ihn eingestellten Fahrstraßen für andere Züge blockiert. Auf die Fahrgäste entsteht die direkte Rückkopplung trivialerweise, indem der Zug die Fahrgäste von einem zum anderen Bahnsteig befördert und damit die Anzahl der auf dem Bahnsteig wartenden Fahrgäste verändert.

Zur Übersicht sind in Abbildung 23 die Einflussgrößen auf die Fahrplanlage eines Zuges dargestellt, wobei sich der Bereich externe Einflüsse gemäß Kapitel 4 in Umwelt, Vandalismus und Fahrgäste gliedert.



**Abbildung 23: Einflussgrößen auf die Fahrplanlage eines Zuges**

Verspätungen, die direkt durch Technik, betriebliche Handlungen, Umwelt oder Vandalismus verursacht sind, werden als Primärverspätungen bezeichnet, Verspätungen durch andere Züge als Folgeverspätungen. Der Anteil der durch Fahrgäste verursachten Verspätungen, der lediglich auf die Fahrplanlage des betrachteten Zuges zurückzuführen ist (z. B. Ansammlung wartender Fahrgäste auf Grund einer Zugverspätung), gilt als Folgeverspätung, sonstige durch Fahrgäste verursachte Verspätungen als Primärverspätungen.

Es wird deutlich, dass die Einflussgrößen andere Züge und Fahrgäste eine besondere Qualität besitzen, da durch die vorhandene Rückkopplung ein schwingungsfähiges System entsteht, das eine Aufschaukelung von Störeinflüssen ermöglicht. Dieses Phänomen wird im Folgenden untersucht.

## 6.2 Phänomen der Aufschaukelung von Verspätungen

In Kapitel 6.2.1 wird das Phänomen der Aufschaukelung anhand eines mathematisch-analytischen Modells analysiert [ZAS 99]. Die Anwendung der hergeleiteten Formeln auf praktische Betriebsszenarien erfolgt in Kapitel 6.2.2. Inwieweit das Modell auf den realen Betrieb übertragbar ist, wird in Kapitel 6.2.3 untersucht.

### 6.2.1 Mathematisches Modell der Aufschaukelung

Bei einem Taktverkehr mit einer Zugfolge von unter zehn Minuten kann davon ausgegangen werden, dass die Fahrgäste nahezu gleichmäßig zu einem Bahnhof strömen, das heißt ihre Ankunftszeit auf dem Bahnsteig unabhängig vom Fahrplan ist. Betrachtet man nur eine Fahrtrichtung, so werden alle auf dem Bahnsteig wartenden Fahrgäste versuchen, in einen eintreffenden Zug einzusteigen. Damit ergibt sich gemäß [BER 82] die Gleichung

$$\text{Anzahl der Einsteiger} = F \cdot Z = L \cdot T \quad \text{mit} \quad \text{(Gleichung 4)}$$

$F$  = Fahrgastzufluss zum Bahnhof (Personen/s),

$Z$  = Zugfolgezeit (s) (jeweils bei Abfahrt des Zuges),

$L$  = Leistungsfähigkeit der Türen (Personen/s),

$T$  = Türöffnungszeit (s).

Im Fall einer Zugverspätung ergibt sich

$$Z = Z_{\text{plan}} + V_0 + (T - T_{\text{plan}}) \quad \text{mit} \quad \text{(Gleichung 5)}$$

$Z_{\text{plan}}$  = planmäßige Zugfolgezeit (s),

$V_0$  = Verspätung (s) bei Ankunft im Bahnhof,

$T_{\text{plan}}$  = planmäßige Türöffnungszeit (s).

Setzt man Gleichung 5 in Gleichung 4 ein und löst die Gleichung nach der Türöffnungszeit auf, so ergibt sich

$$T = \frac{F \cdot (Z_{\text{plan}} + V_0 - T_{\text{plan}})}{L - F}. \quad \text{(Gleichung 6)}$$

Für planmäßig eintreffende Züge gilt der Spezialfall von Gleichung 1

$$\text{Anzahl der Einsteiger} = F \cdot Z_{\text{plan}} = L \cdot T_{\text{plan}}$$

$$\Leftrightarrow T_{\text{plan}} = \frac{F \cdot Z_{\text{plan}}}{L}. \quad \text{(Gleichung 7)}$$

Die zusätzliche Verspätung eines Zuges bei der Abfahrt, die durch eine verlängerte Türöffnungszeit entsteht, ergibt sich durch Einsetzen von Gleichung 6 und Gleichung 7 in

$$\Delta T = T - T_{\text{plan}} = V_0 \frac{F}{L - F}. \quad \text{(Gleichung 8)}$$

Die Gesamtverspätung bei der Abfahrt des Zuges beträgt folglich

$$V_1 = V_0 + \Delta T = V_0 \left(1 + \frac{F}{L - F}\right) = V_0 \frac{L}{L - F}. \quad \text{(Gleichung 9)}$$

Setzt der Zug die Fahrt fort und ist der Fahrgastzufluss am nächsten Bahnhof wie am ersten, so beträgt die Gesamtverspätung bei der Abfahrt vom nächsten Bahnhof

$$V_2 = V_1 \left(1 + \frac{F}{L - F}\right) = V_1 \frac{L}{L - F} = V_0 \left(\frac{L}{L - F}\right)^2, \quad \text{(Gleichung 10)}$$

und bei der Abfahrt vom m-ten Bahnhof entsprechend

$$V_m = V_0 \left(\frac{L}{L - F}\right)^m. \quad \text{(Gleichung 11)}$$

Die Gesamtverspätung steigt also mit jedem weiteren Bahnhof exponentiell an, so dass aus einer kleinen Anfangsverspätung  $V_0$  bei entsprechend konstantem Fahrgastzufluss zu den Bahnhöfen bald große Verspätungen resultieren können, ohne dass eine weitere Störung vorliegen muss.

Wir betrachten nun den Folgezug. Dazu wird folgende Indizierung benutzt: Der erste Index bezeichnet den Bahnhof, der zweite den Zug.  $V_{12}$  bezeichnet beispielsweise die Verspätung des Zuges 2 bei Abfahrt aus Bahnhof 1.

Als Zugfolgezeit für den Folgezug ergibt sich

$$Z = Z_{\text{plan}} + V_{02} - V_{11} + (T - T_{\text{plan}}) \quad \text{mit} \quad \text{(Gleichung 12)}$$

$V_{02}$  = Verspätung (s) des Folgezuges (Zug 2) bei Ankunft im Bahnhof 1,

$V_{11}$  = Verspätung (s) des Zuges 1 bei Abfahrt aus Bahnhof 1.

Die zusätzliche Verspätung des Folgezuges bei der Abfahrt aus Bahnhof 1, die er durch eine verlängerte Türöffnungszeit erhält, ist folglich analog zu den Gleichungen 8 und 9

$$\Delta T = T - T_{\text{plan}} = (V_{02} - V_{11}) \frac{F}{L-F} = (V_{02} - V_{01} \frac{L}{L-F}) \frac{F}{L-F}. \quad \text{(Gleichung 13)}$$

Hieraus wird deutlich, dass sich im Spezialfall  $V_{02} = V_{11}$  keine Zusatzverspätung für den Folgezug ergibt. Selbst wenn dieser bei der Ankunft im Bahnhof 1 sogar mehr Verspätung hatte als sein Vorgängerzug ( $V_{02} > V_{01}$ ), kann er bis zu einer Verspätung von  $V_{02} = V_{01} L / (L-F)$  seine Verspätung reduzieren. Es kann dabei von der realistischen Annahme  $L > F$  ausgegangen werden. Ansonsten würden pro Zeiteinheit mehr Fahrgäste auf dem Bahnhof eintreffen als durch die Fahrgasttüren eines Zuges einsteigen können, so dass mit keiner betrieblichen Strategie eine Überlastung verhindert werden könnte.

Die Gesamtverspätung des Folgezuges bei der Abfahrt aus Bahnhof 1 beträgt

$$V_{12} = V_{02} + (V_{02} - V_{01} \frac{L}{L-F}) \frac{F}{L-F} = V_{02} \frac{L}{L-F} - V_{01} \frac{L \cdot F}{(L-F)^2}. \quad \text{(Gleichung 14)}$$

Wir betrachten nun den Spezialfall, dass die Anfangsverspätung bei Ankunft am Bahnhof 1 für beide Züge gleich ist ( $V_{01} = V_{02} = V_0$ ). In diesem Fall ergibt sich die Gesamtverspätung wie folgt

$$V_{12} = V_0 \frac{L \cdot (L-F) - L \cdot F}{(L-F)^2} = V_0 \cdot (1 - \frac{F}{L-F}) = V_0 \cdot x. \quad \text{(Gleichung 15)}$$

Da  $L > F$  ist  $x < 1$ .

Hieraus wird deutlich, dass sich die Verspätung des Folgezuges bereits bei der Abfahrt von Bahnhof 1 reduziert, auch wenn sein Vorgängerzug die gleiche Anfangsverspätung bei Ankunft am Bahnhof 1 hatte. Dies rührt aus der verspäteten Abfahrt des Vorgängerzuges her, da seit dieser Abfahrt weniger Fahrgäste auf dem Bahnhof eingetroffen sind, als nach dem Fahrplan berücksichtigt wurde.

Die Zusatzverspätung des dritten Zuges ist am ersten Bahnhof

$$\Delta T = (V_{03} - V_{12}) \frac{F}{L-F}. \quad \text{(Gleichung 16)}$$

Damit wird die Gesamtverspätung des dritten Zuges durch Einsetzen von Gleichung 14



$$V_{13} = V_{03} + (V_{03} - V_{02} \frac{L}{L-F} + V_{01} \frac{L \cdot F}{(L-F)^2}) \frac{F}{L-F} =$$

$$V_{03} \frac{L}{L-F} - V_{02} \frac{L \cdot F}{(L-F)^2} + V_{01} \frac{L \cdot F^2}{(L-F)^3}$$

(Gleichung 17)

bzw. die Gesamtverspätung des n-ten Zuges am Bahnhof 1

$$V_{1n} = \sum_{i=1}^n (-1)^{n-i} \frac{L \cdot F^{n-i}}{(L-F)^{1+n-i}} V_{0i}.$$

(Gleichung 18)

Wir betrachten nun allgemein die Verspätung eines Zuges n bei der Abfahrt vom Bahnhof m. Es wird deutlich, dass es sich hier um einen rekursiven Zusammenhang handelt, da der Wert einerseits von der Verspätung des Zuges bei Ankunft am betrachteten Bahnhof ( $V_{(m-1)n}$ ) und andererseits von der Verspätung des Vorgängerzuges bei Abfahrt vom betrachteten Bahnhof ( $V_{m(n-1)}$ ) abhängt:

$$V_{mn} = \frac{L}{L-F} V_{(m-1)n} - \frac{F}{L-F} V_{m(n-1)}.$$

(Gleichung 19)

Um eine allgemeine analytische Gleichung für  $V_{mn}$  mit  $m, n \in \mathbb{IN}$  zu entwickeln, benötigen wir eine Verankerung. Diese ergibt sich aus der Randbedingung, dass vor dem ersten betrachteten Zug der Betrieb pünktlich gemäß Fahrplan abläuft, also keine Verspätungen vorliegen:

$$V_{m0} = 0 \text{ für alle } m \in \mathbb{IN}.$$

Ferner werden die Anfangsverspätungen eines jeden Zuges als konstante Werte betrachtet:

$$V_{0n} = \text{konst. für alle } n \in \mathbb{IN}.$$

Mit Hilfe dieser Randbedingungen und der rekursiven Gleichung 19 lässt sich eine allgemeine analytische Gleichung für die Verspätung eines beliebigen Zuges n bei der Abfahrt von einem beliebigen Bahnhof m herleiten:

$$V_{mn} = \sum_{i=1}^n (-1)^{n-i} \binom{m+n-i-1}{m-1} \frac{L^m \cdot F^{n-i}}{(L-F)^{m+n-i}} V_{0i}.$$

(Gleichung 20)

$L$  = Leistungsfähigkeit der Fahrgasttüren eines Zuges (Personen/s),

$F$  = Fahrgastzufluss zum Bahnhof (Personen/s),

$V_{0i}$  = Verspätung des Zuges i bei Ankunft im ersten Bahnhof (s).

Anstatt der Parameter  $F$  und  $L$  können auch die planmäßige Türöffnungszeit und die planmäßige Zugfolgezeit benutzt werden. Hierzu wird Gleichung 7 nach  $F$  und  $L$  umgeformt:

$$F = \frac{T_{\text{plan}} \cdot L}{Z_{\text{plan}}} \quad \text{und} \quad L = \frac{Z_{\text{plan}} \cdot F}{T_{\text{plan}}}.$$

Durch Einsetzen in die rekursive Gleichung 19 ergibt sich:

$$V_{mn} = \frac{Z_{\text{plan}}}{Z_{\text{plan}} - T_{\text{plan}}} V_{(m-1)n} - \frac{T_{\text{plan}}}{Z_{\text{plan}} - T_{\text{plan}}} V_{m(n-1)}. \quad (\text{Gleichung 21})$$

Die entsprechende analytische Gleichung lautet:

$$V_{mn} = \sum_{i=1}^n (-1)^{n-i} \binom{m+n-i-1}{m-1} \frac{Z_{\text{plan}}^m \cdot T_{\text{plan}}^{n-i}}{(Z_{\text{plan}} - T_{\text{plan}})^{m+n-i}} V_{0i}. \quad (\text{Gleichung 22})$$

$Z_{\text{plan}}$  = planmäßige Zugfolgezeit (s) (jeweils bei Abfahrt des Zuges),

$T_{\text{plan}}$  = planmäßige Türöffnungszeit (s),

$V_{0i}$  = Verspätung des Zuges  $i$  bei Ankunft im ersten Bahnhof (s).

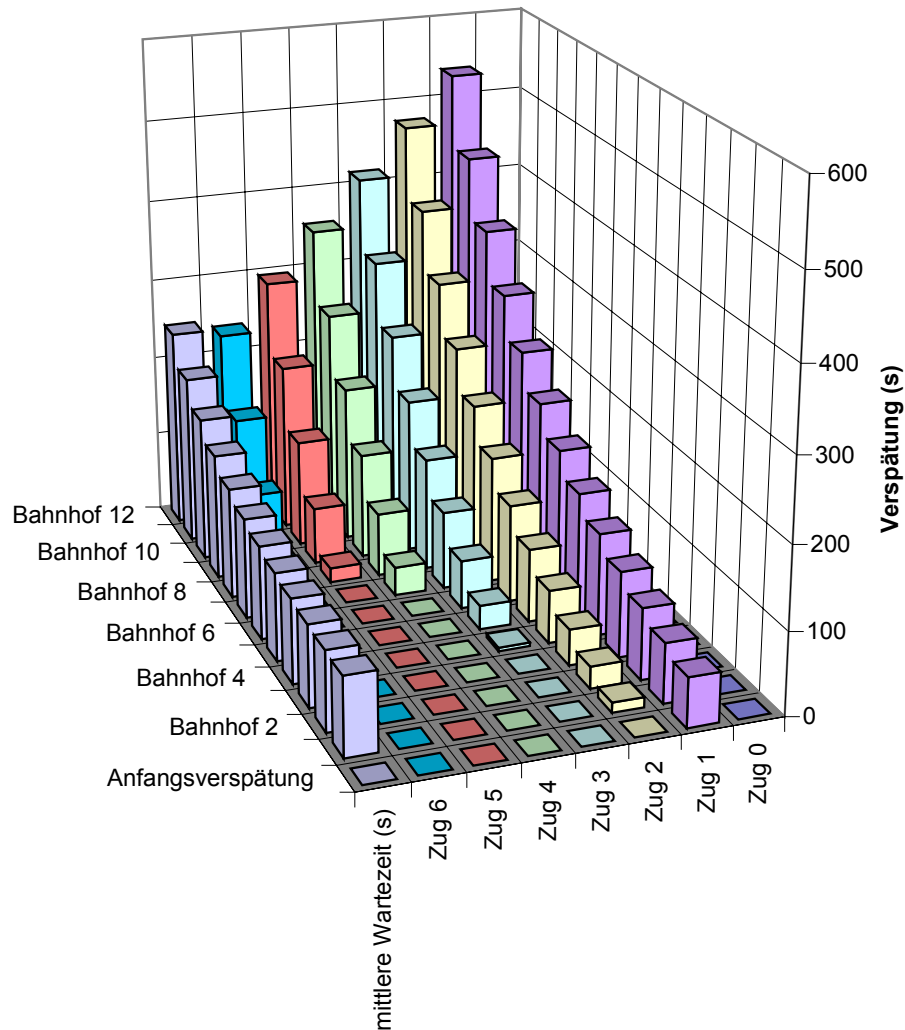
Seit den 70er-Jahren des 20. Jahrhunderts gibt es Versuche, das Phänomen der Aufschaukelung von Verspätungen zu beschreiben. So wird beispielsweise in [OSU 72] versucht, Konsequenzen für die Disposition von Buslinien abzuleiten. Allerdings wird stets davon ausgegangen, dass das Fahrverhalten der Busse nach der Abfahrt vom Linienbeginn nicht mehr beeinflusst werden kann, da beispielsweise kein Betriebsfunk vorhanden ist. In den 80er-Jahren wird dieses Phänomen in [BER 82] am Beispiel von Straßenbahnlinien untersucht. Die mathematische Betrachtung beschränkt sich hier auf die einmalige Störung eines Zuges und deren Auswirkung auf die Linie.

Nicht nur bei Nahverkehrssystemen tritt dieses Phänomen auf, sondern beispielsweise auch in Gebäuden mit mehreren Fahrstühlen. Auch hier werden Fahrgäste den zuerst ankommenden Fahrstuhl benutzen und somit seine Weiterfahrt verzögern. Allerdings kann das Aufholen eines nachfolgenden Fahrstuhls auch dazu führen, dass ein stark besetzter Fahrstuhl überholt wird, wie dies auch bei Bussen der Fall ist. Dadurch entschärft sich das Problem für die Fahrgäste. Im U-Bahnbetrieb gibt es jedoch in der Regel nicht die Möglichkeit, Züge im Verspätungsfall zu überholen.

## 6.2.2 Anwendung des Modells der Aufschaukelung

Im Folgenden sind zur besseren Veranschaulichung des mathematischen Modells der Aufschaukelung Beispiele für Betriebsszenarien dargestellt, die auf Basis der oben hergeleiteten Gleichungen berechnet sind. Zusätzlich zu berücksichtigen ist bei der Anwendung des Modells, dass Züge in einem Mindestabstand hintereinander fahren müssen. Als weiterer Parameter wird daher die technisch mögliche minimale Zugfolgezeit eingeführt, die sich aus dem Zugsicherungssystem ableitet. Für alle Parameter werden für einen U-Bahnbetrieb typische Werte herangezogen.

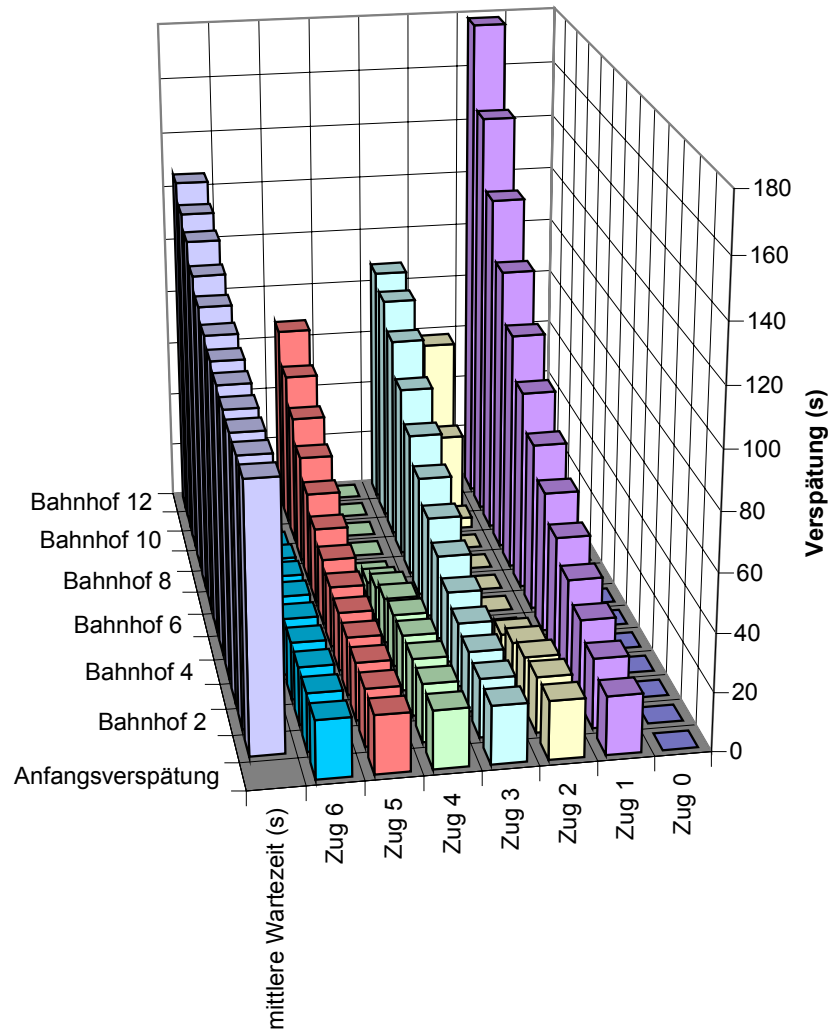
Das in Abbildung 24 dargestellte Betriebsszenario zeigt die Auswirkungen einer einfachen Verspätung von 60 Sekunden, die beispielsweise aus einem einmalig erhöhten Fahrgastaufkommen (z. B. Ende einer Veranstaltung) resultieren kann. Die planmäßige Zugfolgezeit  $Z_{\text{plan}}$  beträgt 180 Sekunden, die planmäßige Türöffnungszeit  $T_{\text{plan}}$  30 Sekunden und die technisch mögliche Zugfolgezeit 120 Sekunden. Zur Verbesserung der Lesbarkeit der Abbildung sind die aufeinander folgenden Züge von rechts nach links dargestellt.



**Abbildung 24: Betriebsszenario mit einer Primärverspätung von einer Minute**

Deutlich ist zu erkennen, wie sich die Verspätung an jedem Bahnhof erhöht und auch die nachfolgenden Züge nach wenigen Bahnhöfen betroffen sind. Um die Auswirkungen für auf den Bahnhöfen wartende Fahrgäste zu demonstrieren, ist links die mittlere Wartezeit für einen zufällig auf dem Bahnhof eintreffenden Fahrgast dargestellt. Auf diese Problematik wird ausführlich in 6.4 eingegangen.

Das Betriebsszenario in Abbildung 25 zeigt die Auswirkungen, wenn alle Züge um 20 Sekunden primärverspätet sind. Dies kann beispielsweise aus dem Einrichten einer temporären Langsamfahrstelle resultieren. Die planmäßige Zugfolgezeit  $Z_{\text{plan}}$  beträgt wieder 180 Sekunden und die planmäßige Türöffnungszeit  $T_{\text{plan}}$  30 Sekunden. Um das Aufholverhalten der Züge besser darstellen zu können, liegt die technisch mögliche Zugfolgezeit diesmal bei 60 Sekunden.



**Abbildung 25: Betriebsszenario mit Primärverspätungen von zwanzig Sekunden**

Ähnlich dem vorhergehenden Betriebsszenario steigt die Verspätung des ersten Zuges kontinuierlich an. Dem zweiten und später auch dem vierten Zug gelingt es vorübergehend, ihre Verspätung gänzlich abzubauen, während die Verspätung des dritten und des fünften Zuges wie beim ersten Zug kontinuierlich ansteigt. Das Ergebnis ist eine für den U-Bahnbetrieb typische Paarbildung von Zügen, die sich bei einer generellen Primärverspätung aller Züge einstellt.

Interessant ist die Tatsache, dass die mittlere Wartezeit vom ersten Bahnhof an kontinuierlich ansteigt, obwohl die Anzahl der pünktlichen Züge für einige Bahnhöfe sogar zunimmt. Offenbar ist die auf Seite 29 in Gleichung 3 definierte Kenngröße

$$\frac{\text{Anzahl der pünktlichen Zugfahrten}}{\text{Gesamtzahl der Zugfahrten}}$$

kein hinreichendes Kriterium für die die Fahrgäste interessierende Kenngröße mittlere Wartezeit auf dem Bahnhof. Daher wird die Sicht der Fahrgäste in 6.4 gesondert untersucht.

Inwieweit sich die anhand des mathematischen Modells berechneten Szenarien auf den realen Betrieb übertragen lassen, wird im Folgenden betrachtet.

### 6.2.3 Übertragbarkeit des Modells der Aufschaukelung auf den realen Betrieb

Das in 6.2.1 entwickelte Modell der Aufschaukelung setzt einen konstanten Fahrgastzufluss  $F$  zum Bahnhof voraus, wie er bei fahrplanmäßigen Zugfolgen von unter zehn Minuten angenommen werden kann [NEW 74]; das heißt, die Fahrgäste richten ihre Ankunftszeit nicht nach dem Fahrplan. Bei welcher Zugfolge ein solches Verhalten noch vorausgesetzt werden kann, hängt von der Kenntnis der Fahrgäste über den Fahrplan ab. Außerdem sind auch bei kurzer Zugfolge Schwankungen des Fahrgastzuflusses möglich. Beispielsweise bei Großveranstaltungen (wie z. B. Fußballspielen) ist es denkbar, dass der Fahrgastzufluss  $F$  zeitweise die Leistungsfähigkeit der Türen  $L$  erreicht.

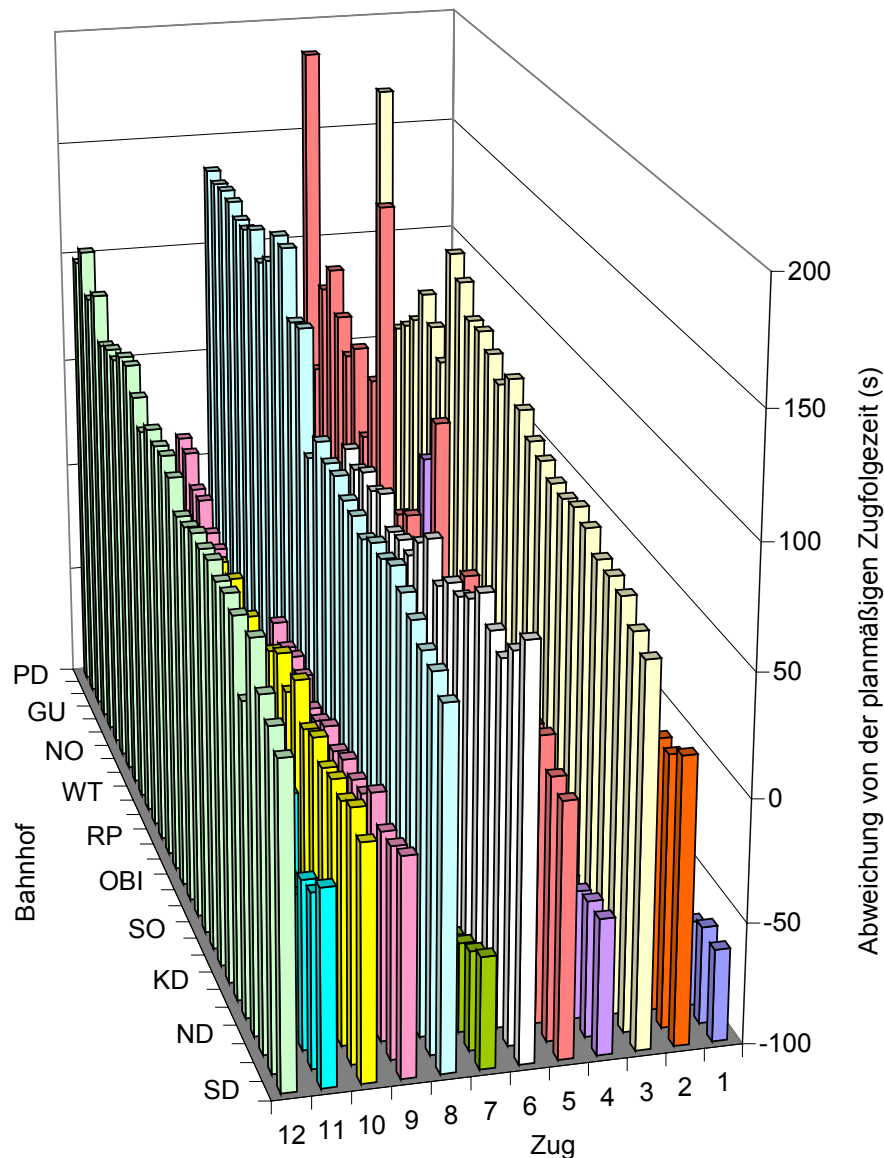
Die Leistungsfähigkeit der Türen  $L$  ist in der Realität ebenfalls nicht konstant. Sie hängt vom Besetzungsgrad des Zuges ab. So kann beispielsweise bei stark besetzten Zügen trotz langer Türöffnungszeiten  $T$  ein nur langsamer Fahrgastwechsel erfolgen.

Im Modell werden zunächst nur die Einsteiger betrachtet, da diese durch eine Verspätung des Zuges ansteigen. Der Einfluss der Aussteiger wird erst später deutlich, wenn die zusätzlich eingestiegenen Fahrgäste den Zug verlassen und damit nach der mittleren Fahrgastfahrlänge den Zug nochmals verzögern.

Zur Verifizierung der mit Hilfe des mathematischen Modells abgeleiteten Aussagen werden nun reale Betriebsszenarien herangezogen.

Bei den vorliegenden Messdaten [BVG] ist die Darstellung der Verspätung eines Zuges im Vergleich zur planmäßigen Abfahrtszeit nicht hinreichend aussagekräftig, da insbesondere zwischen den Unterwegsbahnhöfen die Differenz zwischen planmäßiger und realer Fahrzeit stark schwankt. Daher wird als geeignete Messgröße die Abweichung des Zeitpunkts der Zugabfahrt von der planmäßigen Zugfolgezeit herangezogen.

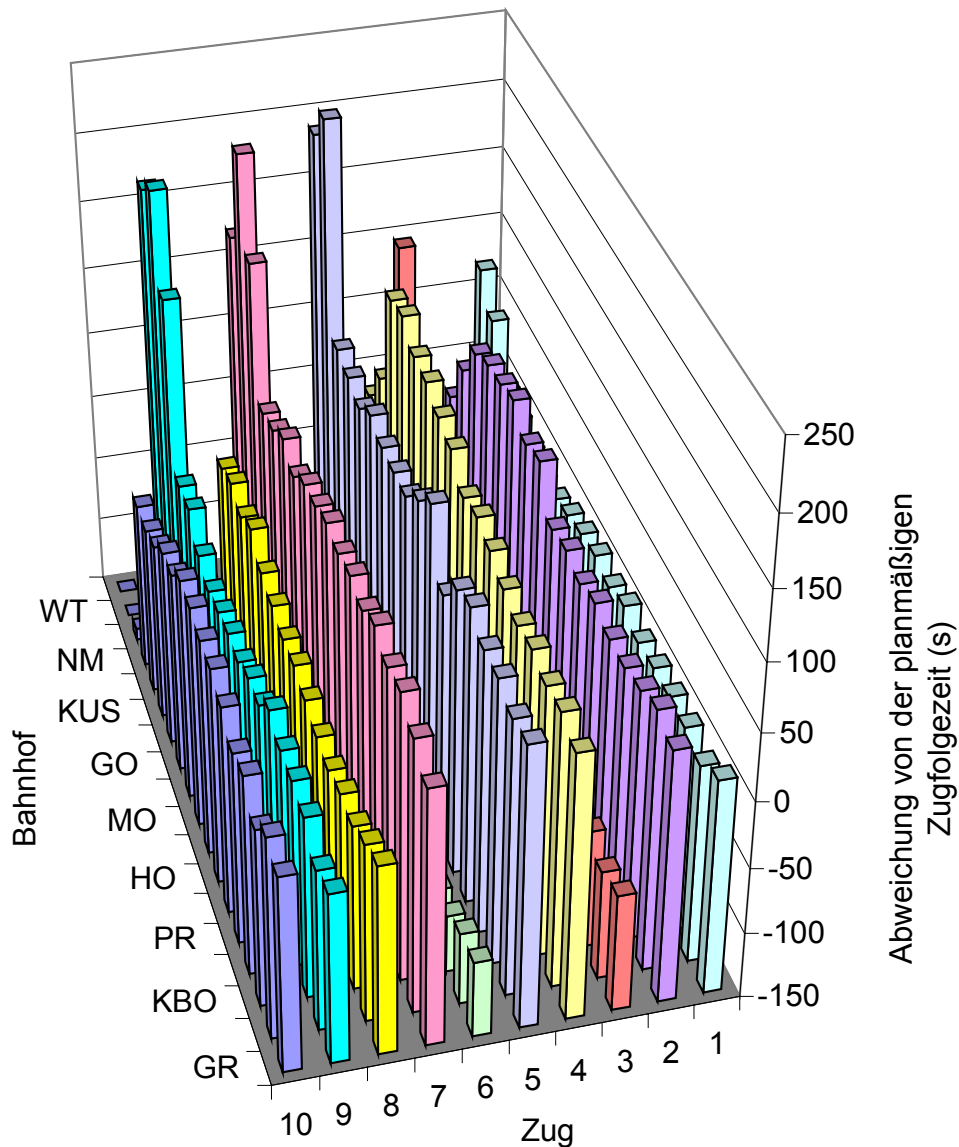
In Abbildung 26 ist diese für die Berliner Linie U2 am Nachmittag eines Werktags dargestellt. Die planmäßige Zugfolgezeit  $Z_{\text{plan}}$  beträgt 200 Sekunden.



**Abbildung 26: Realer Verlauf der Abweichung von der planmäßigen Zugfolgezeit**

Zunächst sind im Vergleich zu den mit mathematischen Modellen berechneten Betriebsszenarien (Abbildung 24 und Abbildung 25) starke Streuungen erkennbar, die auf die variierenden Fahrgastzuflüsse  $F$  zu den einzelnen Bahnhöfen zurückgeführt werden können. Als Tendenz ist jedoch zu erkennen, dass die Züge, die mit einer vergrößerten Zugfolgezeit fahren, ihre Verspätung vergrößern (Züge 3, 5, 8 und 12). Umgekehrt verringern sich die Verspätungen der Züge, die mit einer verringerten Zugfolgezeit fahren (Züge 1, 4, 7 und 11). Genau dieses Phänomen wurde durch das mathematische Modell vorhergesagt und in Abbildung 25 dargestellt.

In Abbildung 27 ist der Betrieb auf der Berliner Linie U1 am frühen Abend eines Werktags dargestellt. Die planmäßige Zugfolgezeit  $Z_{\text{plan}}$  beträgt 300 Sekunden.



**Abbildung 27: Entstehung von Zugpaaren im realen Betrieb**

Das bereits durch das mathematische Modell vorhergesagte Phänomen der Bildung von Zugpaaren ist in Abfolge der Bahnhöfe deutlich zu erkennen. So steigt die Zugfolgezeit bei den in der Abbildung hinten dargestellten Bahnhöfen für die Züge 1, 3, 5, 7 und 9 erheblich an. Dagegen nimmt die Zugfolgezeit bei den übrigen Zügen für dieselben Bahnhöfe ab. Auf Grund der sich gegen Ende aufbauenden Verspätungen der Züge 1 und 3 gelingt es den Zügen 2 und 4, ihre bis dorthin kontinuierlich steigende Verspätung wieder abzubauen.

Zusammenfassend ist aus dem Vergleich des mathematischen Modells der Aufschaukelung mit realen Betriebsdaten zu folgern, dass das Modell zwar nicht für die vollständige Simulation des realen U-Bahnbetriebs einer Linie ausreicht, dass es sich jedoch gut dazu eignet, real auftretende Charakteristika des U-Bahnbetriebs darzustellen.

### 6.3 Verteilung von Verspätungen

Das reale Auftreten von Verspätungen soll nun quantitativ betrachtet werden. Dazu werden Messdaten der Ankunfts- und Abfahrtsverspätungen an allen Bahnhöfen realer Linien ausgewertet.

In den folgenden Abbildungen sind typische Verteilungen der Ankunfts- und Abfahrtsverspätungen für zwei konventionell betriebene Berliner U-Bahnlinien und die automatisch betriebene Linie 14 (Météor) der Pariser Metro dargestellt.

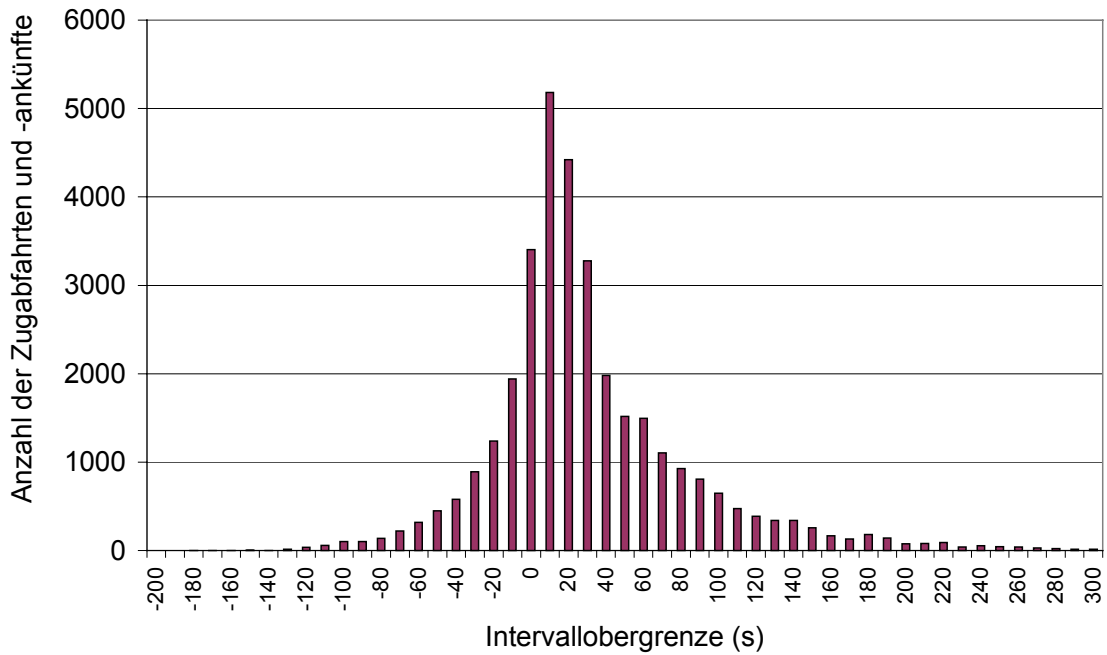
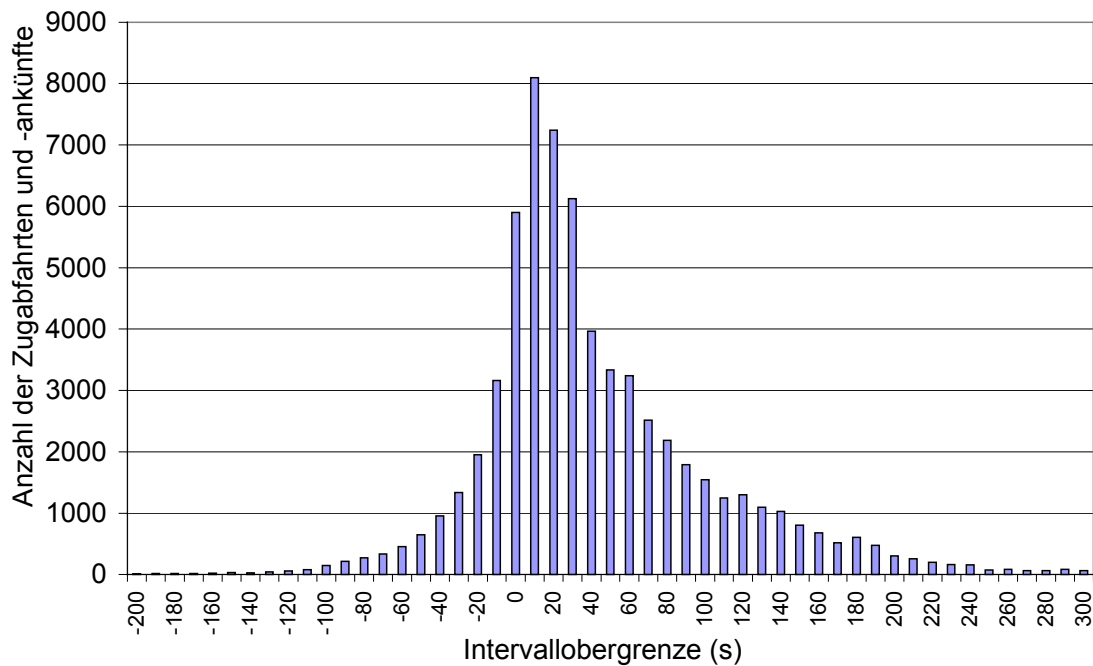
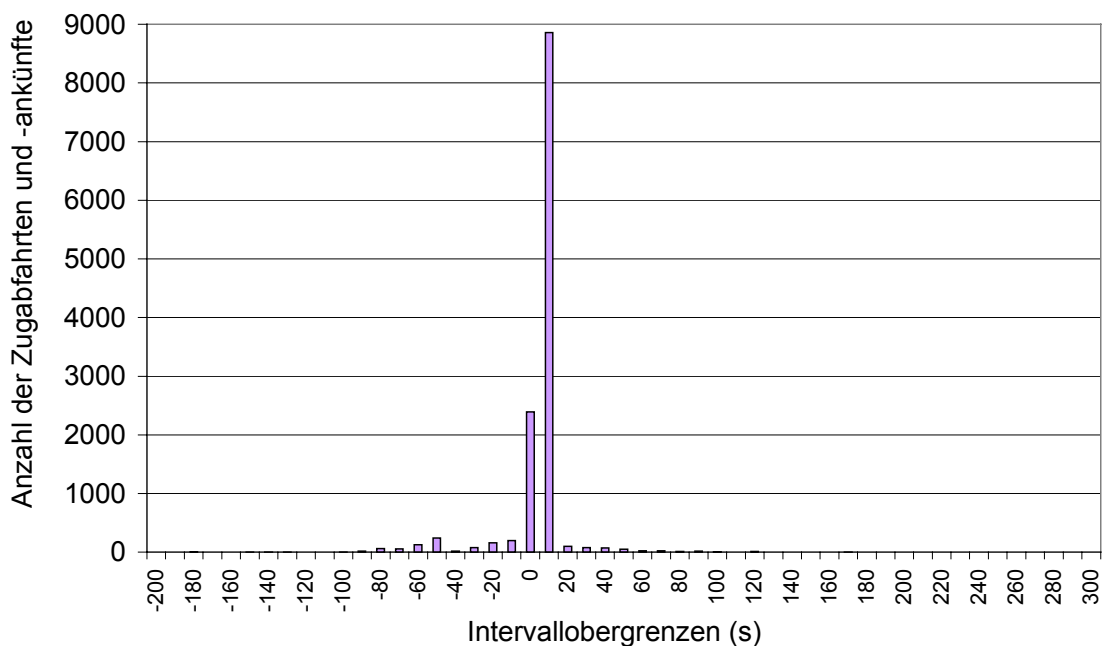


Abbildung 28: Typische Verspätungsverteilung auf der Berliner Linie U2





**Abbildung 29: Typische Verspätungsverteilung auf der Berliner Linie U7**



**Abbildung 30: Typische Verspätungsverteilung auf der Pariser Linie 14 (Météor)**

Im Gegensatz zum Fernverkehr treten auch Abfahrtsverfrühungen auf. Das rührt daher, dass im Fernverkehr sehr viel größere Abstände zwischen den Bahnhöfen liegen als im Nahverkehr und bei jedem Bahnhof exakt die Abfahrtszeit mit der aktuellen Uhrzeit verglichen wird. Deshalb tritt ein zu frühes Abfahren im Fernverkehr fast niemals auf.

Sowohl beim konventionellen als auch beim automatischen Betrieb liegt das Maximum der Verspätungen im Bereich von wenigen Sekunden. Es fällt jedoch auf den ersten

Blick auf, dass das Maximum im automatischen Betrieb sehr viel schmaler ist als im konventionellen; das heißt, der Betrag der Verspätung ist hier im Durchschnitt deutlich geringer. Außerdem ist die Verspätungsverteilung im automatischen Betrieb symmetrischer als im konventionellen.

Bei der Berliner U-Bahn beträgt der Anteil der Verspätungen im Bereich von –3 bis +3 Minuten 97 %. Bei der Pariser Linie 14 (Météor) beträgt der Anteil der Verspätungen im gleichen Bereich 99 %; im Bereich von –5 bis +5 Sekunden liegen 81 % der Verspätungen. Es wird deutlich, dass eine solche Verspätungsverteilung nur im automatischen Betrieb erreicht werden kann, bei dem das Abfertigen und das Fahren der Züge nicht durch Fahrer sondern durch Computer erfolgt.

Vereinfachend lässt sich die Regel ableiten: Je kleiner der Betrag der Verspätung, desto häufiger tritt die Verspätung auf.

## 6.4 Sicht der Fahrgäste

Bisher wurden schwerpunktmäßig technisch-betriebliche Gesichtspunkte des U-Bahnbetriebs betrachtet. Aus Sicht der Fahrgäste gibt es jedoch weitere Anforderungen, wie die folgenden Beispiele zeigen:

- Der Ausfall einer Zugfahrt bei einem 20-Minutentakt wirkt sich für den Fahrgast sehr viel schwerwiegender aus als beispielsweise bei einem Drei-Minutentakt. Betrieblich gesehen handelt es sich jedoch um das gleiche Ereignis.
- Findet bei einem fahrplanmäßigen Fünf-Minutentakt jede Zugfahrt mit exakt 20 Minuten Verspätung statt, ergibt sich nach dem ersten verspäteten Zug für den Fahrgast keine Beeinträchtigung mehr, auch wenn die Züge nicht nach dem Fahrplan fahren und damit eine betriebliche Störung vorliegt.

Diese Beispiele zeigen, dass es einerseits für den Fahrgast wichtige Qualitätskriterien gibt, deren Einhaltung durch den Betrieb nicht a priori optimiert wird [MNI 99], und andererseits, dass betriebliche Abläufe möglicherweise auch dann optimiert werden, wenn sie keine Wirkung auf den Fahrgast haben.

Um dies zu berücksichtigen, werden zwei aus Sicht der Fahrgäste wesentliche Qualitätskenngrößen bezüglich des U-Bahnbetriebs eingeführt<sup>3</sup>:

- die mittlere Fahrgastverspätung während der Fahrt

$$E(\text{Fahrgastverspätung}) = \frac{\sum_{\text{alle Fahrgäste}} (\text{Istfahrzeit} - \text{Planfahrzeit})}{\text{Anzahl der Fahrgäste}}, \quad (\text{Gleichung 23})$$

---

<sup>3</sup> Gemäß repräsentativer Umfragen in Deutschland [SPP 99] sind diese beiden Kenngrößen aus Sicht der Fahrgäste die wichtigsten. Selbstverständlich gibt es noch weitere für den Fahrgast wichtige Qualitätskenngrößen wie Höhe der Fahrpreise, Sicherheit, Sauberkeit, Freundlichkeit des Personals etc. Die Optimierung dieser Kenngrößen ist jedoch nicht Gegenstand dieser Ausarbeitung.

- die mittlere Fahrgastwartezeit auf dem Bahnsteig

$$E(\text{Fahrgastwartezeit}) = \frac{\sum \text{Wartezeit}}{\text{Anzahl der Fahrgäste}} \cdot \text{alle Fahrgäste} \quad (\text{Gleichung 24})$$

Die erste Kenngröße kann dadurch optimiert werden, dass der Fahrplan die realen Fahrzeiten zwischen den Bahnhöfen widerspiegelt. Wie dies erreicht werden kann, wird in den Kapiteln 7 und 8 erörtert.

Die mittlere Fahrgastwartezeit auf dem Bahnsteig hängt von der Zugfolgezeit und der Ankunftszeit des Fahrgastes ab. Wir gehen im folgenden von einer zufälligen Ankunftszeit des Fahrgastes auf dem Bahnsteig aus, die für dichte Zugfolgen vorausgesetzt werden kann [NEW 74].

Im Betrachtungszeitraum werden die Zugfolgezeiten durchnummeriert von  $Z_1$  bis  $Z_n$ . Die mittlere Wartezeit für einen Fahrgast, der innerhalb der Zugfolgezeit  $Z_k$  auf dem Bahnsteig eintrifft, ist der Erwartungswert von  $W_k$ :

$$E(W_k) = \frac{Z_k}{2} \quad (\text{Gleichung 25})$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrgast innerhalb der Zugfolgezeit  $Z_k$  auf dem Bahnsteig eintrifft, entspricht der Zugfolgezeit  $Z_k$  bezogen auf die Gesamtzeit:

$$P_k = \frac{Z_k}{\sum_{i=1}^n Z_i} \quad (\text{Gleichung 26})$$

Der Erwartungswert der Wartezeit  $W$  über die Gesamtzeit betrachtet beträgt:

$$E(W) = \sum_{k=1}^n P_k \cdot E(W_k) \quad (\text{Gleichung 27})$$

Durch Einsetzen von Gleichung 25 und 26 ergibt sich:

$$E(W) = \frac{\sum_{k=1}^n Z_k^2}{2 \sum_{i=1}^n Z_i} = \frac{E(Z^2)}{2 \cdot E(Z)} \quad (\text{Gleichung 28})$$

$$\text{mit } E(Z^2) = \frac{\sum_{k=1}^n Z_k^2}{n} \text{ und } E(Z) = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n}.$$

Durch Einsetzen der Varianz  $\text{VAR}(Z) = \sigma^2 = E(Z^2) - (E(Z))^2$  ergibt sich gemäß [NEW 74]

$$E(W) = \frac{1}{2} \left( E(Z) + \frac{\text{VAR}(Z)}{E(Z)} \right). \quad (\text{Gleichung 29})$$

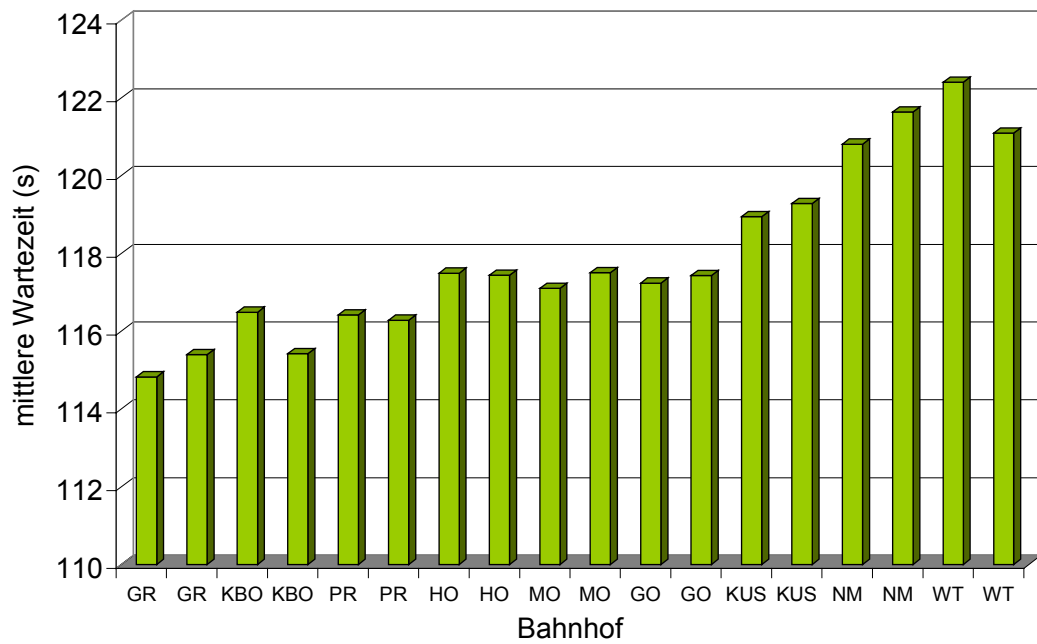
Der erste Summand  $E(Z)/2$  entspricht der mittleren Wartezeit, wenn es keine Abweichung von der mittleren Zugfolgezeit gibt, das heißt ein einheitlicher Takt ohne Verspätungen oder Verfrühungen gefahren wird. Der zweite Summand wird umso größer, je mehr die einzelnen Züge von der mittleren Zugfolgezeit abweichen. Außerdem wird er größer, je kürzer die Zugfolge bei gleichbleibender Varianz ist; das heißt, bei großen Zugfolgen bezogen auf die Varianz bleibt dieser Einfluss gering.

Die Bedeutung der Gleichung 29 sei anhand eines Beispiels erläutert. Auf einer Linie wird planmäßig eine Zugfolge von exakt fünf Minuten gefahren. Die mittlere Wartezeit für einen Fahrgast mit zufälliger Ankunftszeit beträgt folglich zwei Minuten und 30 Sekunden. Durch eine Betriebsstörung kommt es zu einer Aufschaukelung der Zugfolgen dieser Linie, so dass sich nun Zugfolgen von drei und sieben Minuten abwechseln. Obwohl die mittlere Zugfolge immer noch fünf Minuten beträgt, erhöht sich die mittlere Wartezeit eines Fahrgastes um 16 % auf zwei Minuten und 54 Sekunden.

Es muss daher ein betriebliches Ziel sein, die Streuung der Zugfolgezeit zu minimieren.

Nun soll betrachtet werden, wie sich die Streuung der Zugfolgezeit im Streckenverlauf bei einem realen nicht automatisch geregelten U-Bahnsystem verhält. Es werden dazu Messdaten der Berliner Linie U1 herangezogen, die am Nachmittag eines Werktags aufgenommen wurden. Die aus den Messdaten mit Gleichung 29 berechnete mittlere Wartezeit ist in Abbildung 31 dargestellt. Die planmäßige Zugfolgezeit  $Z_{\text{plan}}$  beträgt 180 Sekunden; das heißt, bei einer exakten Einhaltung der planmäßigen Zugfolgezeit würde die mittlere Wartezeit 90 Sekunden betragen.

Zunächst fällt auf, dass die mittlere Wartezeit bereits am ersten aufgeführten Bahnhof deutlich über dem Optimalwert von 90 Sekunden liegt. Außerdem ist ein Anstieg der mittleren Wartezeit im Streckenverlauf zu beobachten.



**Abbildung 31: Reale mittlere Wartezeit bei einem Drei-Minutentakt**

Die Ergebnisse zeigen, dass die Streuung der Zugfolgezeit im Streckenverlauf tendenziell zunimmt und damit die mittlere Wartezeit auf dem Bahnsteig ansteigt.

## 7 Entwicklung von Entstörungsstrategien

In diesem Kapitel werden Entstörungsstrategien für den automatisierten U-Bahnbetrieb hergeleitet. Aufgabe von Entstörungsstrategien ist es, Betriebsstörungen zu verhindern und zu begrenzen. In welcher Form Entstörungsstrategien umgesetzt werden können, hängt im Wesentlichen von der Art der Betriebsstörung (siehe Kapitel 4) und dem Automatisierungsgrad des U-Bahnsystems (siehe Kapitel 3) ab. Daher wird in 7.1 und 7.2 auf diese beiden Rahmenbedingungen eingegangen.

Da der Fahrgast als Kunde für jeden Verkehrsbetreiber im Mittelpunkt stehen soll, werden als zu optimierende Parameter die in Kapitel 6.4 definierten Qualitätskenngrößen aus Sicht der Fahrgäste herangezogen:

- die mittlere Fahrgastverspätung während der Fahrt und
- die mittlere Fahrgastwartezeit auf dem Bahnsteig.

Beide Qualitätskenngrößen sind dann für den Fahrgast optimal, wenn ihre Werte möglichst klein sind. Das Minimum beider Größen ist also zugleich das Optimum.

Die im Folgenden hergeleiteten Entstörungsstrategien dienen daher direkt oder indirekt zur Minimierung der mittleren Fahrgastverspätung und -wartezeit.

### 7.1 Art der Betriebsstörung

#### 7.1.1 Technische Ursachen

Durch Technik verursachte Betriebsstörungen können in der Phase des Systemdesigns durch Berücksichtigung einer hinreichenden Zuverlässigkeit und Instandhaltbarkeit der technischen Komponenten begrenzt werden. In der Betriebsphase ist es Aufgabe des Instandhaltungskonzepts, die Instandhaltung unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten zu optimieren.

Dazu werden u. a. benötigt

- ein Konzept zur Vorhaltung des Instandhaltungs-Personals,
- eine Instandhaltungs-Infrastruktur mit Werkstätten und Ersatzteillagern sowie in der Regel
- ein Ferndiagnosesystem.

Eine Priorisierung der Instandhaltungsmaßnahmen sollte anhand der in Kapitel 4 definierten Klassifizierung der Betriebsstörungen erfolgen. So muss bei einer Betriebsstörung der Klasse 3 schnellstmöglich die Instandsetzung eingeleitet werden. Bei einer Betriebsstörung der Klasse 2 sollte die Instandsetzung ebenfalls schnellstmöglich eingeleitet werden, im Fall einer Fahrzeugstörung jedoch erst nach dem Aussetzen des Zuges. Da bei Betriebsstörungen der Klasse 1 der Fahrbetrieb nicht beeinträchtigt ist, sollte auch die Instandsetzung den Betriebsablauf nicht behindern und ggf. erst nach Ende des Betriebstages erfolgen.

Eine Begrenzung technisch verursachter Betriebsstörungen kann außer durch eine Erhöhung der Zuverlässigkeit und Instandhaltbarkeit vor allem durch den Bereich Be-

triebsplanung und -durchführung erzielt werden. Hierzu ist eine Automatisierung von Funktionen des Bereichs Leiten (ATS) möglich, wie sie in 7.2.3 beschrieben wird.

### **7.1.2 Betriebliche Ursachen**

Das Verhindern und Begrenzen von betrieblich verursachten Betriebsstörungen ist eine der komplexesten Aufgaben von Entstörungsstrategien, da es schwierig ist, die konkreten Ursachen für Mängel in der Betriebs- und Instandhaltungsplanung zu identifizieren.

Neben lokalspezifisch-organisatorischen Maßnahmen, auf die nur im konkreten Einzelfall eingegangen werden könnte, existiert die Möglichkeit, betrieblich verursachte Betriebsstörungen durch eine Automatisierung von Funktionen des Bereichs Leiten (ATS) zu reduzieren (siehe 7.2.3).

### **7.1.3 Externe Ursachen**

Umweltbedingte Betriebsstörungen können in der Phase des Systemdesigns durch eine großzügige Auslegung gegenüber Umwelteinflüssen begrenzt werden. In der Betriebsphase sind im Rahmen der Betriebsplanung und -durchführung spezielle Maßnahmen festzulegen, z. B. bei Eisglätte verringerte Verzögerung der Züge sowie Anpassung des Fahrplans. Wenn es sich um Betriebsstörungen der Klasse 3 handelt, ist hier wie bei technischen Ursachen eine schnellstmögliche Räumung der Strecke und Instandsetzung notwendig.

Durch Vandalismus bedingte Betriebsstörungen verhalten sich von der Entstehung her genau wie technisch bedingte (siehe 7.1.1). Außer durch eine vandalismusresistente Auslegung des Systems ist eine Begrenzung zeitlich durch eine geeignete Instandhaltung möglich.

Gegen durch Fahrgäste verursachte Betriebsstörungen können ebenfalls in der Phase des Systemdesigns Vorbeugungen getroffen werden. So sollten alle Betriebsmittel, mit denen der Fahrgast in Kontakt kommt, so ausgeführt sein, dass ihr Missbrauch nur erschwert möglich ist. Beispielsweise kann eine Vielzahl von Betriebsstörungen, wie das Eindringen der Fahrgäste in das Lichtraumprofil des Zuges, durch den Einbau von Bahnsteigtüren grundsätzlich verhindert werden. Bei Betriebsstörungen der Klasse 3 ist ebenso wie bei technischen Ursachen eine schnellstmögliche Räumung der Strecke und Instandsetzung notwendig.

Durch das Fahrgastaufkommen bedingte Betriebsstörungen lassen sich durch eine Automatisierung von Funktionen des Bereichs Leiten (ATS) reduzieren (siehe 7.2.3).

## **7.2 Automatisierungsgrad des U-Bahnsystems**

### **7.2.1 Automatisches Fahren (ATO)**

Durch eine Automatisierung der Funktionen des Bereichs Fahren wird eine Vielzahl möglicher Betriebsstörungen reduziert.

Der wichtigste Aspekt ist dabei, dass die Anwesenheit von Personal im Zug nicht mehr erforderlich ist. Das heißt, im konventionellen Betrieb auftretende Betriebsstörungen auf Grund von Personalmangel entfallen (gemäß 5.7.1 entstehen 21 % der ausgefallenen Fahrplankilometer bei der Berliner U-Bahn durch Personalmangel). Hinzu kommt

die im konventionellen Betrieb nicht vorhandene Möglichkeit, spontan Reservezüge von auf der Strecke befindlichen Aufstellgleisen in den Betrieb einzufädeln. Diese Möglichkeit eröffnet dem Betrieb neue effektive Entstörungsstrategien, insbesondere in den Nebenverkehrszeiten, in denen stets Reservezüge zur Verfügung stehen.

Ein fast ebenso wichtiger Aspekt ist, dass die Züge den durch das ATS-System vorgegebenen Fahrplan exakt umsetzen. Im Gegensatz zu einem Fahrer, der seinen persönlichen Fahr- und Abfertigungsstil besitzt, fahren die Züge automatisch nach dem für die Strecke optimalen Fahrprofil. Dadurch wird die Pünktlichkeit erhöht. Besonders dramatisch zeigt sich dies an der Verspätungsverteilung der automatisch betriebenen Pariser Linie 14 (Météor) in Kapitel 6.3. Nur bei einer automatischen Abfertigung und einem automatischen Fahren des Zuges sind solche überwiegend im Sekundenbereich liegenden Verspätungen erzielbar.

### **7.2.2 Automatisches Sichern (ATP)**

Eine Automatisierung der Funktionen des Bereichs Sichern erhöht die Betriebssicherheit, wodurch insbesondere schwere Betriebsstörungen wie Auffahrten oder Zugentgleisungen verhindert werden.

Die Funktionen automatische Fahrwegsicherung und Zugvollständigkeitsüberwachung sind notwendig, um ein akzeptables Sicherheitsniveau zu gewährleisten und sind daher heute in allen U-Bahnsystemen realisiert.

In welchem Maße die Funktion der automatischen Abstandshaltung Betriebsstörungen verhindern kann, hängt von ihrem Automatisierungsgrad ab. In der ersten Automatisierungsstufe handelt es sich um Streckenblöcke, deren Besetzung dem Zugfahrer über Lichtsignale angezeigt wird; dieses Sicherheitsniveau liegt unter dem der existierenden U-Bahnsysteme, ist jedoch auf vielen Nahverkehrsstrecken anzutreffen. Eine wesentliche Erhöhung der Sicherheit und Reduktion von Betriebsstörungen erfolgt durch die Einführung einer Zugbeeinflussung, die einen Zug automatisch bremst, wenn er ein Halt zeigendes Signal überfährt; mindestens dieses Sicherheitsniveau besitzen alle heutigen U-Bahnsysteme. In einem weiteren Schritt kann die durch Sicherungsfunktionen eingeschränkte Streckenkapazität erhöht werden, indem die Länge der Streckenblöcke verkürzt oder die Fahrt auf elektrische Sicht (im Bremswegabstand) ermöglicht wird. Dies vermindert die Mindestzugfolgezeit (vergleiche Auswirkung auf das Phänomen der Aufschaukelung in 6.2.2) und schafft neue Freiheitsräume bei der Entstörung.

Die automatische Sicherung gegen Geschwindigkeitsüberschreitungen ist eine wichtige Funktion zur Verhinderung von Betriebsstörungen wie Entgleisungen oder Auffahrten auf Grund eines zu kurzen Bremsweges zum Gefahrenpunkt. In vielen U-Bahnsystemen wird heute nur die zulässige Streckenhöchstgeschwindigkeit überwacht. Als weitere Maßnahme wäre es sinnvoll, jede Geschwindigkeitseinschränkung zu überwachen, z. B. auch temporäre Langsamfahrstellen, wodurch weitere Betriebsstörungen verhindert werden könnten.

Die automatische Detektion von Entgleisungen kann das Ausmaß von Betriebsstörungen verringern. Mindestens im Zusammenhang mit der Funktion automatisches Fahren ist diese Funktion, die ansonsten vom Zugfahrer ausgeführt wird, unentbehrlich.

Das automatische Öffnen und Schließen der Fahrgasttüren richtet sich durch die Automatisierung exakt nach dem Fahrplan im Gegensatz zu einer manuellen Bedienung



durch den Zugfahrer. Dadurch werden insbesondere geringe Verspätungen verhindert, die den größten Anteil der Verspätungen bilden (siehe 6.3).

Der automatische Schutz der Fahrgäste auf den Bahnsteigen vor fahrenden Zügen kann schwere Betriebsstörungen durch unter den Zug gelangte Fahrgäste (gemäß 5.7.2 bei der Berliner U-Bahn ca. drei pro Monat) verhindern. Durch eine automatische Eindringüberwachung können mögliche spätere Betriebsstörungen durch Vandalismus oder unbefugt die Strecke betretende Personen begrenzt werden. Besonders effektiv zur Vermeidung von Betriebsstörungen ist der Einbau von Bahnsteigtüren. Dadurch werden Fahrgastunfälle gänzlich verhindert. Außerdem sammeln sich beim Einsatz von Bahnsteigtüren keine Abfälle der auf dem Bahnsteig befindlichen Fahrgäste im Gleis an, durch die im Zusammenhang mit Stromschienen leicht Brände verursacht werden können.

### **7.2.3 Automatisches Leiten (ATS)**

Der Automatisierung von Funktionen des Bereichs Leiten kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie wie in 7.1 erwähnt technisch, betrieblich und extern verursachte Betriebsstörungen begrenzen kann. Da die ATS-Funktionen hardwaremäßig und funktional gesehen an einer zentralen Stelle des U-Bahnsystems angesiedelt sind (siehe 4.1.2), vermögen sie außerdem im Gegensatz zu den ATO- und ATP-Funktionen, das gesamte System zu beeinflussen. Daher besitzen sie ein erhöhtes Potenzial für innovative Maßnahmen zur Entstörung.

Dies gilt insbesondere für den Bereich Betriebsplanung. Deshalb werden für diesen Bereich zur Ableitung von Entstörungsstrategien weiter unten nochmals die globalen Optimierungsparameter herangezogen.

Durch eine automatische Betriebsdurchführung können viele Betriebsstörungen verhindert werden. So stellt eine automatische Zuglenkung sicher, dass die Fahrstraßen rechtzeitig gemäß Fahrplan eingestellt werden. Durch falsche oder unpünktliche manuelle Stellhandlungen verursachte Betriebsstörungen können somit entfallen. Die automatische Ausgabe von Fahraufträgen gemäß Fahrplan ist ebenfalls ein Mittel zur Erhöhung der Pünktlichkeit.

Eine automatische Betriebsüberwachung ist eine notwendige Voraussetzung für viele Entstörungsstrategien. So kann ohne eine Zuglaufüberwachung und Darstellung der Gleisbilder nicht die aktuelle Betriebssituation erfasst werden. Folglich können dann auch keine entsprechenden Maßnahmen zur Entstörung eingeleitet werden. Die aktuelle Erfassung des Fahrgastaufkommens ist ein sehr mächtiges Hilfsmittel zur Entstörung, da Betriebsstörungen durch hohes Fahrgastaufkommen bereits im Vorfeld erkannt werden können. Eine automatische Betriebsdisposition erfordert eine Entwicklung von Notbetrieben und Notfallszenarien als Rückfallebenen bereits während der Betriebsplanung, auf die im Folgenden eingegangen wird.

#### **Mittlere Fahrgastwartezeit auf dem Bahnsteig**

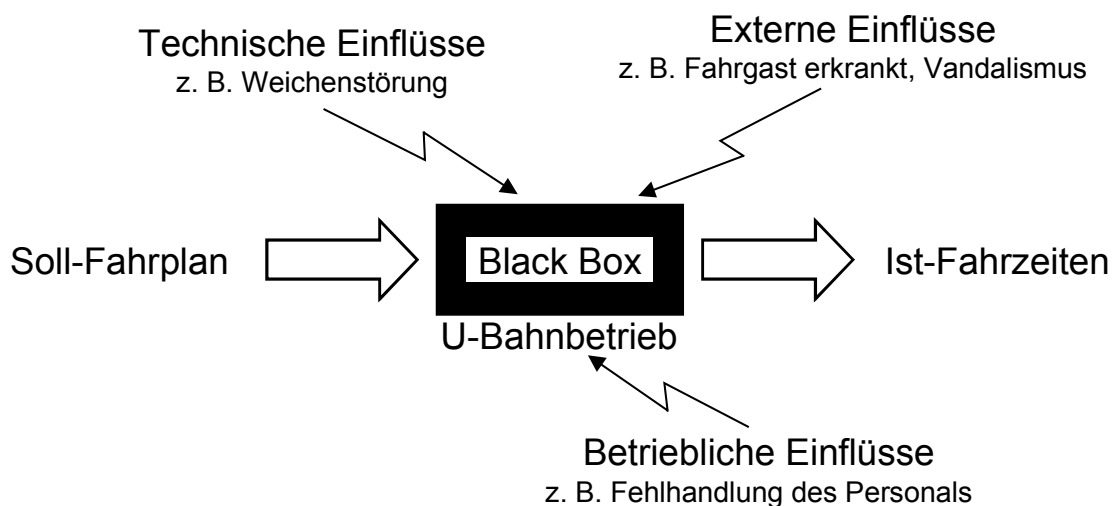
Wie in 6.4 gezeigt, hängt die mittlere Fahrgastwartezeit auf dem Bahnsteig neben der planmäßigen Zugfolgezeit  $Z_{\text{plan}}$ , also dem Takt, von der Varianz der Zugfolgezeit  $Z$  ab. Während eine Erhöhung der planmäßigen Zugfolgezeit den Einsatz von zusätzlichen Fahrzeugen bedeutet, ist die Reduzierung der Varianz der Zugfolgezeit ohne den Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge möglich. Dazu kann ein Regulierungsalgorithmus benutzt

werden: Sobald ein Zug eine bestimmte Verspätung erreicht hat, bei der davon ausgegangen werden kann, dass er diese nicht mehr abbauen kann, wird der gesamte Fahrplan um eine feste Zeit nach hinten versetzt. Damit wird eine Aufschaukelung von Verspätungen und die Paarbildung von Zügen zu Gunsten einer Reduzierung der Varianz der Zugfolgezeit verhindert. Diese Maßnahme ist in der Praxis nur in Zusammenhang mit der Funktion automatisches Fahren sinnvoll, da bei einer Verschiebung des Fahrplans Orte und Zeiten der Dienstablösung von Fahrern ebenfalls verschoben würden.

### Mittlere Fahrgastverspätung während der Fahrt

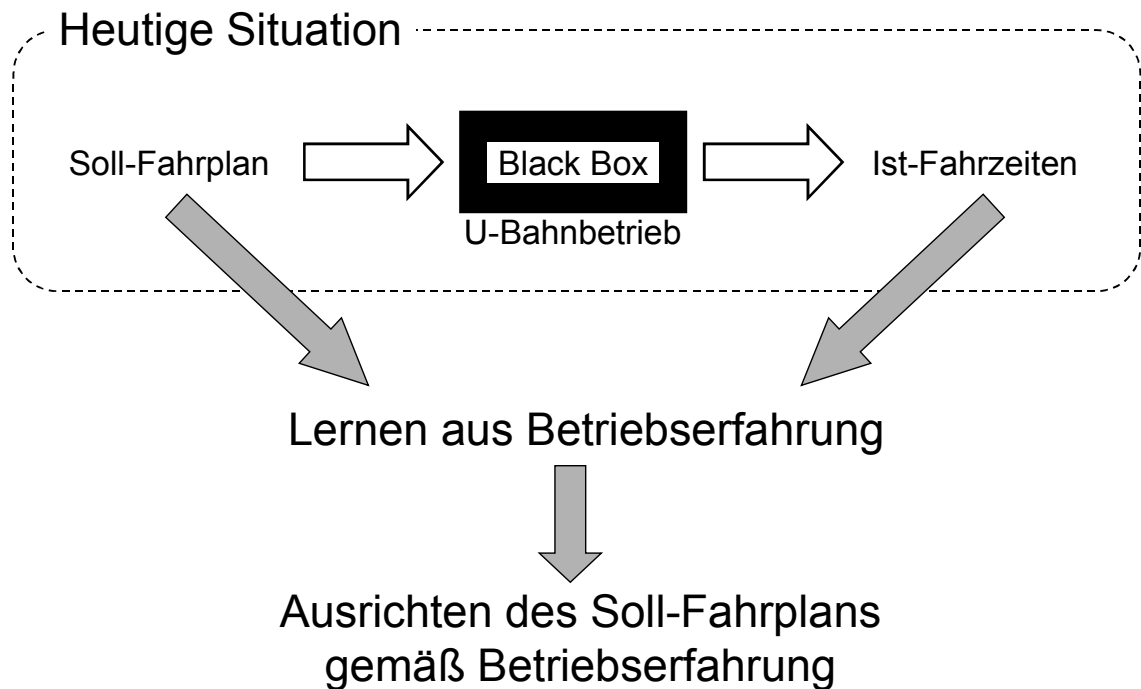
Verspätungen können trivialerweise dadurch verhindert werden, indem der Fahrplan dem tatsächlichen Betriebsablauf angepasst wird. Dies ist in der Regel nicht der Fall, da der Fahrplan meist durch Rundung der tatsächlichen Fahr-, Aufenthalts- und Kehrzeiten erstellt wird.

Eine exakte Vorausberechnung des Betriebsablaufs ist auf Grund der vielen Störgrößen selbstverständlich nur in gewissen Grenzen möglich. Die meisten Störgrößen (Technik, Fahrgäste, externe Einflüsse) sind für den Betreiber nur schwer beeinflussbar und können daher nicht in die Regelung des Betriebs einbezogen werden, wie in Abbildung 32 dargestellt ist.



**Abbildung 32: Prozess U-Bahnbetrieb als Black Box**

Eine Steuerung des Prozesses kann jedoch indirekt erfolgen. Wenn es möglich ist, beispielsweise durch eine Prozesssimulation zuverlässige Prognosen über das Prozessverhalten zu treffen, so können diese als Soll-Vorgaben für den realen Prozess benutzt werden. Eine solche Prozesssimulation benötigt eine hinreichende Betriebserfahrung (siehe Abbildung 33).

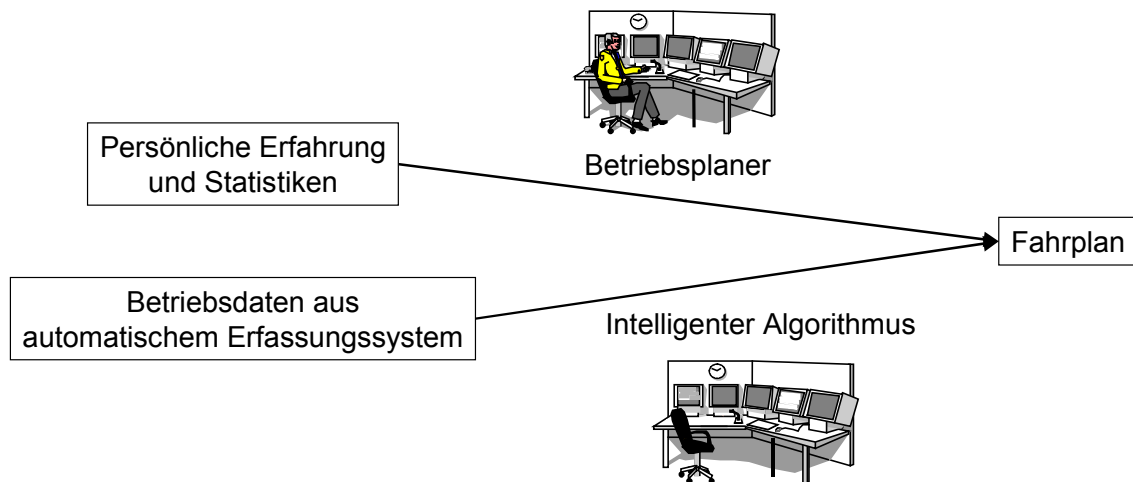


**Abbildung 33: Fahrplanerstellung mit Hilfe von Betriebserfahrung**

Vergleichbare Aktivitäten im Rahmen der Betriebsplanung werden heute durch Menschen durchgeführt. Anhand praktischer Erfahrungen aus dem Betriebsablauf und entsprechender Statistiken ziehen die Betriebsplaner ihre Schlussfolgerungen für die Erstellung des Fahrplans [CUR 80] [HÖR 93] [SMO 91]. Dazu werden bereits heute Programme herangezogen, die den vorgesehenen Betriebsablauf simulieren [BIE 98] [NWI 98] [VSI 95]. Diese Simulationen basieren stets auf einer analytischen Modellbildung des Prozesses U-Bahnbetrieb [ARA 84] [NÖK 96]. Ein Problem ist folglich, dass sie nicht alle Störgrößen berücksichtigen können.

Die Daten, die bereits heute in vielen U-Bahnsystemen durch eine automatische Betriebsdatenerfassung generiert werden, enthalten alle Störgrößeneinflüsse. Sie werden kontinuierlich während des gesamten Betriebsablaufs erfasst und gespeichert. Die dabei entstehenden sehr umfangreichen Datenbanken werden jedoch kaum zur Betriebsplanung benutzt, da bisher keine Betriebsplanungssoftware existiert, die eine systematische Auswertung aller erzeugten Daten ermöglicht.

In Berlin werden beispielsweise nur durch die ATS-Funktion Zuglaufüberwachung für die Linie U7 täglich ca. 2 MByte Betriebsdaten generiert. Würden diese Daten durch einen intelligenten Algorithmus systematisch ausgewertet, wäre dies ein mächtiges Mittel für eine realistische Fahrplanerstellung (siehe Abbildung 34).



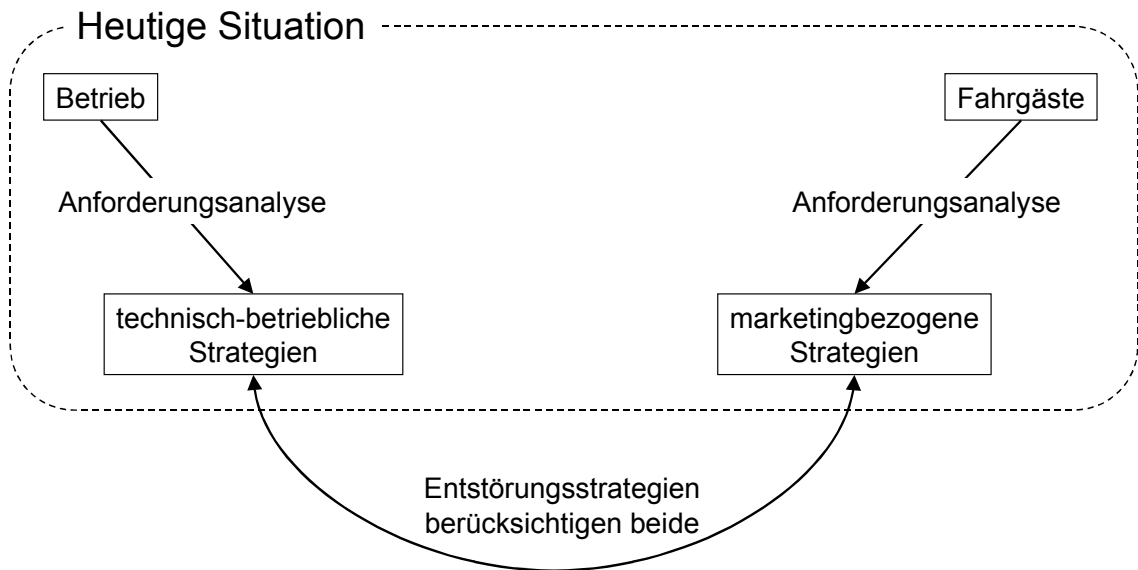
**Abbildung 34: Ist-Zustand und Vision der Fahrplanerstellung**

Ein realistischer Fahrplan könnte die mittlere Fahrgastverspätung reduzieren und damit die Qualität des Verkehrssystems aus Sicht der Fahrgäste entsprechend steigern.

### 7.3 Fazit zu den entwickelten Entstörungsstrategien

Bei den in diesem Kapitel entwickelten Entstörungsstrategien steht die Sicht der Fahrgäste im Mittelpunkt. Diese Sicht ist bei den meisten Verkehrsunternehmen dem Bereich Marketing vorbehalten (Themen Kundenbindung, Fahrgeldeinnahmen etc.). So gibt es zahlreiche Untersuchungen darüber, wie die Fahrgäste das Verkehrsangebot eines Unternehmens bewerten [ACK 98] [SMT 99] [SPP 99]. Andererseits fokussieren sich heute praktizierte Entstörungsstrategien in der Regel nicht auf die Sicht der Fahrgäste, sondern fast ausschließlich auf betrieblich-technische Problemstellungen [PAR 98].

Die in diesem Kapitel entwickelten Entstörungsstrategien können dazu dienen, die vorhandene Lücke zwischen betrieblichen und fahrgastbezogenen Anforderungen zu schließen (siehe Abbildung 35), indem berücksichtigt wird, wie sich der Betrieb konkret ändern muss, um die Anforderungen der Fahrgäste zu erfüllen.



**Abbildung 35: Verbindung betrieblicher und fahrgastbezogener Anforderungen**

Die dazu in 7.2.3 hergeleitete Entstörungsstrategie unter Zuhilfenahme von automatisch erfassten Betriebsdaten erfordert eine Betriebssimulation, mit der zum Zwecke einer realistischen Fahrplanerstellung auf die Zukunft geschlossen werden soll, mit dem Ziel, die mittlere Fahrgastverspätung zu reduzieren.

Es gibt bereits zahlreiche Programme zur Betriebssimulation [NÖK 96] [REH 98], die teilweise auch Betriebsstörungen und sehr selten sogar den Einfluss von Fahrgästen berücksichtigen [CUR 80]. Dabei werden stets analytische Modelle benutzt, die den Betriebsablauf anhand mathematischer Formeln aus Eingangsgrößen wie Streckentopographie, Fahrdynamik der Fahrzeuge und Fahrgastzahlen berechnen. Für viele Anwendungszwecke ist diese Vorgehensweise sinnvoll und ausreichend [VSI 95]. Die analytischen Modelle setzen jedoch voraus, dass jede Störgröße entweder hinreichend bekannt oder ihr Einfluss vernachlässigbar ist. Gerade für geringe Verspätungen, die gemäß 6.3 den Hauptteil der Verspätungen ausmachen, können die Störgrößen häufig jedoch nicht identifiziert, geschweige denn analytisch beschrieben werden. Außerdem ist es unmöglich, so komplexe Prozesse wie beispielsweise das Verhalten der Fahrgäste exakt durch eine analytische Formel zu beschreiben.

Um alle Störgrößen zu berücksichtigen, bietet es sich stattdessen an, wie in 7.2.3 vorgeschlagen zur Betriebssimulation die umfangreichen Daten einer automatischen Betriebsdatenerfassung als Eingangswerte zu benutzen.

Da bisher auf dem Markt keine Software zur Fahrplanerstellung mittels automatisch erfasster Betriebsdaten verfügbar ist, muss ein intelligenter Algorithmus für diese Aufgabe entwickelt werden. Grundsätzlich sind verschiedene mathematisch-statistische Verfahren zur Verarbeitung der Betriebsdaten denkbar, z. B. Verfahren zur Mittelwertbildung der Fahrzeiten. Eine abschließende Erörterung, welches Verfahren hierzu am geeignetsten ist, ist nicht Ziel dieser Ausarbeitung und würde ihren Rahmen sprengen.

Im nächsten Kapitel wird stattdessen als erster Schritt in diese Richtung ein vielversprechendes innovatives Verfahren zur Betriebssimulation auf Basis automatisch erfasster Betriebsdaten ausführlich untersucht und bewertet.

## 8 Betriebssimulation mit künstlichen Neuronalen Netzen

Wie die vorherigen Kapitel zeigen, ist der Prozess U-Bahnbetrieb so komplex und so vielen Störgrößen unterworfen, dass sich mit Hilfe eines analytischen Modells nur Teilaspekte beschreiben lassen, wie z. B. das Phänomen der Aufschaukelung (siehe Kapitel 6.2).

In vielen Anwendungsbereichen, bei denen kein hinreichend genaues analytisches Prozessmodell vorliegt, jedoch umfangreiche Betriebsdaten zur Verfügung stehen, werden künstliche Neuronale Netze (im Folgenden nur als „Neuronale Netze“ bezeichnet) mit großem Erfolg eingesetzt. So ist die Anwendung Neuronaler Netze in der Verfahrenstechnik, der Fertigungstechnik sowie in den Bereichen Mustererkennung und Qualitätsprüfung bereits seit Anfang der 90er-Jahre des 20. Jahrhunderts ein übliches und zuverlässiges Hilfsmittel zur Prozesssimulation [VNN 95].

Da für den U-Bahnbetrieb beim Einsatz einer automatischen Betriebsdatenerfassung die erforderlichen Betriebsdaten zur Verfügung stehen, ist es naheliegend, für die in 7.2.3 hergeleitete Entstörungsstrategie zur Betriebssimulation ein Neuronales Netz als intelligenten Algorithmus einzusetzen.

In diesem Kapitel wird daher untersucht, ob Neuronale Netze ein geeignetes Mittel sind, um das Prozessverhalten des U-Bahnbetriebs vorherzusagen und auf welche Weise sie zur Simulation des U-Bahnbetriebs eingesetzt werden können.

Dazu wird zunächst in 8.1 das Prinzip Neuronaler Netze erläutert und in 8.2 die generelle Vorgehensweise beim Einsatz Neuronaler Netze dargestellt. Anschließend wird in 8.3 die spezielle Vorgehensweise bei der Prozessmodellbildung des U-Bahnbetriebs mit Neuronalen Netzen beschrieben und schließlich in 8.4 der Einfluss der Simulationsparameter ausführlich untersucht [ZAS 00].

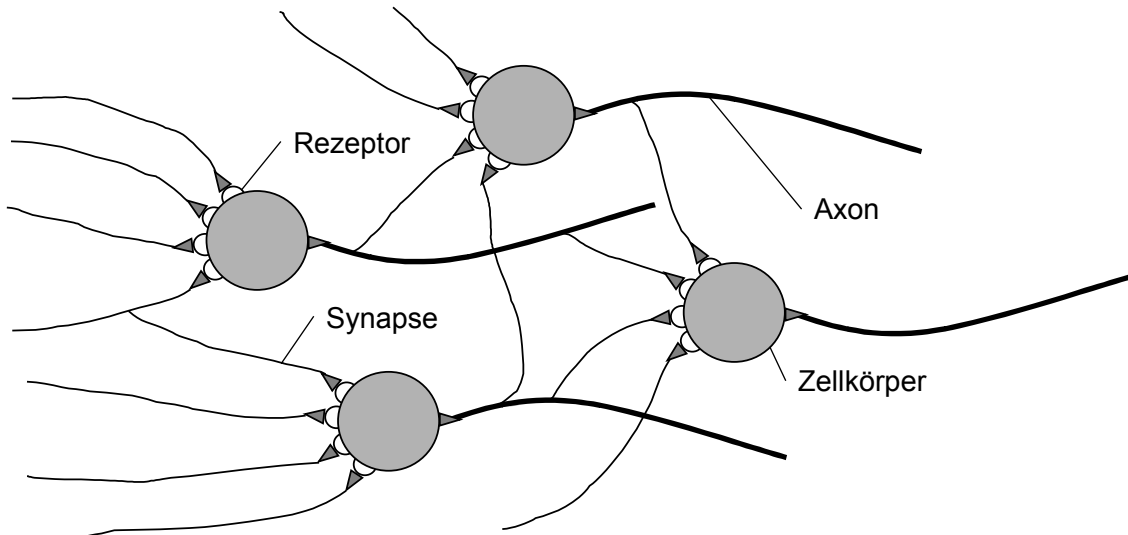
### 8.1 Das Prinzip Neuronaler Netze

Neuronale Netze sind besonders geeignet, komplexe und nichtlineare Abhängigkeiten nachzubilden. Ihr Verhalten wird durch Lernen anhand exemplarischer Daten „antrainiert“. Neuronale Netze sind adaptionsfähig, das heißt, sie können sich auch in neuen bisher nicht aufgetretenen Situationen anpassen und sinnvolle Aussagen treffen. Dies ist eine Eigenschaft, die auch dem menschlichen Gehirn innewohnt.

Bereits um 1940 entwickelten W. S. McCulloch und W. Pitts ein Modell, das die Funktionsweise menschlicher Nervenzellen nachbildet. Nach einer Phase der Anfangseuphorie in den 50er-Jahren des 20. Jahrhunderts, in der man von „künstlichen Elektronengehirnen“ sprach, kam es in den 60er- und 70er-Jahren mangels ausreichender Rechenleistung und Speicherkapazität der auf dem Markt verfügbaren Computer zu einer Stagnation. Somit ist die Renaissance Neuronaler Netze in den späten 80er-Jahren der bis dahin stark angestiegenen Rechenleistung und Speicherkapazität der Computer zu verdanken [KRA 90]. Seitdem werden Neuronale Netze nicht mehr nur in Laboren, sondern verstärkt auch in kommerziellen und industriellen Anwendungen eingesetzt.

Das Prinzip Neuronaler Netze ist es, die Arbeitsweise menschlicher Nervenzellen (Neuronen) nachzubilden. Ein Neuron kann zwei mögliche Zustände einnehmen, in Ruhe

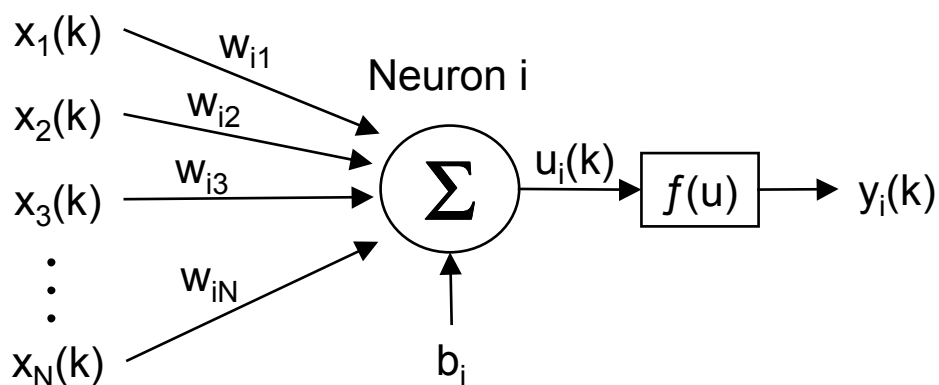
oder erregt. Es besitzt mehrere Eingänge (Synapsen) und einen Ausgang (Axon). Das Axon dient der Weitervermittlung des Erregungszustandes der zugehörigen Zelle. Die Synapse bestimmt, wie sich die über ein Axon vermittelte Erregung auf eine andere Zelle auswirkt. Die Summe der synaptisch ausgewählten Eingangserregungen wird auf eine Zelle über deren Rezeptoren übertragen (siehe Abbildung 36).



**Abbildung 36: Aufbau eines Neuronenkomplexes**

Obwohl ein einzelnes Neuron sehr einfach aufgebaut ist, entsteht durch eine entsprechende Verknüpfung vieler Neuronen ein leistungsfähiges Netz, das auch komplexe Prozesse darstellen kann.

Zum Aufbau Neuronaler Netze wird für ein Neuron  $i$  das in Abbildung 37 dargestellte mathematische Modell benutzt [NEU 98].



**Abbildung 37: Mathematisches Modell eines Neurons**

Die Funktion des Neurons wird zum diskreten Zeitpunkt  $k$  betrachtet. Die Eingänge  $x_j(k)$  stellen die von den Synapsen übermittelten Informationen dar. Die Gewichtungen  $w_{ij}$  stellen den Einfluss der Rezeptoren dar. Der durch das Axon weitervermittelte Zustand des Neurons wird durch  $y_i(k)$  ausgedrückt. Er wird als aktiv bezeichnet, wenn

$y_i(k)$  einen bestimmten Schwellwert überschreitet. Die Aktivität resultiert aus der Anregung des Neurons durch seine Eingänge und die Gewichte der Verbindungen. Die Gewichte können die Anregung des Neurons fördern ( $w_{ij}>0$ ) oder hemmen ( $w_{ij}<0$ ). Für den Fall  $w_{ij}=0$  hat der zugeordnete Eingang keinen Einfluss auf die Aktivität des Neurons. Nach Bildung der Summe wird ein Bias  $b_i$  hinzuaddiert und schließlich eine Aktivierungsfunktion  $f(u)$  darauf angewendet.

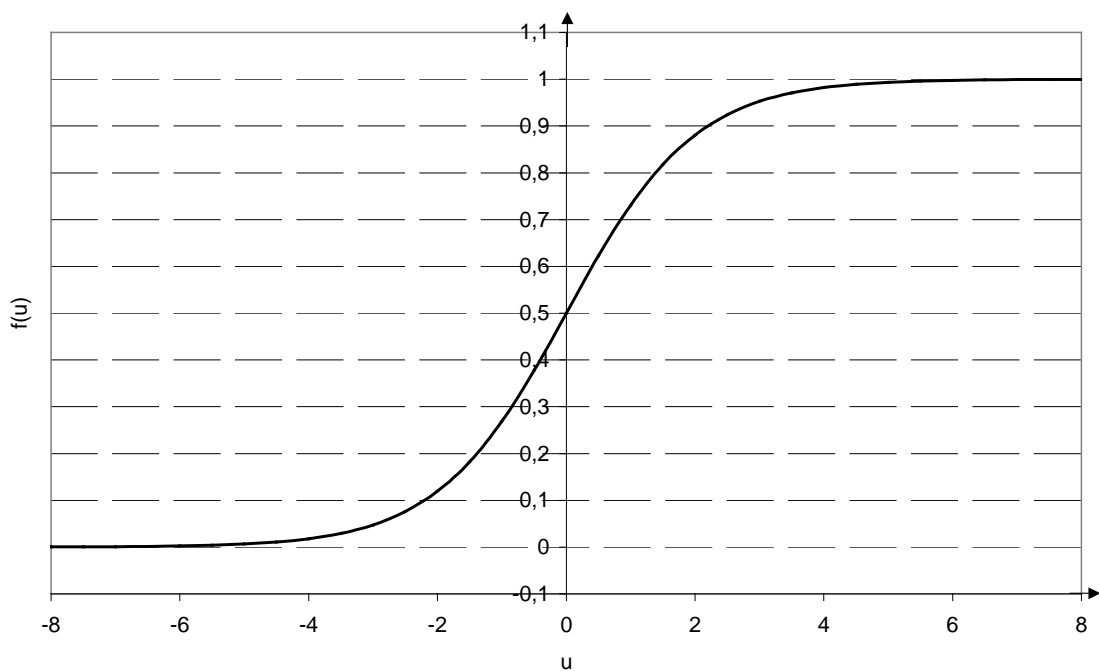
Mathematisch lässt sich das Verhalten des Neurons wie folgt beschreiben:

$$u_i(k) = \sum_{j=1}^N x_j(k) \cdot w_{ij}(k) + b_i, \quad (\text{Gleichung 30})$$

$$y_i(k) = f(u) = f\left(\sum_{j=1}^N x_j(k) \cdot w_{ij}(k) + b_i\right). \quad (\text{Gleichung 31})$$

Als Aktivierungsfunktion  $f(u)$  wird in der Regel eine bezogen auf den Nullpunkt punktsymmetrische, nicht lineare Funktion benutzt wie die Sigmoidfunktion

$$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}} \quad (\text{Gleichung 32})$$

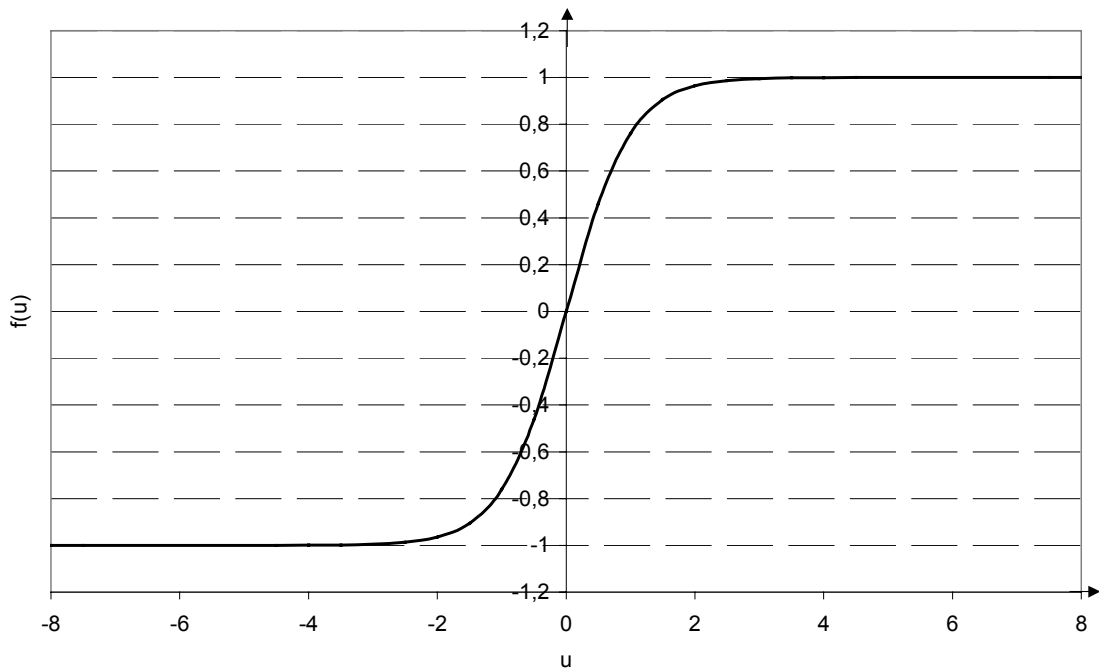


**Abbildung 38: Funktionsgraph der Sigmoidfunktion**

oder der Tangens Hyperbolicus

$$f(u) = \tanh(u) = \frac{e^u - e^{-u}}{e^u + e^{-u}}. \quad (\text{Gleichung 33})$$





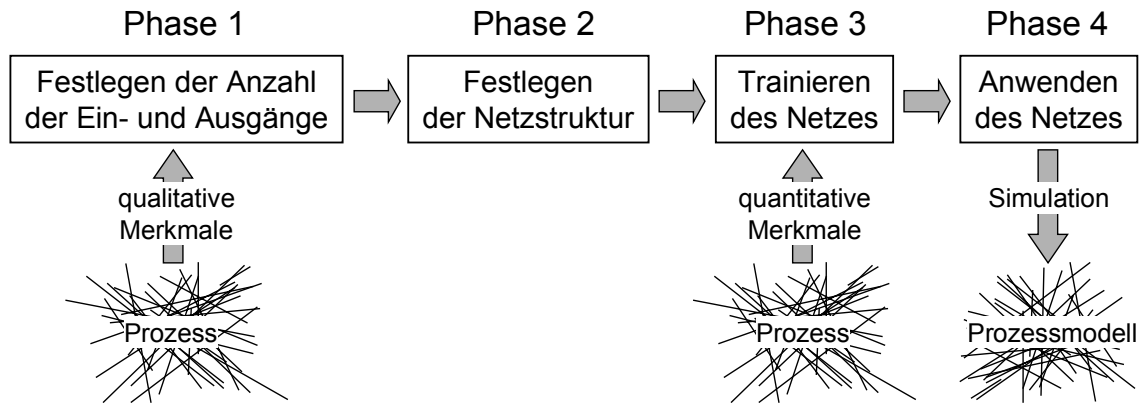
**Abbildung 39: Funktionsgraph des Tangens Hyperbolicus**

Ein Neuron besitzt also die Fähigkeit, einem bestimmten Eingangsvektor einen Ausgangswert zuzuordnen, der für diesen Vektor sowie bei gegebener Aktivierungsfunktion nur von den aktuellen Gewichten und vom Bias abhängt. Mit Hilfe eines Trainingsverfahrens müssen die Gewichtungen eingestellt und optimiert werden.

Durch die Verknüpfung mehrerer Neuronen entsteht ein Neuronales Netz. Es sind beliebige Verknüpfungen möglich. Das am häufigsten angewandte Netz ist das Multi-Layer-Perceptron (MLP-Netz). Dieses Netz besitzt nur vorwärts gerichtete Verknüpfungen (feedforward network), so dass die Ausgangswerte zu einem beliebigen Zeitpunkt  $k$  direkt von den Eingangswerten zum selben Zeitpunkt  $k$  abhängen. Prinzipiell sind auch Netze mit internen Rückführungen denkbar, bei denen der Ausgang eines Neurons zum Zeitpunkt  $k$  auch von seinem eigenen Ausgang zum Zeitpunkt  $k-1$  abhängt.

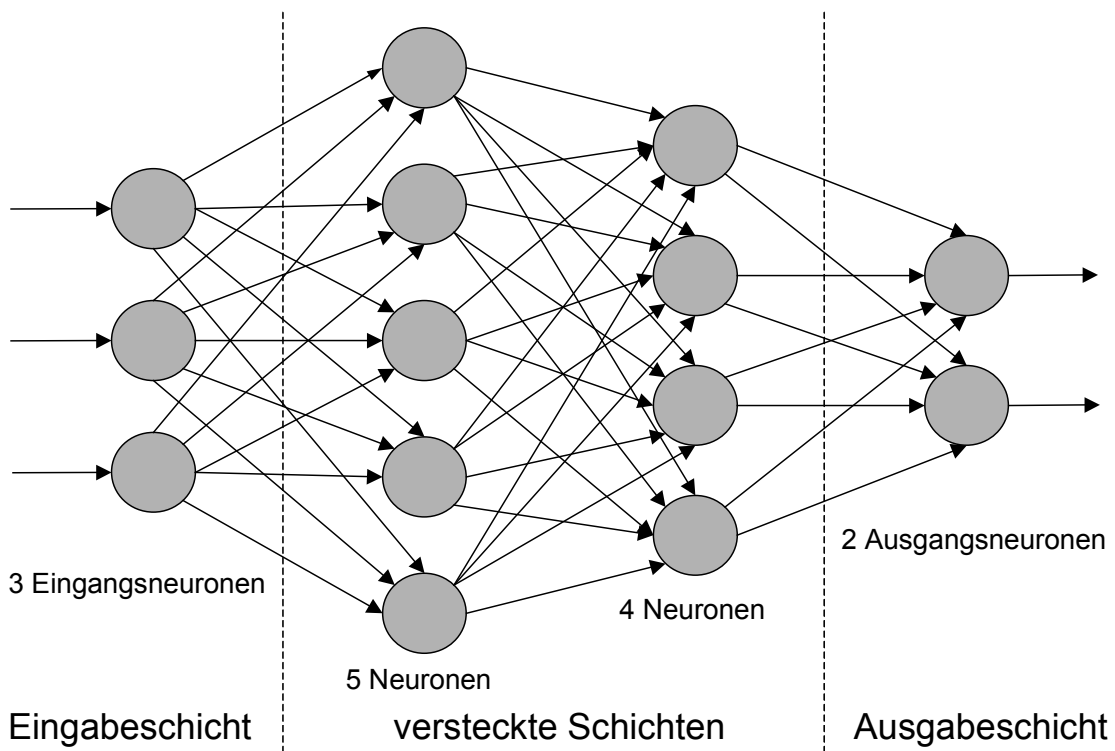
## 8.2 Vorgehensweise beim Einsatz Neuronaler Netze

Der Einsatz Neuronaler Netze gliedert sich in mehrere Phasen, die schematisch in Abbildung 40 dargestellt sind.



**Abbildung 40: Phasen beim Einsatz Neuronaler Netze**

In der ersten Phase wird anhand qualitativer Prozessmerkmale die Anzahl der Ein- und Ausgänge des zu simulierenden Prozesses festgelegt. In der zweiten Phase wird die Struktur des Netzes ausgewählt. Dazu wird jedem Eingang ein Eingangsneuron und jedem Ausgang ein Ausgangsneuron zugeordnet. Zwischen Eingangs- und Ausgangsschicht befindet sich eine beliebige Anzahl versteckter Schichten. Diese versteckten Schichten besitzen wiederum eine beliebige Anzahl von Neuronen. Der Trainingsprozess in Phase 3 wird umso komplexer, je mehr Schichten und Neuronen sich im Netz befinden. Das beispielhaft in Abbildung 41 dargestellte MLP-Netz besitzt drei Eingänge, zwei Ausgänge und zwei versteckte Schichten.



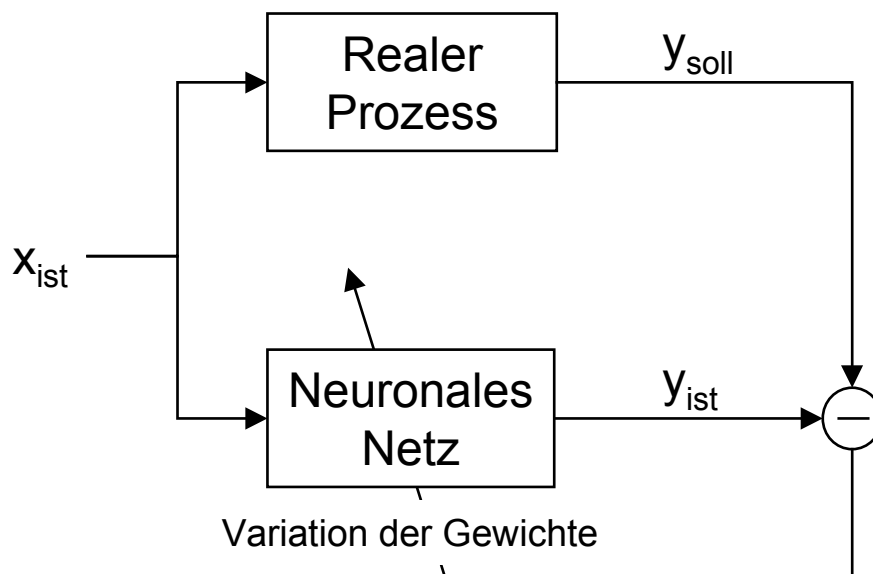
**Abbildung 41: Beispiel für die Struktur eines Neuronalen Netzes**

Neben MLP-Netzen werden in Software-Tools häufig auch Radiale-Basis-Funktionen-Netze (RBF-Netze) angeboten. Diese besitzen grundsätzlich nur eine versteckte Schicht. Anders als bei MLP-Netzen werden die Eingänge zu den Neuronen dieser Schicht nicht mit den Gewichten multipliziert sondern es wird ein Maß für die Ähnlichkeit zwischen Gewichten und Eingangswert gebildet. Je größer diese Ähnlichkeit ist, desto stärker wird das entsprechende Neuron angeregt. Die Übertragung zur Ausgabe-schicht erfolgt im wesentlichen nach dem Prinzip „the winner takes it all“; das heißt, das Neuron, dessen Gewichte den Eingangswerten am nächsten sind, bestimmt maßgeblich den Ausgang. Der Wert des Ausgangs ergibt sich aus dem Gewicht zwischen dem am stärksten angeregten Neuron und der Ausgabeschicht.

Die Auswahl der gewünschten Netzstruktur erfolgt in der Regel empirisch, da es sehr aufwendig ist, während der Trainingsphase neben der Variation der Verbindungsgewichte auch die Netzstruktur zu variieren. Sind die Simulationsergebnisse nicht zufriedenstellend, so kann durch Veränderung der Netzstruktur das Netz optimiert werden.

Nach Festlegung einer Netzstruktur muss das Netz in der dritten Phase das gewünschte Übertragungsverhalten erlernen. Das am häufigsten eingesetzte Verfahren ist der Backpropagation-Algorithmus, bei dem die Verbindungsgewichte zwischen den Neuronen so lange variiert werden, bis das gewünschte Übertragungsverhalten mit einem festzulegenden maximalen Restfehler erreicht ist (siehe Abbildung 42).

Dazu sind Trainingsdaten erforderlich, die das zu simulierende Prozessverhalten darstellen. Es handelt sich hierbei in der Regel um Messwerte aus dem realen Prozess.



**Abbildung 42: Trainingsphase mit dem Backpropagation-Algorithmus**

Der Name Backpropagation bezieht sich auf das Prinzip, dass für jedes Gewicht der Anteil am Ausgangsfehler ermittelt wird und als Rückschluss eine Veränderung des Gewichtes in die Richtung erfolgt, für die der Ausgangsfehler kleiner wird.

Nach Abschluss der Trainingsphase kann das trainierte Neuronale Netz in der vierten Phase als Prozessmodell zur Simulation des realen Prozesses benutzt werden. Es ist

sinnvoll, zuerst eine Validierung durchzuführen, in der getestet wird, ob das Prozessmodell hinreichend genaue Ergebnisse liefert.

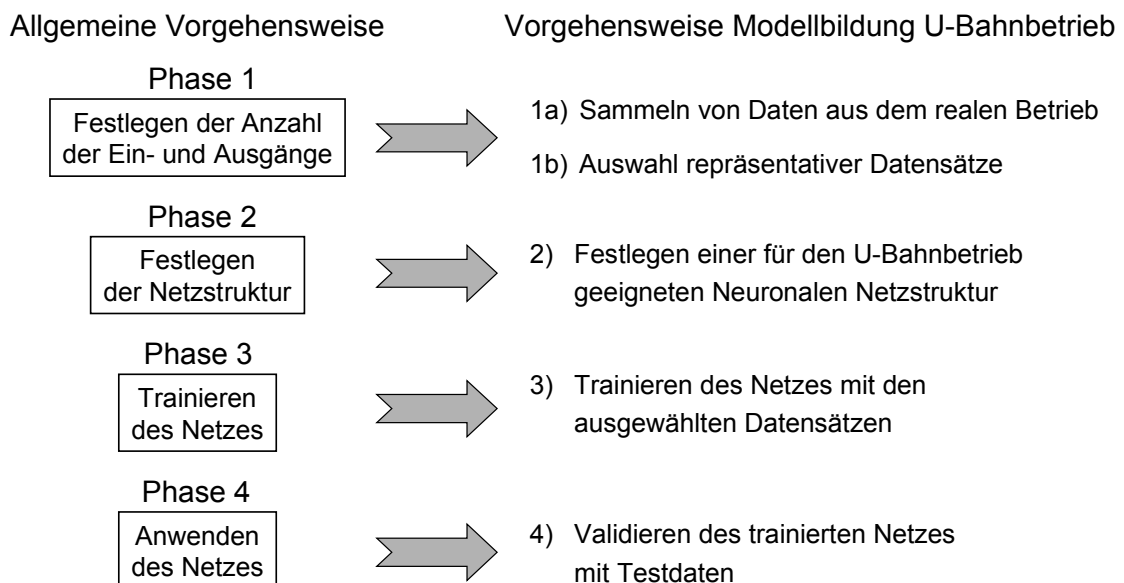
Dazu wird in der Regel so vorgegangen, dass aus der Gesamtmenge der Messdaten aus dem realen Prozess eine zufällig ausgewählte Mehrheit benutzt wird, um das Neuronale Netz zu trainieren. Die restlichen Messdaten aus derselben Gesamtmenge werden als Testdaten für die Simulation genutzt. Damit ist sichergestellt, dass es keine negative Validierung auf Grund einer Inhomogenität zwischen Trainings- und Testdaten gibt.

Bleibt der Restfehler unzureichend groß, so können entweder noch mehr Messdaten zum Trainieren des Netzes herangezogen werden, oder die Struktur des Netzes wird verändert (Neuronenanzahl pro versteckter Schicht oder Anzahl versteckter Schichten).

Verändert sich der reale Prozess, so kann das Prozessmodell durch eine erneute Trainingsphase jederzeit wieder angepasst werden. Dies ist ein wesentlicher Vorteil Neuronaler Netze gegenüber konventionellen analytischen Prozessmodellen, für deren Anpassung in der Regel kein formalisiertes Verfahren existiert.

### 8.3 Vorgehensweise bei der Modellbildung des U-Bahnbetriebs

Zur Modellbildung des Prozess‘ U-Bahnbetrieb kann prinzipiell die gleiche Vorgehensweise wie beim generellen Einsatz Neuronaler Netze verfolgt werden. Es sind innerhalb der Phasen lediglich einige Detaillierungen vorzunehmen (siehe Abbildung 43).



**Abbildung 43: Herleitung der Vorgehensweise zur Modellbildung U-Bahnbetrieb**

Die Ergebnisse der letzten Phase, der Validierung, können Anlass dazu sein, die vorherigen Phasen zu wiederholen, bis die Ergebnisse befriedigend sind.

Alle Phasen werden im Folgenden näher erläutert.

### **8.3.1 Phase 1a: Sammeln von Daten aus dem realen Betrieb**

Um reale Betriebsdaten sammeln zu können, ist eine automatische Betriebsdatenerfassung notwendig. Das heißt, die Positionen aller Züge im U-Bahnnetz müssen über die gesamte Zeit erfasst und gespeichert werden. Diese Funktion wird als Zuglaufüberwachung bezeichnet und durch das ATS-System realisiert.

Für jeden Zug werden Zugposition und Zugnummer kontinuierlich oder punktförmig erfasst. Die Informationen werden von der Streckenperipherie über dezentrale Einrichtungen zur zentralen Leit- und Sicherungsebene übertragen. Dort erfolgt ein Abgleich mit den Fahrplandaten. Dies erlaubt die Anzeige der aktuellen Soll- und Ist-Positionen aller Züge. Die Informationen werden gespeichert und archiviert.

Durch eine Aufbereitung der Archive können Datensätze zum Trainieren und Testen Neuronaler Netze gezielt generiert werden. Jeder Datensatz bezieht sich auf eine Zugfahrt und kann alle für diese Zugfahrt interessierenden Prozessgrößen enthalten.

### **8.3.2 Phase 1b: Auswahl repräsentativer Datensätze**

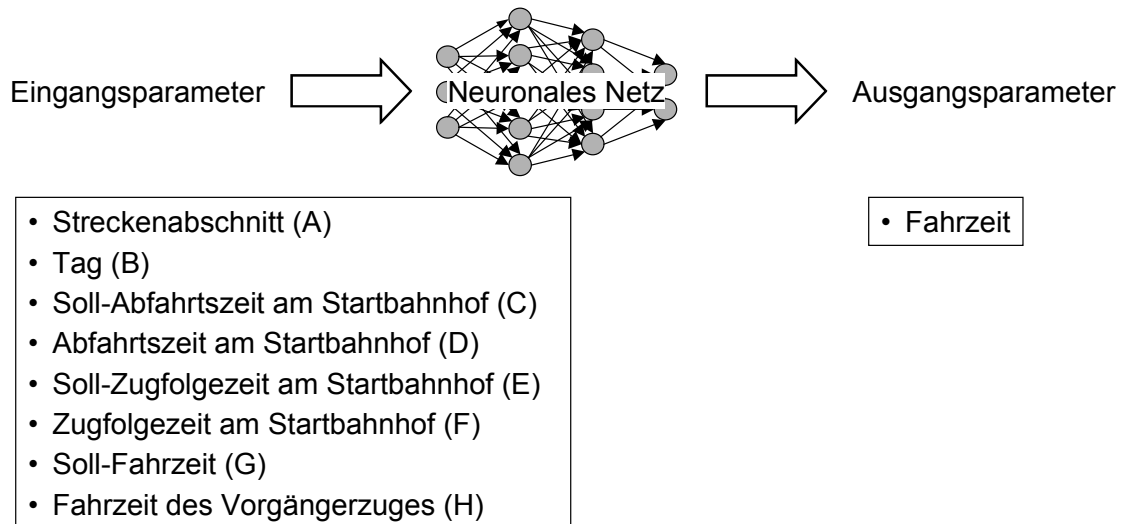
Ziel dieser Phase ist es festzulegen,

- welche Eingangs- und Ausgangsparameter aus den gespeicherten Datensätzen benutzt werden sollen und
- welche der gespeicherten Datensätze zum Trainieren des Neuronalen Netzes geeignet sind.

Jeder vorhandene Datensatz bezieht sich auf eine Zugfahrt von einem bestimmten Betriebspunkt zu einem anderen Betriebspunkt. Die Auswahl der Betriebspunkte hängt davon ab, auf welchen Teil des Fahrplans sich die Simulation beziehen soll. Die Simulation kann für alle interessierenden Betriebspunkte der Linie (z. B. Bahnhöfe) durchgeführt werden, so dass ein beliebig vollständiges Prozessabbild entsteht, sofern die entsprechenden Datensätze vorhanden sind.

Bei der Auswahl der Datensätze für das Training des Neuronalen Netzes ist darauf zu achten, dass sie keine außergewöhnlichen Ereignisse enthalten, wie beispielsweise Beeinträchtigungen des Zugverkehrs durch Fahrgastunfälle. Es kann davon ausgegangen werden, dass solche Unfälle nicht vorhersagbar sind. Daher tragen Trainingsdaten, die solche Ereignisse enthalten, zur Verschlechterung der Simulationsergebnisse bei. Inwieweit sich eine sorgfältigere Filterung der Trainingsdaten auf die Simulationsgüte auswirkt, wird in 8.4.1 untersucht.

Da es das Ziel der Simulation ist, gemäß der in 7.2.3 beschriebenen Entstörungsstrategie aus den Betriebsdaten einen realistischen Fahrplan zu entwickeln, ist die Fahrzeit eines Zuges zwischen zwei betrachteten Betriebspunkten (inklusive Haltezeiten) der für die Simulation relevante Ausgangsparameter. Die aus den Betriebsdaten zu gewinnenden möglichen Eingangsparameter (A bis H) sind in Abbildung 44 dargestellt.



**Abbildung 44: Ein- und Ausgangsparameter des Neuronales Netzes**

Im Folgenden wird die Relevanz der möglichen Eingangsparameter im Einzelnen anhand realer Betriebsdaten analysiert.

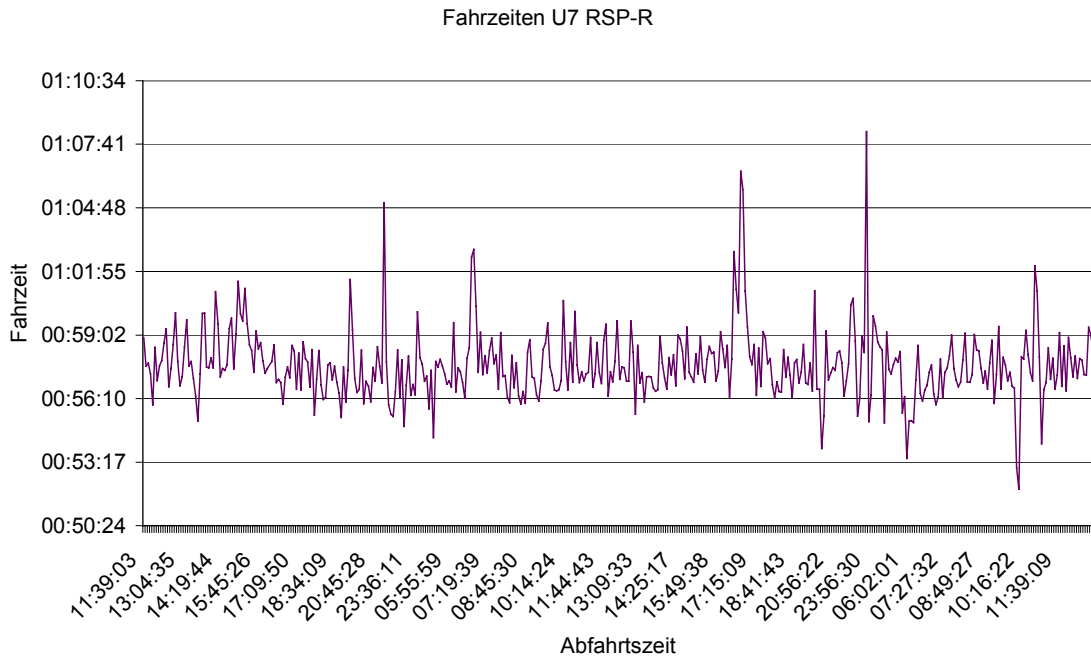
### 8.3.2.1 Streckenabschnitt (Parameter A)

Ein notwendiger erster Schritt für eine konkrete Modellbildung ist die Festlegung des zu betrachtenden Streckenabschnitts, für den das Neuronale Netz trainiert werden soll. Es wird dabei vorausgesetzt, dass die betrieblichen Rahmenbedingungen, wie z. B. Gleistopographie, Lage der Bahnhöfe und Fahrzeugmaterial, konstant sind.

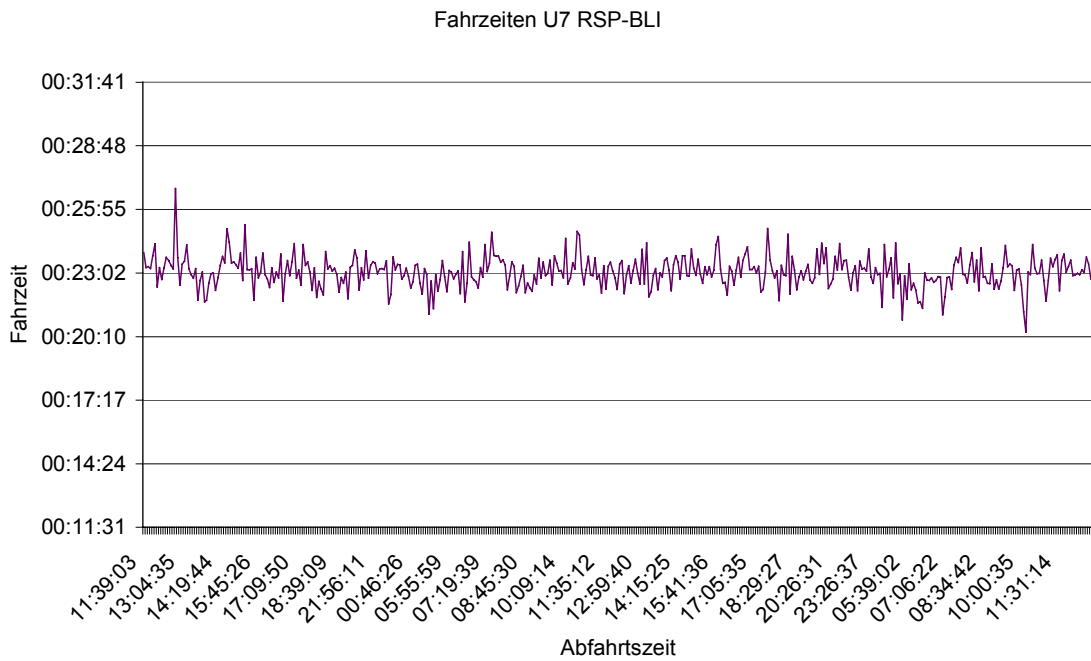
In den folgenden Abbildungen ist die Fahrzeit über der Abfahrtszeit der Züge am Startbahnhof für mehrere Tage dargestellt.

Ein Vergleich der in Abbildung 45 beispielhaft dargestellten Fahrzeiten auf der gesamten Berliner Linie U7 von Rathaus Spandau bis Rudow (31,8 km) mit den in Abbildung 46 im gleichen Maßstab dargestellten Fahrzeiten auf dem Teilabschnitt von Rathaus Spandau bis Blissestraße (ca. 13 km) zeigt, dass die Streuung auf diesem kürzeren Abschnitt deutlich geringer ist. Der mittlere Betrag der Abweichung vom Mittelwert der Fahrzeiten beträgt für den betrachteten Zeitraum auf der gesamten Linie U7 66 Sekunden, während er für den Teilabschnitt Rathaus Spandau - Blissestraße nur 32 Sekunden beträgt.

Um die Abhängigkeit zwischen der Fahrzeit-Abweichung und der Streckenlänge zu kompensieren werden alle fünf in Kapitel 8.4 definierten Bewertungsgrößen auf die mittlere Fahrzeit bezogen, sodass sich eine prozentuale Abweichung ergibt, die unabhängig von der Streckenlänge ist.



**Abbildung 45: Fahrzeit auf der gesamten Linie U7 (RSP-R) für verschiedene Abfahrtszeiten (Beispiel)**

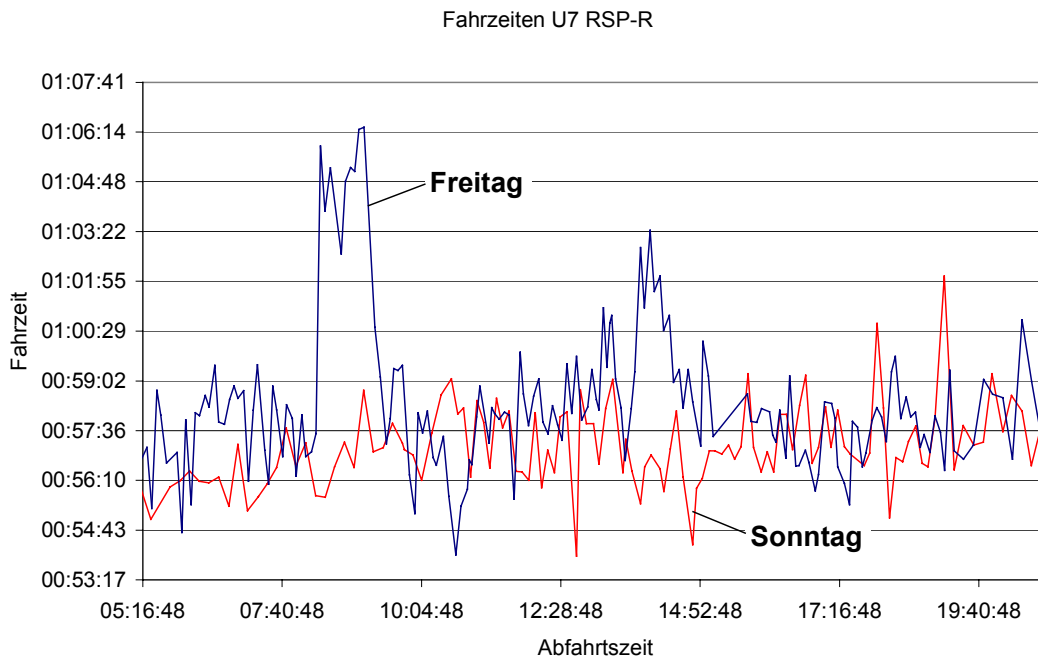


**Abbildung 46: Fahrzeit auf einem Teil der Linie U7 (RSP-BLI) für verschiedene Abfahrtszeiten (Beispiel)**

### 8.3.2.2 Tag (Parameter B)

Im Idealfall sind für jeden Tag eines Jahres genügend Erfahrungswerte aus vorherigen Jahren vorhanden, um mittels des Neuronales Netzes zuverlässige Prognosen treffen zu können. Ist dies nicht der Fall, so kann die Angabe des Tages auf den Wochentag verallgemeinert werden.

In Abbildung 47 ist deutlich zu erkennen, dass der Verlauf der Fahrzeit über der Tageszeit in Abhängigkeit des Wochentags variieren kann.



**Abbildung 47: Fahrzeit auf der Linie U7 für zwei verschiedene Wochentage (Beispiel)**

Wie detailliert die einzelnen Tage zu unterscheiden sind, hängt von der für das Trainieren zur Verfügung stehenden Datenmenge ab. Sind nur wenige Trainingsdaten vorhanden, so kann es ausreichend sein, bloß zwischen Werktag und Feiertag zu unterscheiden.

In der Umsetzung können zur Vereinfachung der Repräsentation die Ziffern 1-7 für die Wochentage Montag bis Sonntag benutzt werden. Für spezielle Feiertage, für die der Betrieb mit keinem der sieben normalen Wochentage vergleichbar ist, können die Ziffern ab 8 benutzt werden. Eine weitere Sonderstellung nehmen die Schulferien ein, die ebenfalls durch die Hinzunahme weiterer Ziffern dargestellt werden können.

### 8.3.2.3 Soll-Abfahrtszeit am Startbahnhof (Parameter C)

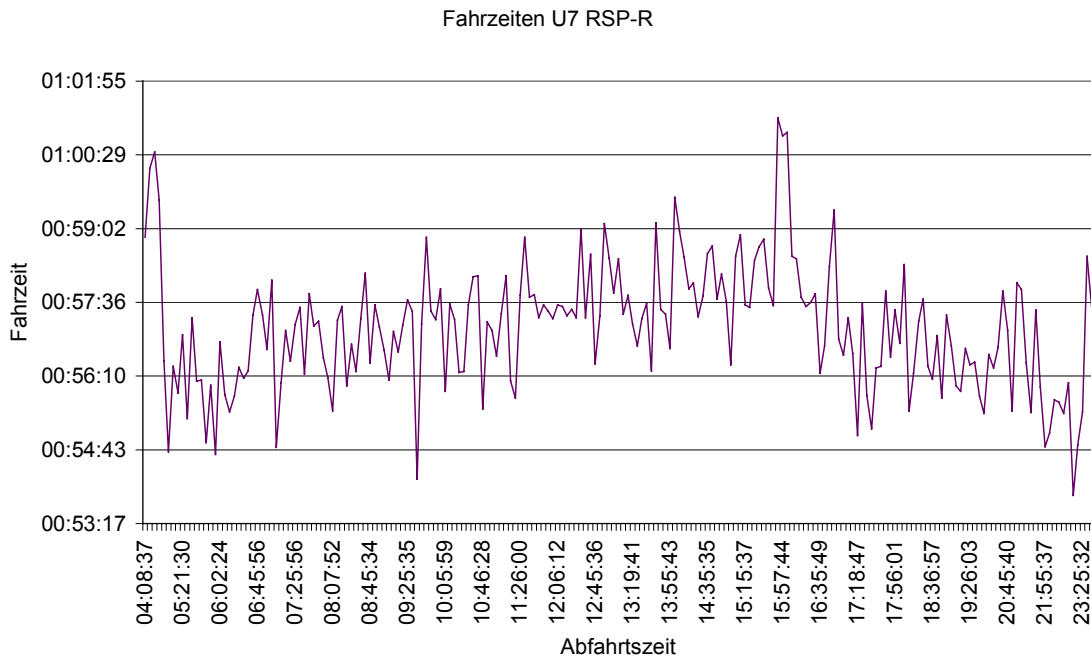
Da die Tageszeit eng mit dem Fahrgastaufkommen und über den Fahrplan indirekt auch mit dem Zugtakt zusammenhängt, ist zu vermuten, dass sich die Abfahrtszeit maßgeblich auf die Fahrzeit auswirkt.

Daher werden die Parameter C und D (Soll-Abfahrtszeit und Abfahrtszeit am Startbahnhof) als Eingangsparameter der Simulation herangezogen. Der Verlauf der Fahrzeit über der Soll-Abfahrtszeit entspricht etwa Abbildung 48.



### 8.3.2.4 Abfahrtszeit am Startbahnhof (Parameter D)

In Abbildung 48 ist der Verlauf der Fahrzeit der Linie U7 von Rathaus Spandau nach Rudow über der Abfahrtszeit für einen Beispieltag dargestellt.



**Abbildung 48: Fahrzeit auf der Linie U7 in Abhängigkeit von der Abfahrtszeit (Beispiel)**

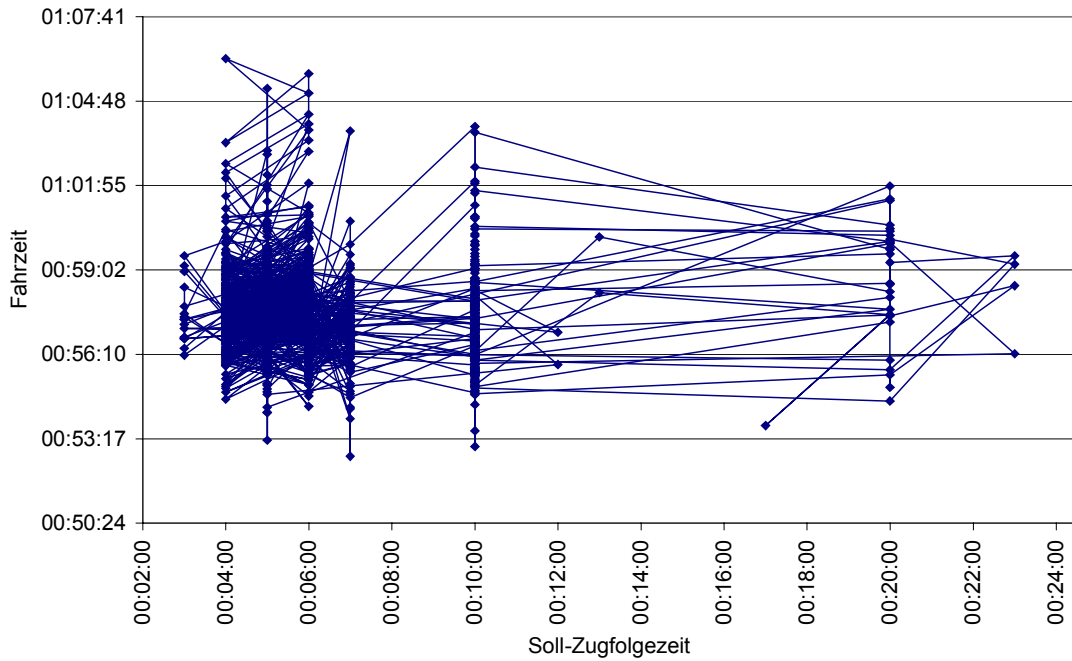
Neben dem bogenförmigen Verlauf mit seinem Maximum am frühen Nachmittag, den Minima in den frühen Morgen- und den späten Abendstunden sowie den Maxima in den Nachtstunden fällt besonders die alternierende Schwankung zwischen den einander folgenden Zügen auf. Diese Paarung von Zügen ist ein typisches Ergebnis des Phänomens der Aufschaukelung, das in Kapitel 6.2 ausführlich beschrieben ist. Um dies zu berücksichtigen, wäre z. B. die Einführung eines zeitbehafteten Parameters sinnvoll, der per Rückkopplung genutzt werden könnte (vergleiche Parameter H in 8.3.2.8).

### 8.3.2.5 Soll-Zugfolgezeit am Startbahnhof (Parameter E)

Die Zugfolgezeit am Startbahnhof hängt über den Fahrplan indirekt auch von der Abfahrtszeit ab. Insofern ist sie mit Angabe der Abfahrtszeit und des Tages eindeutig aus dem Fahrplan ablesbar. Allerdings stimmen Soll- und Ist-Zugfolgezeit nur als Mittelwert überein. Einzelne Abweichungen der Zugfolgezeit sind insbesondere für das Phänomen der Aufschaukelung von großer Bedeutung.

Daher werden die Parameter E und F (Soll-Zugfolgezeit und Zugfolgezeit am Startbahnhof) als Eingangsparameter der Simulation herangezogen. Der Verlauf der Fahrzeit über der Soll-Zugfolgezeit ist in Abbildung 49 beispielhaft für die Linie U7 dargestellt.

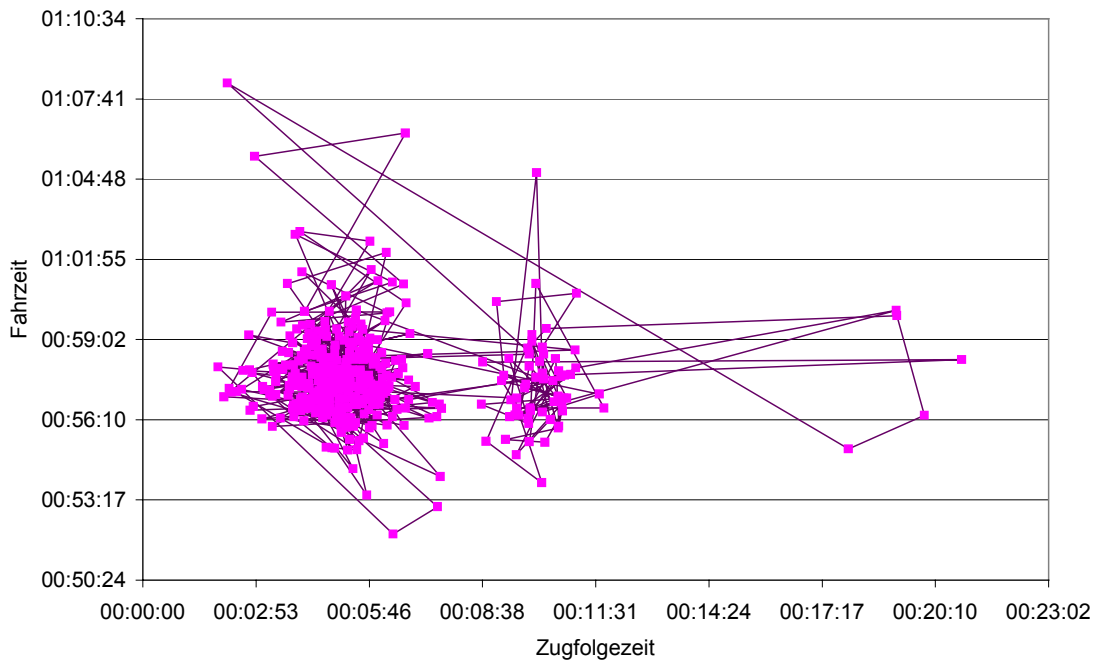
Es ist eine starke Streuung der Fahrzeit für jede vorhandene Soll-Zugfolgezeit zu erkennen. Eine klare Tendenz lässt sich jedoch ohne weiteres nicht ablesen.



**Abbildung 49: Fahrzeit auf der Linie U7 in Abhängigkeit von der Soll-Zugfolgezeit am Startbahnhof (Beispiel)**

**8.3.2.6 Zugfolgezeit am Startbahnhof (Parameter F)**

In Abbildung 50 ist die Abhängigkeit der Fahrzeit von der Zugfolgezeit am Startbahnhof für einen Beispieltag auf der Linie U7 dargestellt.



**Abbildung 50: Fahrzeit auf der Linie U7 in Abhängigkeit von der Zugfolgezeit am Startbahnhof (Beispiel)**

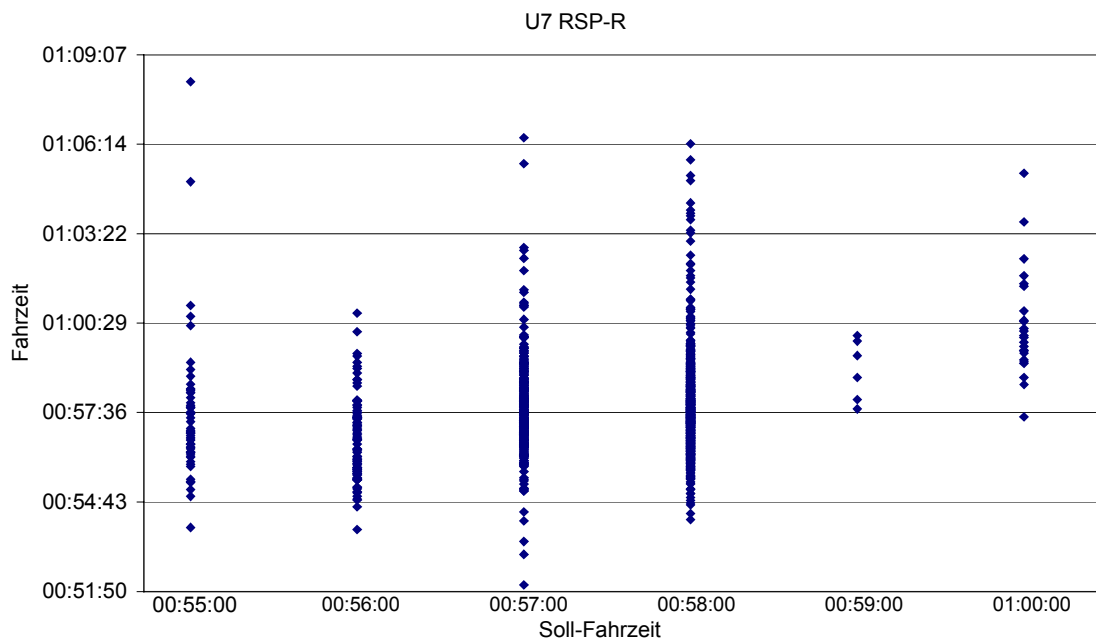
Ein systematischer Zusammenhang lässt sich ohne weiteres nicht erkennen.

Ein Vorteil für die Benutzung der Zugfolgezeit am Startbahnhof als Eingangsgröße ist, dass es bei Variation derselben möglich ist verschiedene Fahrplanvarianten zu simulieren. Dies ist eine sehr günstige Eigenschaft zur Fahrplanoptimierung.

### 8.3.2.7 Soll-Fahrzeit (Parameter G)

Es ist anzunehmen, dass sich die im Fahrplan angegebene Soll-Fahrzeit auf die echte Fahrzeit auswirkt.

In Abbildung 51 ist die Fahrzeit in Abhängigkeit von der Soll-Fahrzeit für einen Beispieltag auf der Linie U7 dargestellt.

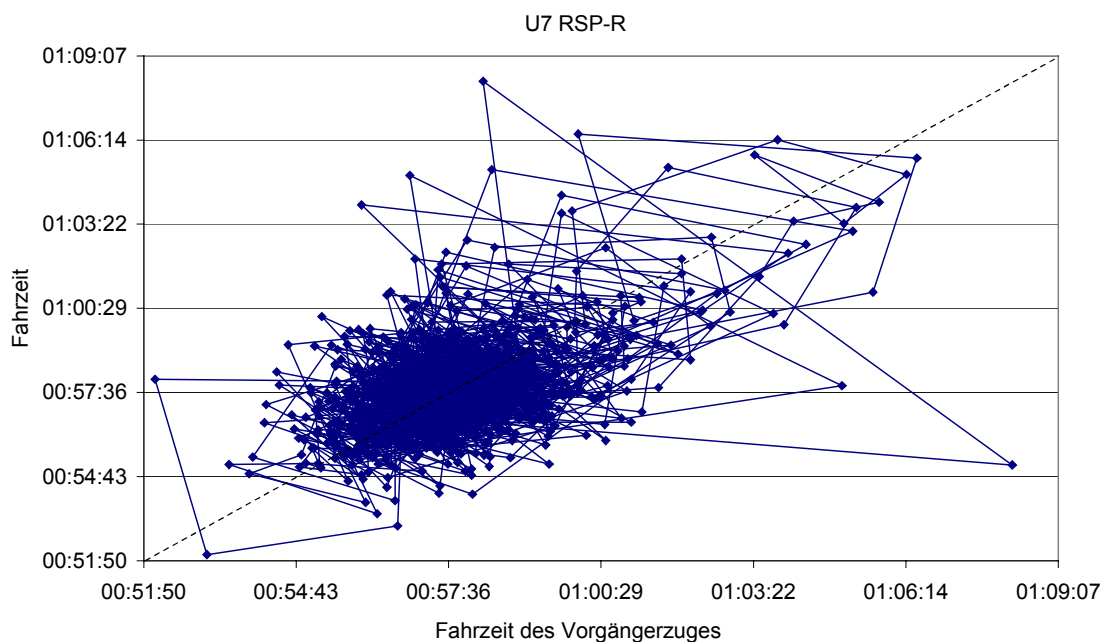


**Abbildung 51: Fahrzeit auf der Linie U7 in Abhängigkeit von der Soll-Fahrzeit (Beispiel)**

Obwohl generell eine starke Streuung der Werte zu beobachten ist, steigen die Mittelwerte der Fahrzeit mit steigender Soll-Fahrzeit.

### 8.3.2.8 Fahrzeit des Vorgängerzuges (Parameter H)

In Abbildung 52 ist die Abhängigkeit der Fahrzeit von der Fahrzeit des Vorgängerzuges für einen Beispieltag auf der Linie U7 dargestellt.



**Abbildung 52: Fahrzeit auf der Linie U7 in Abhängigkeit von der Fahrzeit des Vorgängerzuges (Beispiel)**

Die eigene Fahrzeit und die des Vorgängerzuges sind für die Züge identisch, deren Fahrzeit sich auf der eingezeichneten Diagonale befindet. Die Punkte unterhalb der Diagonalen repräsentieren Züge, deren Fahrzeit unterhalb der ihres Vorgängerzuges liegt. Für Züge oberhalb der Diagonalen liegt die eigene Fahrzeit über der des Vorgängerzuges. Dank der Verbindung der Punkte aufeinander folgender Züge ist erkennbar, dass die Differenz der Fahrzeiten zweier aufeinander folgender Züge in vielen Fällen alterniert. Dies ist der Fall, wenn die Verbindungslinie zwischen zwei Punkten die Diagonale schneidet. Eine Ursache dafür ist die bereits in 6.2 aufgezeigte Paarbildung verspäteter Züge. Diese Tatsache wird dadurch bestärkt, dass das Schneiden der Diagonale vorzugsweise im höheren Fahrzeitbereich zu erkennen ist, also bei verspäteten Zügen, für die auch das Phänomen der Paarbildung mathematisch vorhergesagt wurde.

### 8.3.3 Phase 2: Festlegen einer geeigneten Struktur des Neuronalen Netzes

In dieser Phase wird die Anzahl der versteckten Schichten zwischen Eingabe- und Ausgabeschicht festgelegt, ebenso die Anzahl der Neuronen pro versteckter Schicht. Da es hierzu keine feste Regel gibt, sind empirische Untersuchungen mit unterschiedlichen Strukturen notwendig.

Spätestens in dieser Phase werden Software-Tools zum Modellieren Neuronaler Netze eingesetzt. Die Anzahl der einsetzbaren versteckten Schichten und die Anzahl der Neuronen pro Schicht sind durch die jeweilige Software begrenzt.

Neben dem Einsatz von MLP-Netzen bieten einige Programme auch den Einsatz von RBF-Netzen an. Für die Simulation des U-Bahnbetriebs wird in 8.4 sowohl der Einsatz von MLP- als auch von RBF-Netzen untersucht.

### **8.3.4 Phase 3: Trainieren des Netzes mit den ausgewählten Datensätzen**

Sind Netztyp, Netzstruktur und die Trainingsdatensätze ausgewählt, so kann die Trainingsphase durchgeführt werden. Bei den meisten Software-Tools wird bereits während des Trainings die aktuelle Fehlerrate angezeigt. Das Training kann beendet werden, wenn entweder eine festgelegte Fehlergrenze unterschritten oder eine festgelegte Trainingsdauer erreicht ist.

Nach Abschluss der Trainingsphase liegt das fertige Prozessmodell vor und kann angewendet werden.

### **8.3.5 Phase 4: Validieren des trainierten Netzes mit Testdaten**

Nach der Trainingsphase sollte das erstellte Prozessmodell mit Hilfe von Testdaten auf Plausibilität überprüft werden, bevor es zu Prognosen über das reale Prozessverhalten herangezogen wird. Die Testdaten sollten nicht aus den Trainingsdaten stammen, damit das Neuronale Netz nicht durch pures Auswendiglernen zum Erfolg kommen kann.

Das Neuronale Netz lernt aus den Erfahrungen, mit denen es trainiert wurde. Daher sollten die Testdaten für das System typisch sein und keine außergewöhnlichen Sonderfälle enthalten, die nicht vorhersagbar sind.

## **8.4 Bewertung des Einflusses der Simulationsparameter**

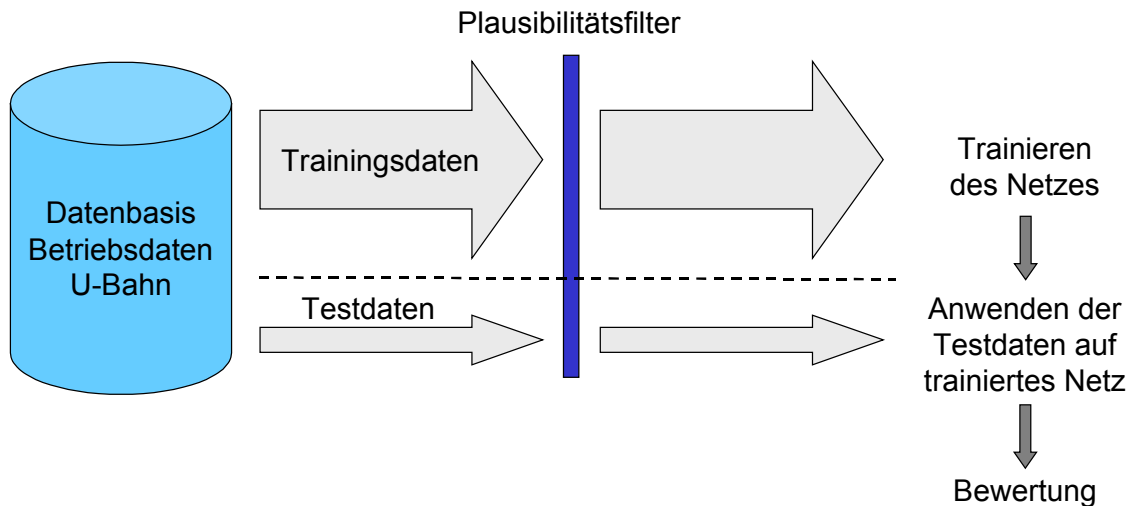
Der Einfluss der Simulationsparameter wird im Folgenden analysiert und bewertet. Um eine allgemeingültige Aussage für U-Bahnsysteme zu erhalten, ist es notwendig, sowohl konventionell als auch automatisch betriebene Systeme zu berücksichtigen.

Für den konventionellen U-Bahnbetrieb werden Prozessdaten der Berliner Linie U7 herangezogen [BVG]. Die vollständig unterirdisch verlaufende Linie erstreckt sich über 32 km und besitzt 40 Bahnhöfe. In der betrachteten Richtung von Rathaus Spandau nach Rudow finden werktags 200 und feiertags 140 Zugfahrten statt. Sowohl das Abfertigen als auch das Führen der Züge erfolgt manuell durch die Zugfahrer. Die Messreihen stammen aus den Monaten Juni 1998, April 1999 und Januar 2000 (jeweils außerhalb der Schulferien) und umfassen insgesamt 1760 Zugfahrten. 90 % der Zugfahrten, die zufällig ausgewählt wurden, dienen als Trainingsdaten und die übrigen 10 % als Testdaten.

Für den automatischen U-Bahnbetrieb werden Prozessdaten der Pariser Linie 14 (Météor) herangezogen [PAR]. Die vollständig unterirdisch verlaufende Linie erstreckt sich über 7,2 km und besitzt sieben Bahnhöfe. In der betrachteten Richtung von Madeleine nach Bibliothèque François Mitterrand finden werktags 450 und feiertags 360 Zugfahrten statt. Sowohl das Abfertigen als auch das Führen der Züge erfolgt automatisch durch das ATC-System. Weder im Zug noch auf dem Bahnsteig ist im Regelbetrieb Betriebspersonal vorhanden. Die Messreihen stammen aus den Monaten Februar und März 2000 (jeweils außerhalb der Schulferien) und umfassen 2693 Zugfahrten. 90 % der Zugfahrten, die zufällig ausgewählt wurden, dienen als Trainingsdaten und die übrigen 10 % als Testdaten.

## Vorgehensweise

Abbildung 53 zeigt die Vorgehensweise zur Bewertung des Einflusses der Simulationsparameter.



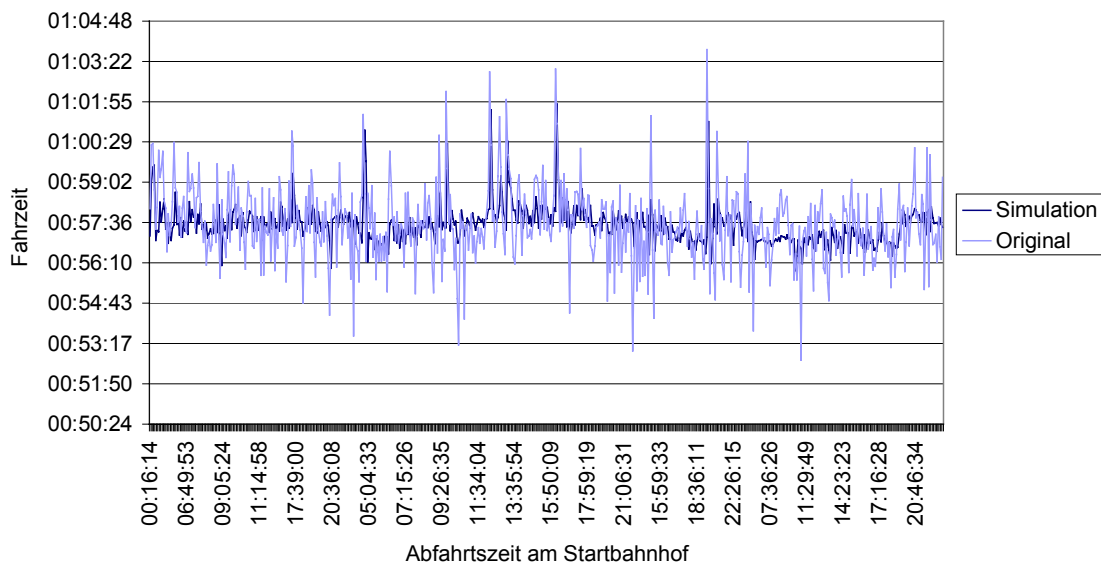
**Abbildung 53: Vorgehensweise zur Bewertung der Simulationsparameter**

Aus der Datenbasis von Betriebsdaten wird je Zugfahrt ein Datensatz generiert, der die gewünschten Ein- und Ausgangsparameter enthält. Die Datensätze durchlaufen ein Plausibilitätsfilter, das unvollständige und formal fehlerhafte Datensätze entfernt, wie z. B. die erste Zugfahrt nach einer Betriebspause (Fehlen des Vorgängerzuges; Parameter E, F und H). Das zu untersuchende Neuronale Netz wird anschließend mit den Trainingsdaten trainiert. Zur eigentlichen Simulation werden dann die Testdaten auf das trainierte Netz angewendet. Die Bewertung der Simulationsgüte erfolgt durch einen Vergleich zwischen den simulierten Fahrzeiten mit den Original-Fahrzeiten aus den Testdaten.

Die Berechnungen werden mit der Software NeuroSystems der Firma Siemens durchgeführt. Neben einer komfortablen Bedienung bietet diese Software die Möglichkeit, MLP- und RBF-Netze mit bis zu 100 Eingängen und zehn Ausgängen zu generieren. Jede versteckte Schicht kann bis zu 50 Neuronen enthalten. Bei MLP-Netzen gibt es maximal zwei versteckte Schichten, bei RBF-Netzen typbedingt eine (siehe Seite 73). Die Ein- und Ausgabe der Daten erfolgt über ASCII-Files.

Bereits während der Trainingsphase wird der aktuelle Lernerfolg durch die Software angezeigt. Das jeweils untersuchte Netz wird solange trainiert, bis ein weiterer Lernerfolg nicht mehr erkennbar ist. Die daraus resultierende Anzahl der Lernschritte liegt für die untersuchten Betriebsdaten aus Berlin und Paris pro Simulation etwa im Bereich zwischen 100 und 1000, je nach Komplexität des Netzes.

Abbildung 54 zeigt das Ergebnis einer typischen Simulation. Auf der Abszisse sind die Zugfahrten nach ihrer Abfahrtszeit am Startbahnhof sortiert dargestellt. Die jeweiligen Fahrzeiten sind auf der Ordinate aufgetragen. Zum Vergleich sind zusätzlich die zugehörigen Original-Fahrzeiten dargestellt.



**Abbildung 54: Original- und simulierte Fahrzeiten im Vergleich (Beispiel)**

Auch wenn sowohl Übereinstimmungen als auch Abweichungen zwischen Simulation und Original erkennbar sind, ist es schwierig, anhand einer solchen Darstellung die Simulationsgüte zu beurteilen. Es müssen dazu Bewertungskenngrößen herangezogen werden.

### Bewertungsgrößen

Im Folgenden werden fünf geeignete Bewertungsgrößen definiert, mit deren Hilfe die Ergebnisse der weiteren Untersuchungen beurteilt werden können.

Die Bewertungsgrößen berechnen sich aus

- dem Mittelwert,
- dem Mittelwert des Betrages,
- der Standardabweichung,
- dem positiven Maximum und
- dem negativen Maximum

der Abweichung der simulierten von der Original-Fahrzeit, jeweils bezogen auf die mittlere Fahrzeit der Zugfahrten der Testdaten für den betrachteten Streckenabschnitt.

Der Bezug auf die mittlere Fahrzeit dient dazu, die Ergebnisse für verschiedene Streckenabschnitte miteinander vergleichen zu können, so dass alle Bewertungsgrößen in Prozent darstellbare relative Abweichungen sind.

Die bezüglich der Simulationsgüte aussagekräftigsten Bewertungsgrößen sind der Mittelwert des Betrages der Abweichung und die Standardabweichung der Abweichung, da diese alle Daten der jeweiligen Simulationsreihe bewerten. Um eine Kompensation von positiven und negativen Abweichungen zu berücksichtigen, wird außerdem der Mittelwert der Abweichung (ohne Betragsbildung) betrachtet. Die Bewertungsgrößen positives und negatives Maximum der Abweichung dienen dazu, das maximale Fehlermaß der Simulation abschätzen zu können.

Anhand dieser Bewertungsgrößen werden die nachfolgenden Untersuchungen durchgeführt. Sie betrachten

- den Einfluss der Netzstruktur,
- den Einfluss der Bereinigung der Trainingsdaten und
- den Einfluss der Eingangsparameter.

In den folgenden Unterkapiteln werden diese Schritte ausführlich beschrieben.

#### **8.4.1 Einfluss der Netzstruktur und der Bereinigung der Trainingsdaten**

Zur Untersuchung des Einflusses der Netzstruktur und der Bereinigung der Trainingsdaten werden Simulationsreihen mit Daten aus dem konventionellen und dem automatischen Betrieb durchgeführt. Eingesetzt werden MLP- und RBF-Netze unterschiedlicher Struktur. Jede Simulationsreihe wird zweimalig aufgenommen: mit unbereinigten und bereinigten Trainingsdaten.

Wie bereits in 8.3.2 dargestellt kann die Bereinigung der Trainingsdaten dazu dienen, nicht vorhersehbare, vom Betrag untypisch große Verspätungen vor dem Trainieren des Netzes zu eliminieren. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Verspätungsverteilung (siehe Abbildung 29 und Abbildung 30) werden für die Betriebsdaten aus Berlin und Paris unterschiedliche Grenzen für die maximale absolute Verspätung gewählt.

Zur Bereinigung der Trainingsdaten aus Berlin werden Datensätze mit einem Betrag der Verspätung über drei Minuten eliminiert (6,5 % der Trainingsdaten). Die Bereinigung der Trainingsdaten aus Paris erfolgt durch eine Eliminierung von Datensätzen mit einem Betrag der Verspätung über einer Minute (1,7 % der Trainingsdaten).

Die Bewertung des Einflusses der Netzstruktur und der Bereinigung der Trainingsdaten erfolgt anhand der fünf Bewertungsgrößen, die in den folgenden Abbildungen für den konventionellen und den automatischen Betrieb dargestellt sind. Auf der Abszisse sind jeweils die untersuchten Netzstrukturen dargestellt. Die Zahlen bezeichnen die Anzahl der Neuronen pro Schicht. X steht für die Eingangsschicht. Zur Unterscheidung wird für RBF-Netze als Trennzeichen eine Raute (#) benutzt, für MLP-Netze ein Bindestrich (-). Zur besseren Übersicht sind die Durchschnittswerte separat aufgeführt.

In Abbildung 55 ist deutlich zu erkennen, dass sich im konventionellen Betrieb die Bereinigung der Trainingsdaten negativ auf den Mittelwert der Abweichung auswirkt. Die simulierten Fahrzeiten liegen im Durchschnitt unter den Original-Fahrzeiten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass es in den Originaldaten mehr positive als negative Verspätungen gibt und sich daher durch die Bereinigung der Trainingsdaten der Mittelwert der Fahrzeit nach unten verschiebt. Auffällig sind außerdem erhöhte Abweichungen für RBF-Netze mit mehr als 15 Neuronen in der versteckten Schicht.

Für den Mittelwert des Betrages der Abweichung sind in Abbildung 56 keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Netzstrukturen zu erkennen. Lediglich RBF-Netze mit mehr als 15 Neuronen weisen wiederum erhöhte Abweichungen auf. Gleiches gilt für die Standardabweichung der Abweichung in Abbildung 57. Die maximale positive Abweichung in Abbildung 58 und die maximale negative Abweichung in Abbildung 59 zeigen insgesamt schlechtere Ergebnisse für RBF-Netze als für MLP-Netze.



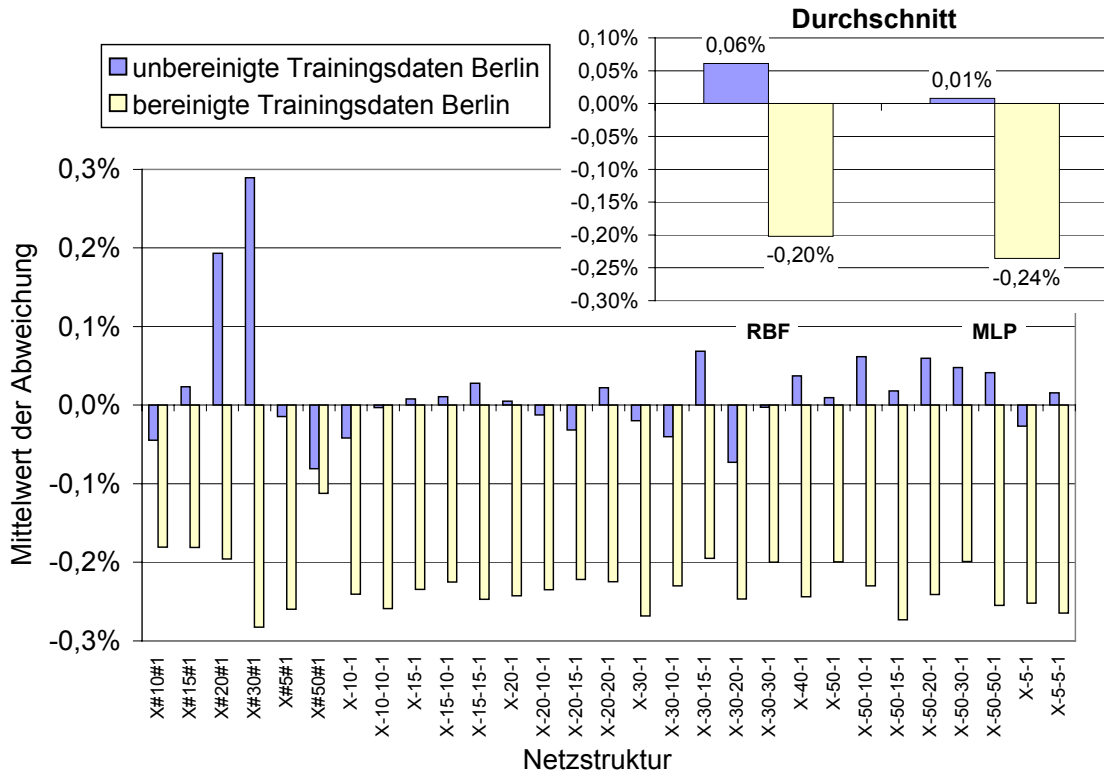


Abbildung 55: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Mittelwert der Abweichung, Betriebsdaten Berlin

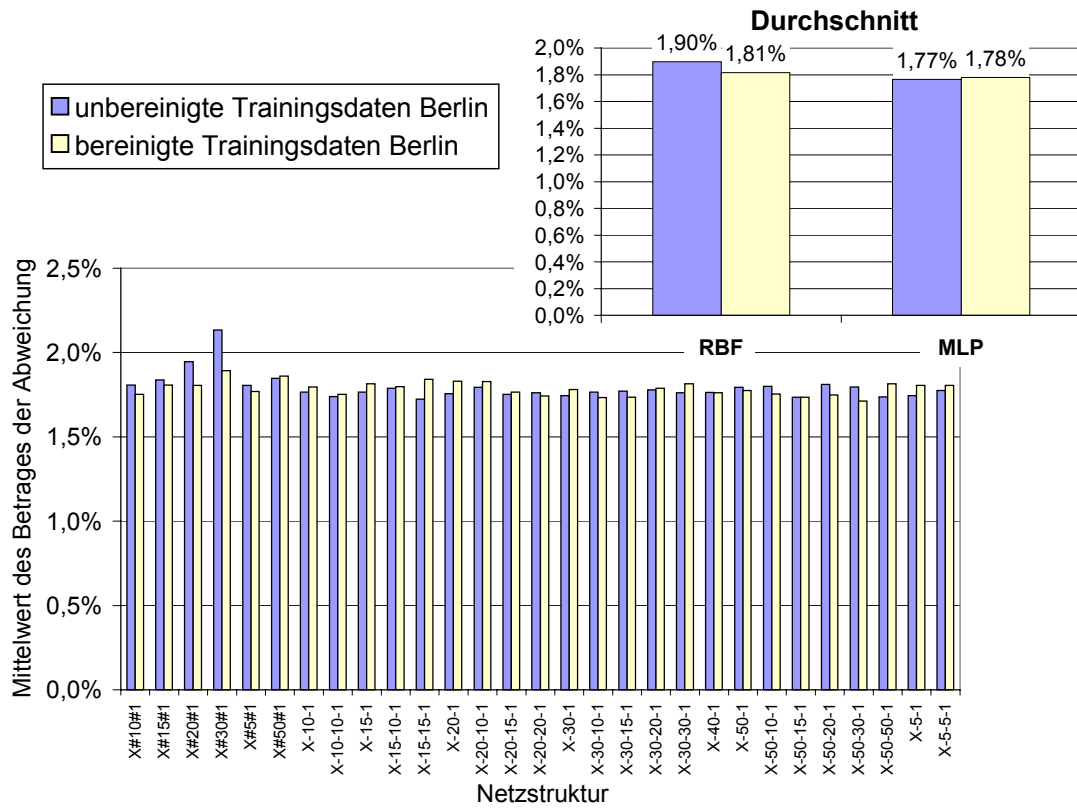


Abbildung 56: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Mittelwert des Betrages der Abweichung, Betriebsdaten Berlin

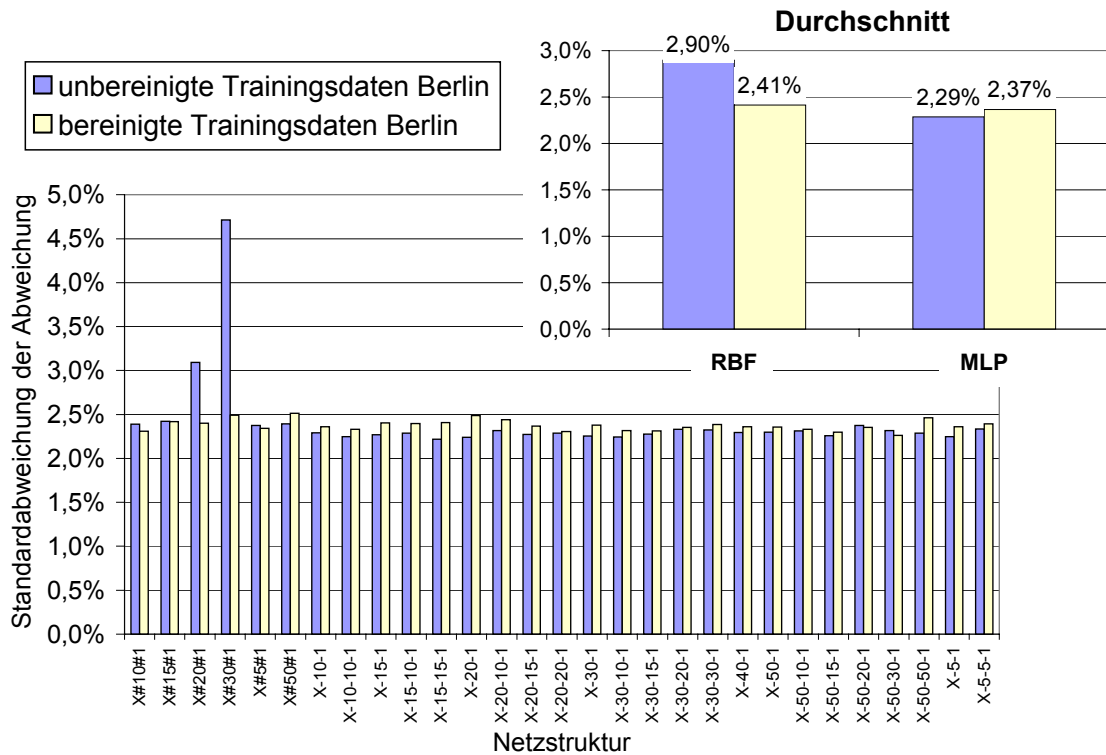


Abbildung 57: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Standardabweichung der Abweichung, Betriebsdaten Berlin

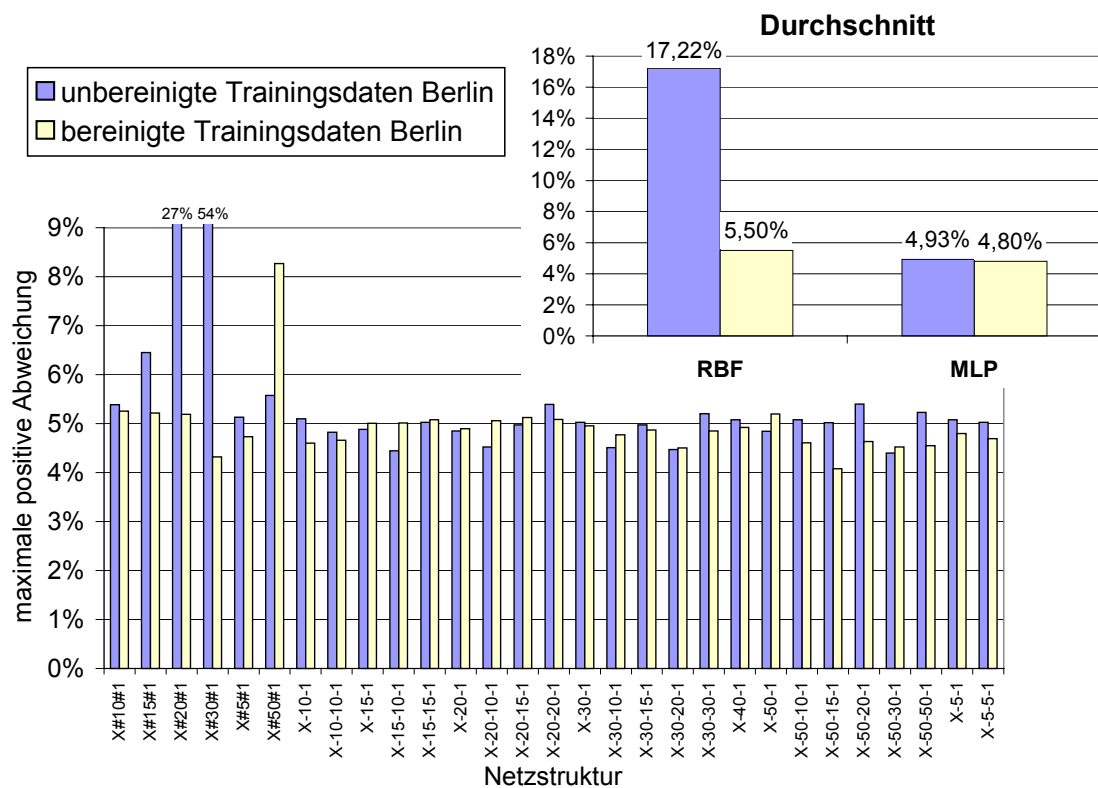
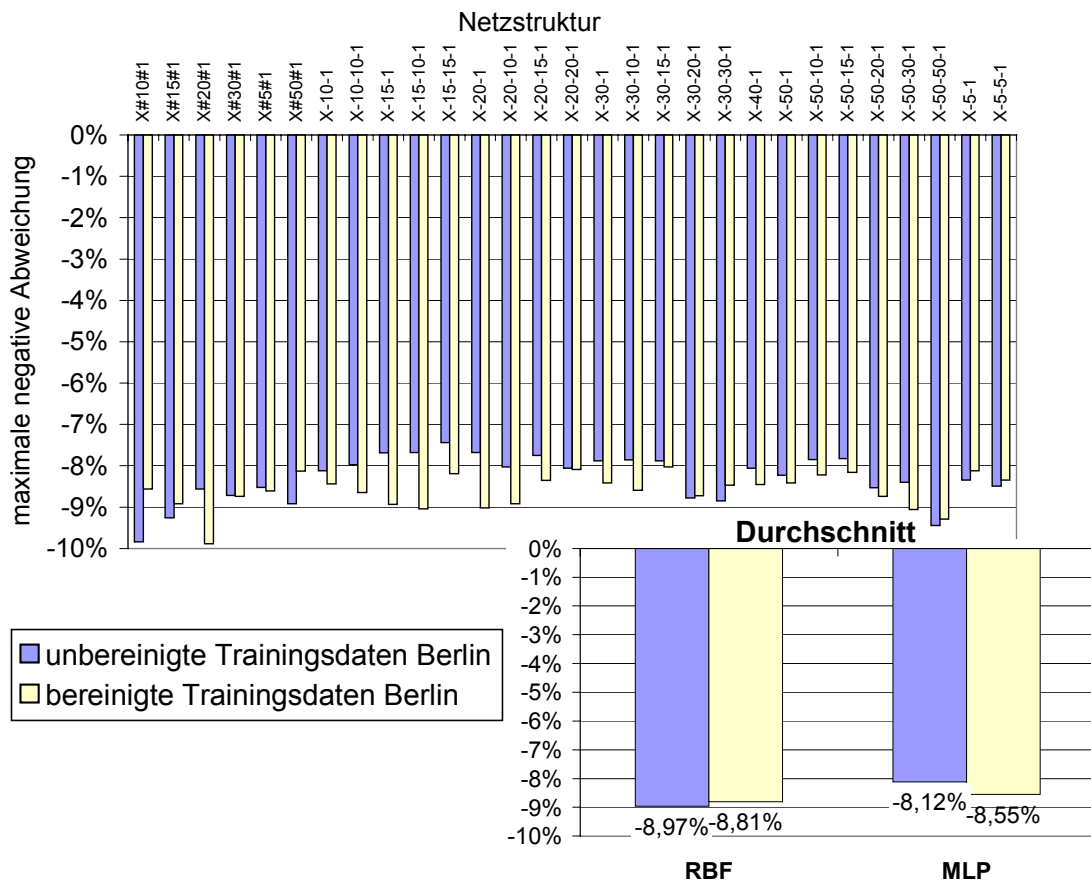


Abbildung 58: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Maximale positive Abweichung, Betriebsdaten Berlin



**Abbildung 59: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Maximale negative Abweichung, Betriebsdaten Berlin**

Für den automatischen Betrieb ist in Abbildung 60 zu erkennen, dass sich die Bereinigung der Trainingsdaten für den Mittelwert der Abweichung nicht negativ auswirkt. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Verspätungsverteilung im automatischen Betrieb symmetrischer ist als im konventionellen (siehe 6.3). Daher verschiebt sich durch die Bereinigung der Trainingsdaten die mittlere Fahrzeit weniger stark als im konventionellen Betrieb.

Für den Mittelwert des Betrages der Abweichung in Abbildung 61 und noch deutlicher für die Standardabweichung der Abweichung in Abbildung 62, die maximale positive Abweichung in Abbildung 63 und die maximale negative Abweichung in Abbildung 64 verschlechtert die Bereinigung die Simulationsergebnisse erheblich.

Für die Standardabweichung der Abweichung und die maximale positive Abweichung liefert die Simulation für RBF-Netze mit mehr als 15 Neuronen in der versteckten Schicht deutlich schlechtere Ergebnisse.

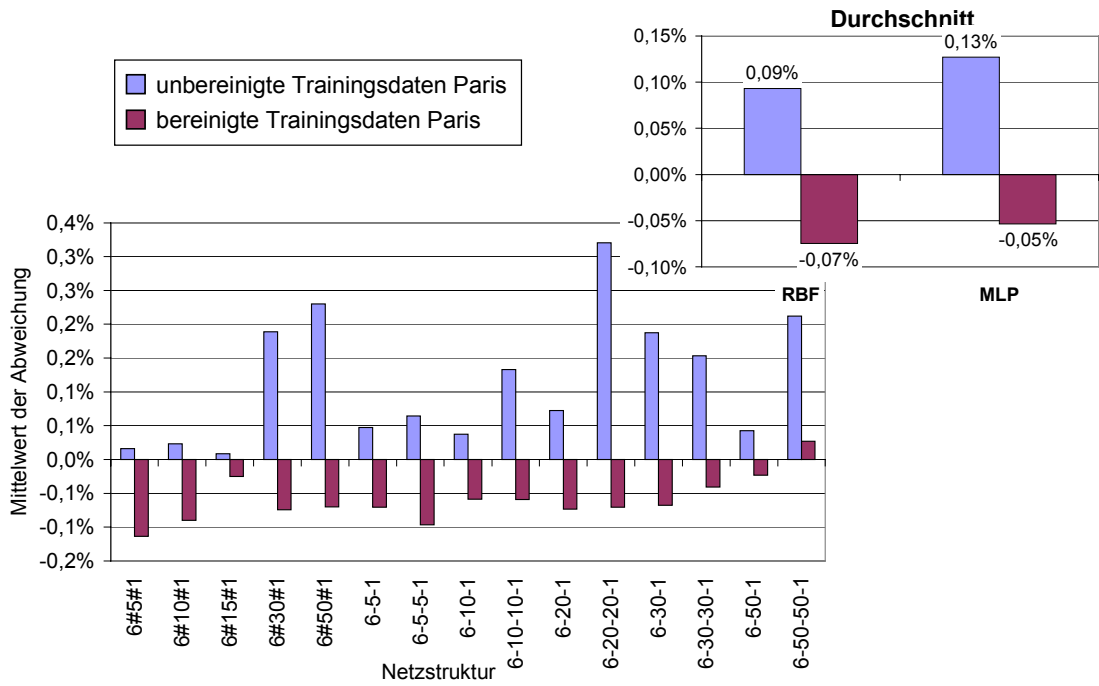


Abbildung 60: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Mittelwert der Abweichung, Betriebsdaten Paris

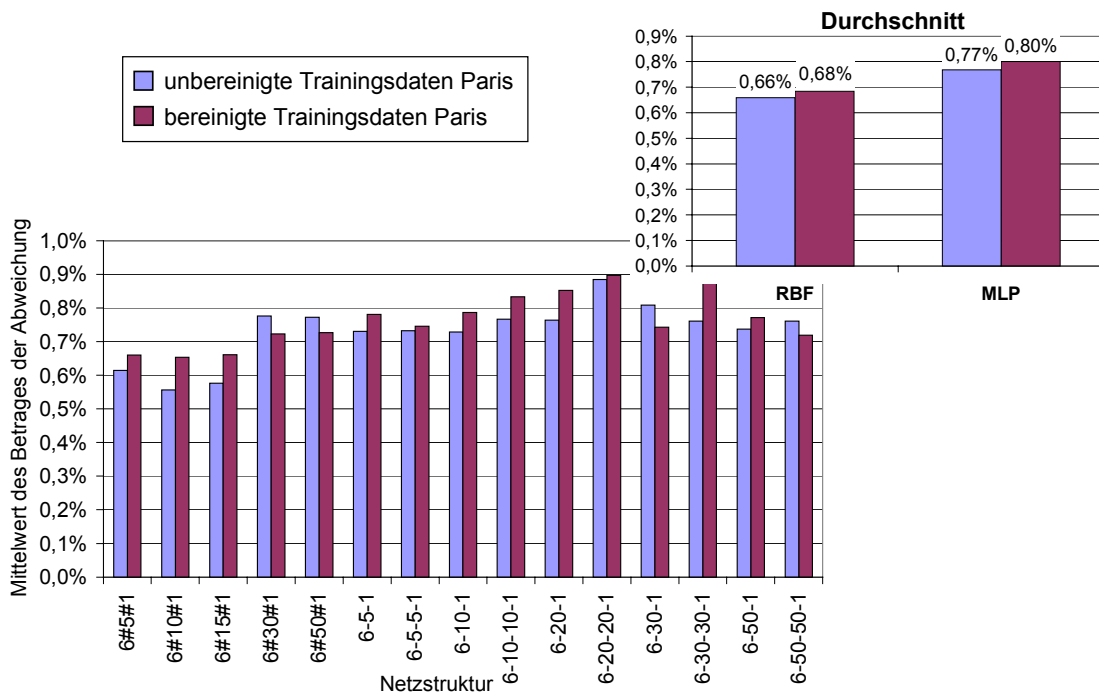


Abbildung 61: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Mittelwert des Betrages der Abweichung, Betriebsdaten Paris

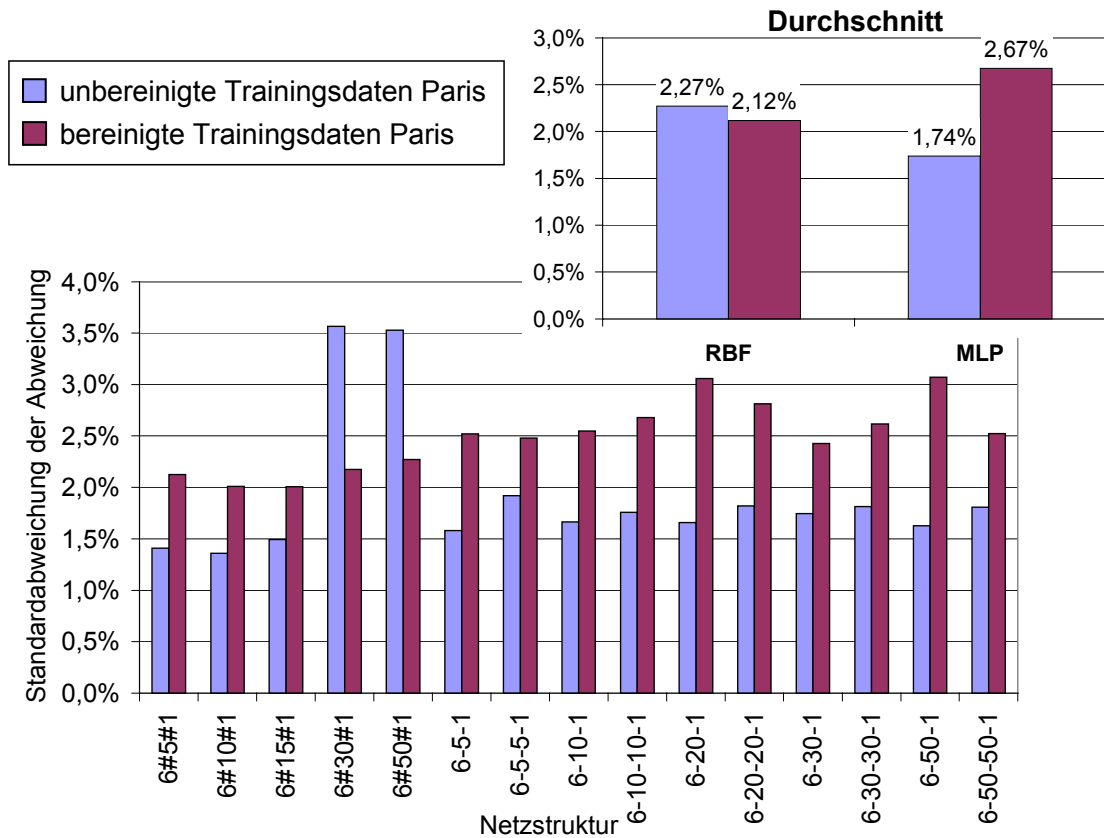


Abbildung 62: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Standardabweichung der Abweichung, Betriebsdaten Paris

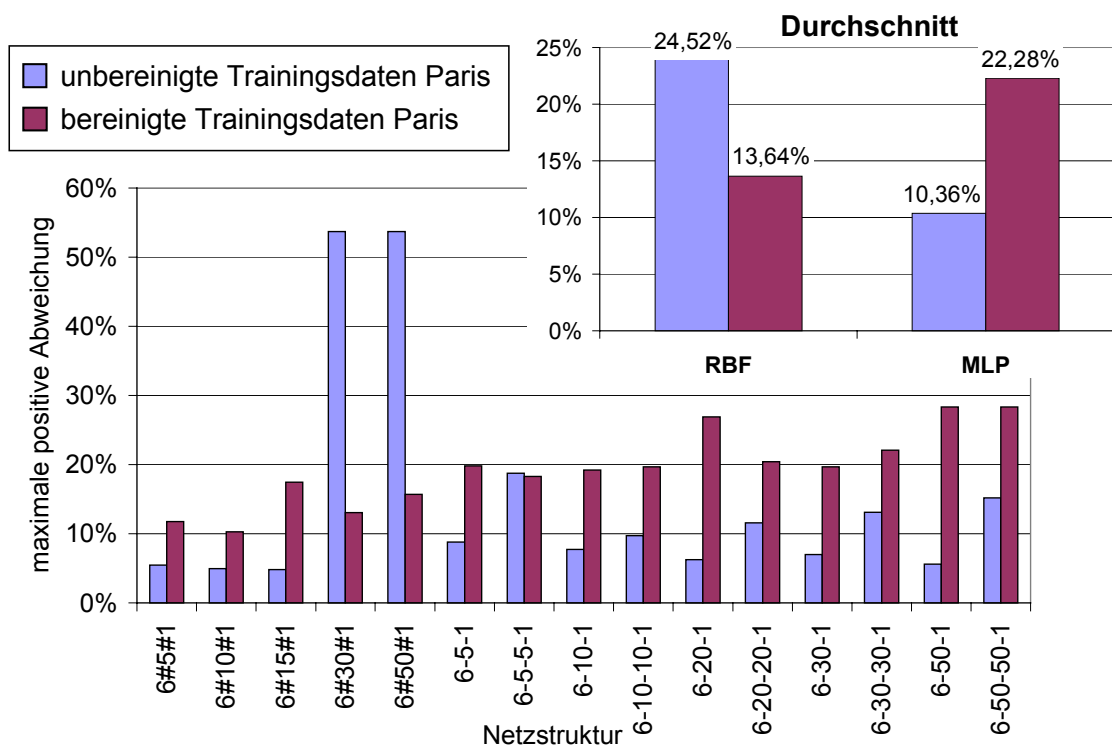
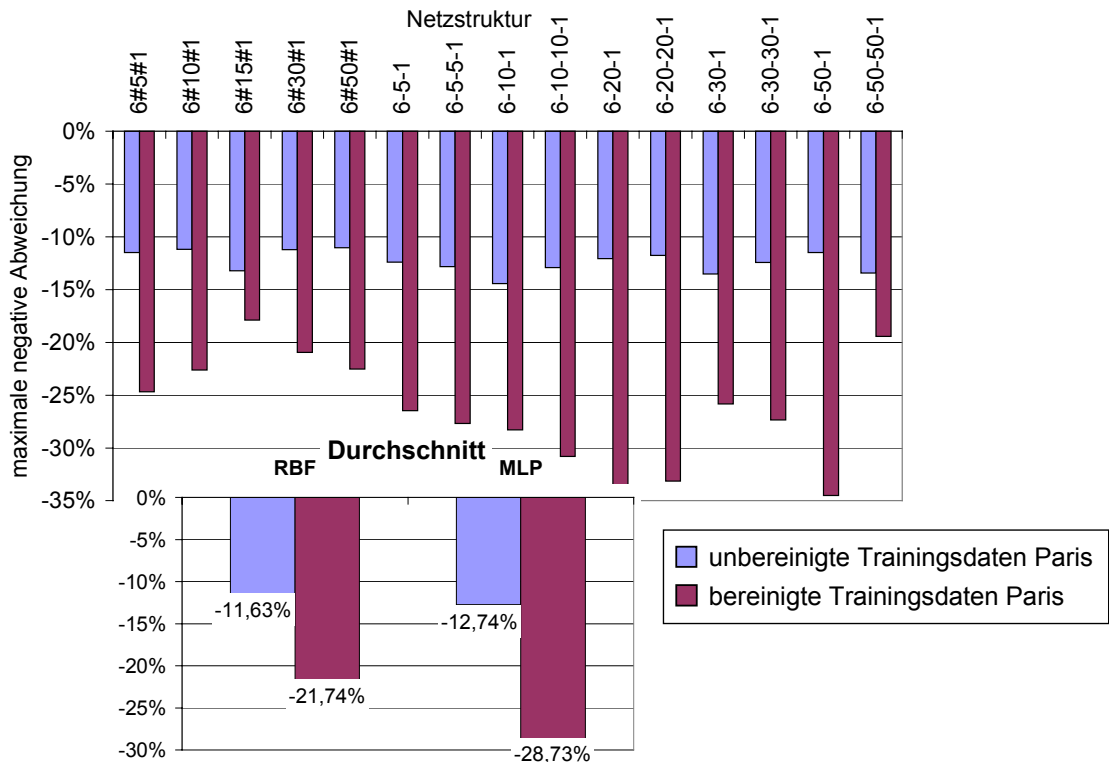
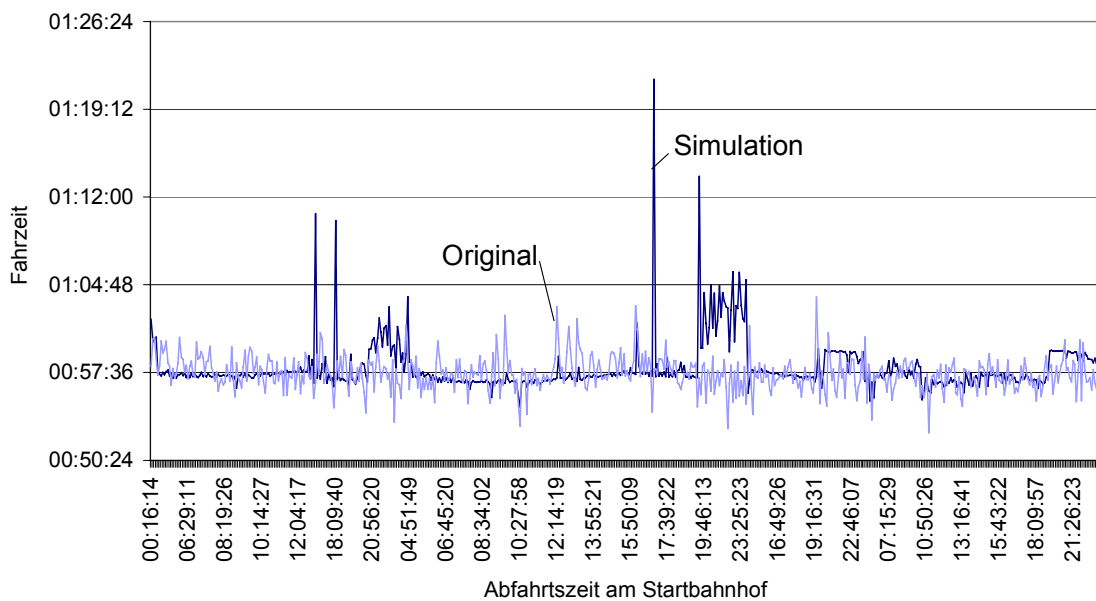


Abbildung 63: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Maximale positive Abweichung, Betriebsdaten Paris



**Abbildung 64: Einfluss von Netzstruktur und Bereinigung der Trainingsdaten, Maximale negative Abweichung, Betriebsdaten Paris**

Abbildung 65 zeigt eine typische Simulation mit einem RBF-Netz mit 30 Neuronen in der versteckten Schicht. Deutlich sind instabile Bereiche zu erkennen, in denen die Simulation stark vom Original abweicht.



**Abbildung 65: Beispiel einer Simulation mit einem 5#30#1-Netz (RBF)**

### **Fazit zum Einfluss der Netzstruktur**

Insgesamt gibt es sowohl für den konventionellen als auch für den automatischen Betrieb keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Netzstrukturen. Nur RBF-Netze mit mehr als 15 Neuronen in der versteckten Schicht liefern deutlich schlechtere Ergebnisse.

Daher werden RBF-Netze mit mehr als 15 versteckten Neuronen aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

### **Fazit zum Einfluss der Bereinigung der Trainingsdaten**

Die Bereinigung der Trainingsdaten bewirkt für den konventionellen und den automatischen Betrieb außer bei RBF-Netzen mit mehr als 15 versteckten Neuronen tendenziell schlechtere Simulationsergebnisse.

Daher wird in den weiteren Untersuchungen auf eine Bereinigung der Trainingsdaten verzichtet.

## **8.4.2 Einfluss der Eingangsparameter**

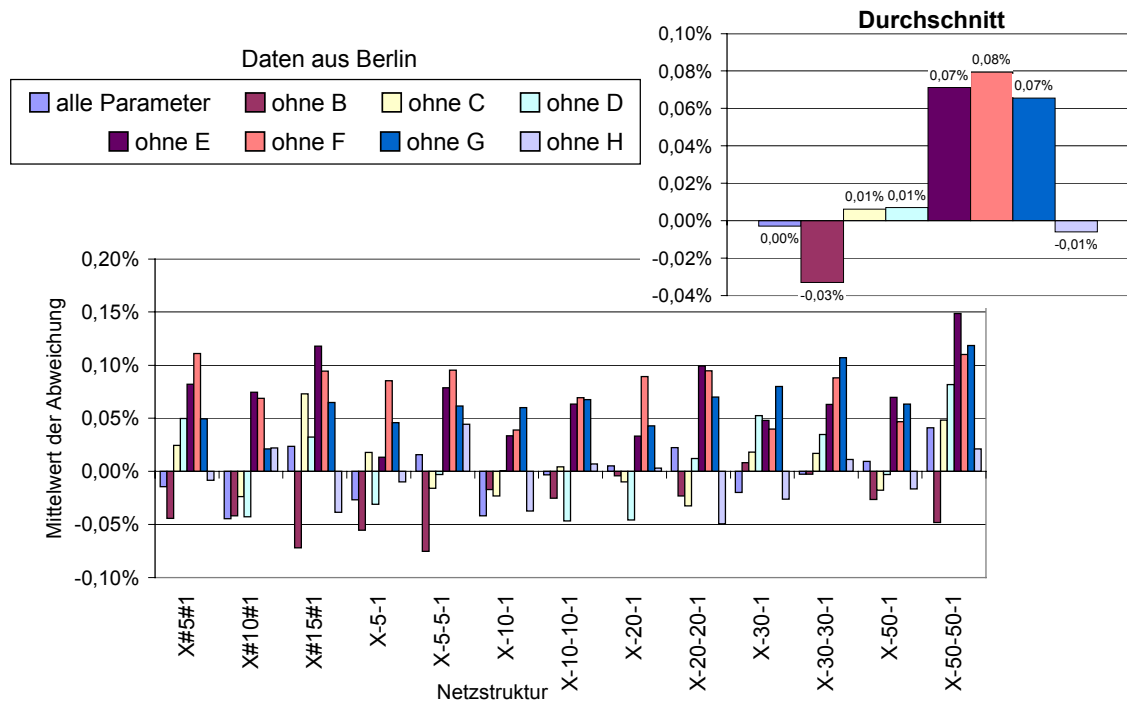
Zur Untersuchung des Einflusses der Eingangsparameter werden Simulationen mit Daten aus dem konventionellen und dem automatischen Betrieb durchgeführt. Die Simulationsreihen werden mit allen Eingangsparametern und mit Auslassung jeweils eines Eingangsparameters durchgeführt, so dass anschließend betrachtet werden kann, wie sich die Ergebnisse verändern.

Der Parameter A (Streckenabschnitt) spielt dabei eine besondere Rolle, da er nicht wie die anderen Parameter ausgelassen sondern nur variiert werden kann. Die Abhängigkeit zwischen der Fahrzeit-Abweichung und der Streckenlänge wird in 8.3.2.1 ausführlich erläutert.

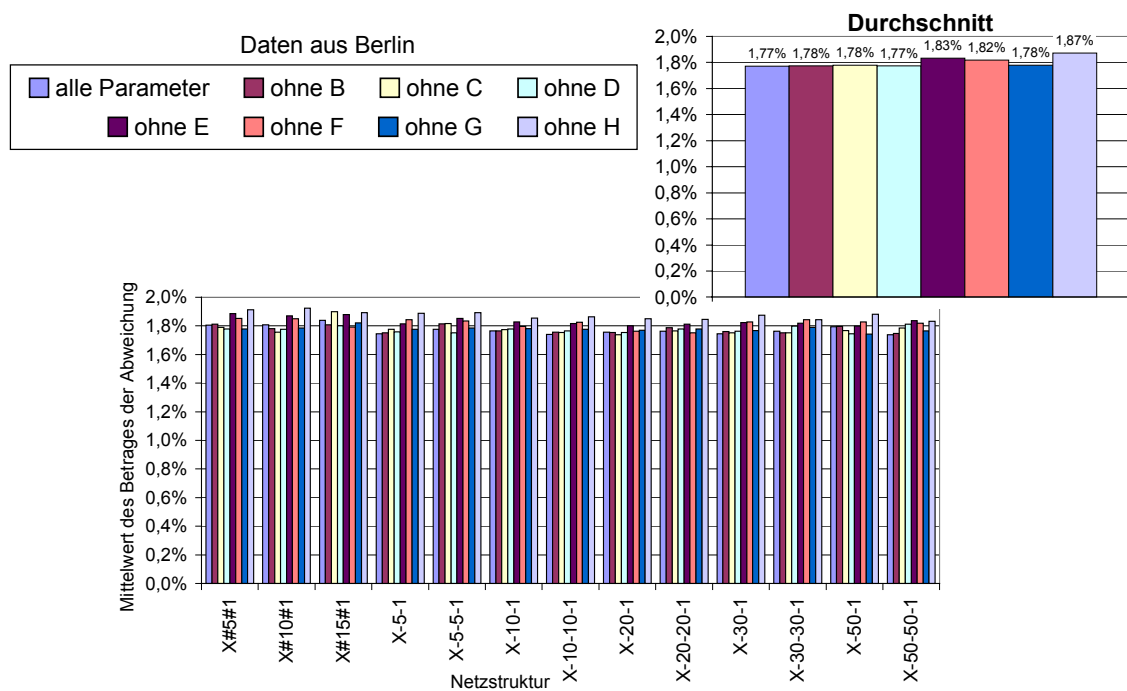
Die Bewertung des Einflusses der Eingangsparameter erfolgt anhand der fünf Bewertungsgrößen, die in den folgenden Abbildungen für den konventionellen und den automatischen Betrieb dargestellt sind.

In Abbildung 66 ist zu erkennen, dass sich im konventionellen Betrieb der Mittelwert der Abweichung bei Auslassung eines Parameters vom Betrag erhöht. Besonders stark wirken sich die Soll- und Ist-Zugfolgezeit (Parameter E und F) und die Soll-Fahrzeit (Parameter G) aus. Allerdings sind die Abweichungen sehr gering (im Durchschnitt unter 0,1 %), so dass auch bei Auslassung eines Parameters noch zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden.

Bei den Bewertungsgrößen Mittelwert des Betrages der Abweichung in Abbildung 67 und Standardabweichung der Abweichung in Abbildung 68 ist zu erkennen, dass die Fahrzeit des Vorgängerzuges (Parameter H) der einflussreichste Parameter ist. Den zweitstärksten Einfluss besitzen die Soll- und Ist-Zugfolgezeit (Parameter E und F). Diese beiden Parameter besitzen für die maximale positive Abweichung in Abbildung 69 den stärksten Einfluss. Bezüglich der maximalen negativen Abweichung in Abbildung 70 ist eine starke Streuung festzustellen; deutlich wird lediglich der starke Einfluss der Fahrzeit des Vorgängerzuges (Parameter H).

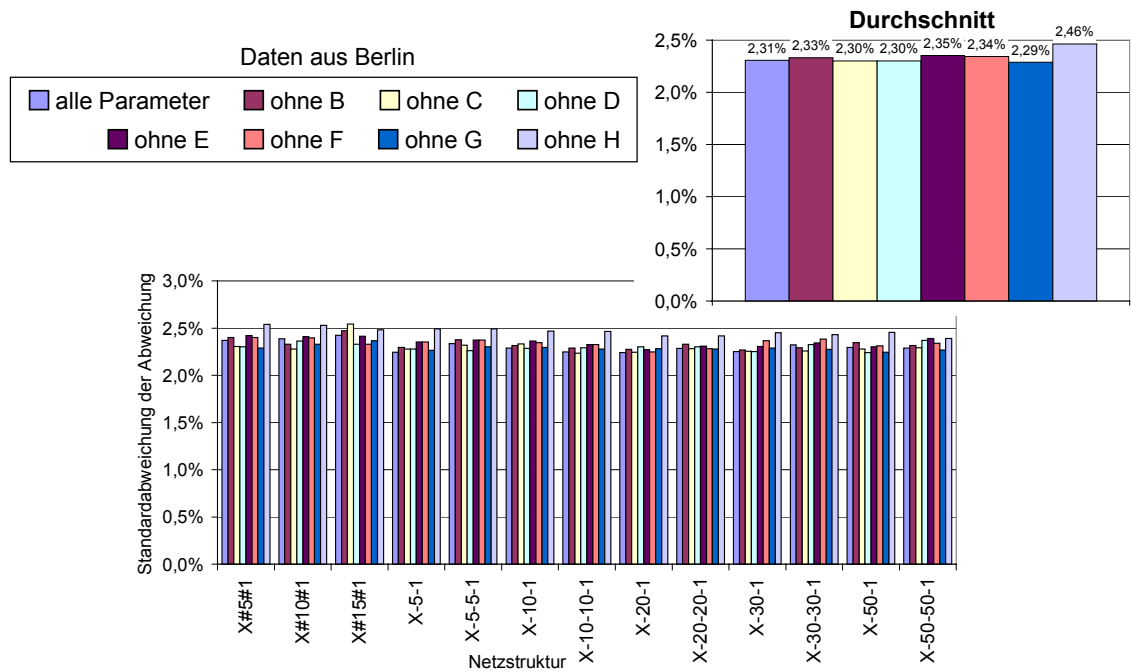


**Abbildung 66: Einfluss der Eingangsparameter, Mittelwert der Abweichung, Betriebsdaten Berlin**

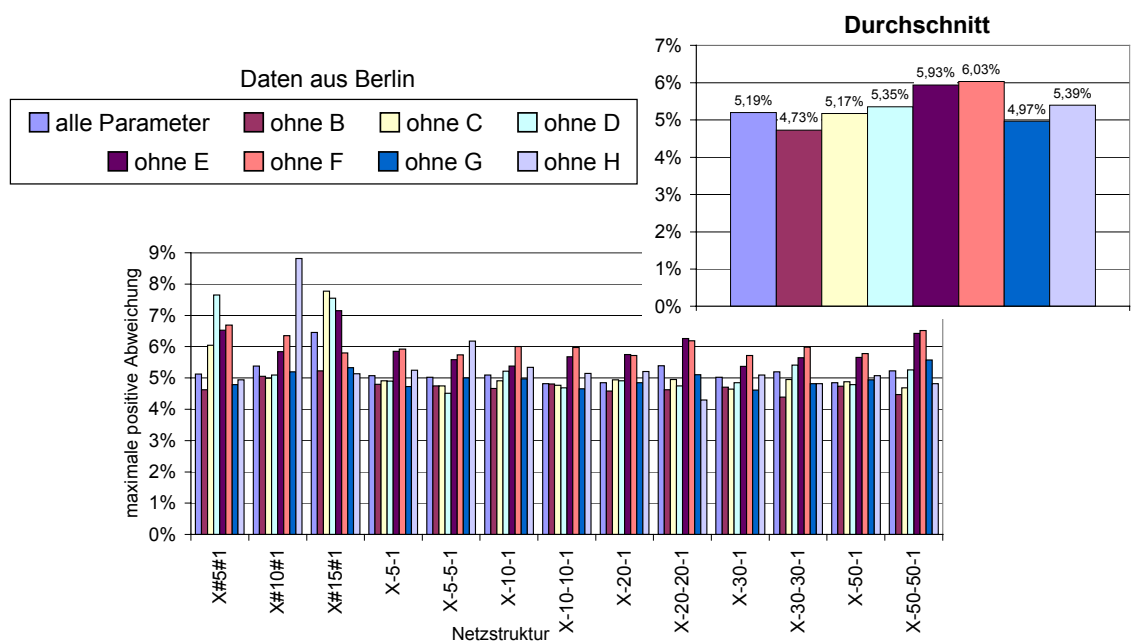


**Abbildung 67: Einfluss der Eingangsparameter, Mittelwert des Betrages der Abweichung, Betriebsdaten Berlin**

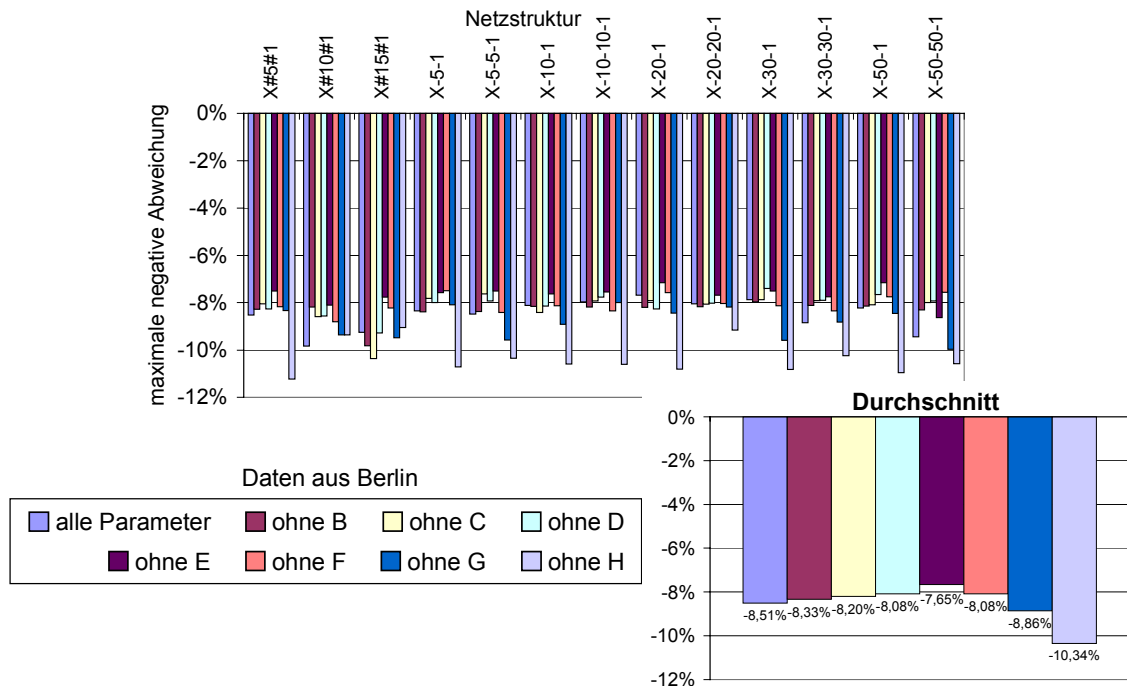




**Abbildung 68: Einfluss der Eingangsparameter, Standardabweichung der Abweichung, Betriebsdaten Berlin**



**Abbildung 69: Einfluss der Eingangsparameter, Maximale positive Abweichung, Betriebsdaten Berlin**



**Abbildung 70: Einfluss der Eingangsparameter, Maximale negative Abweichung, Betriebsdaten Berlin**

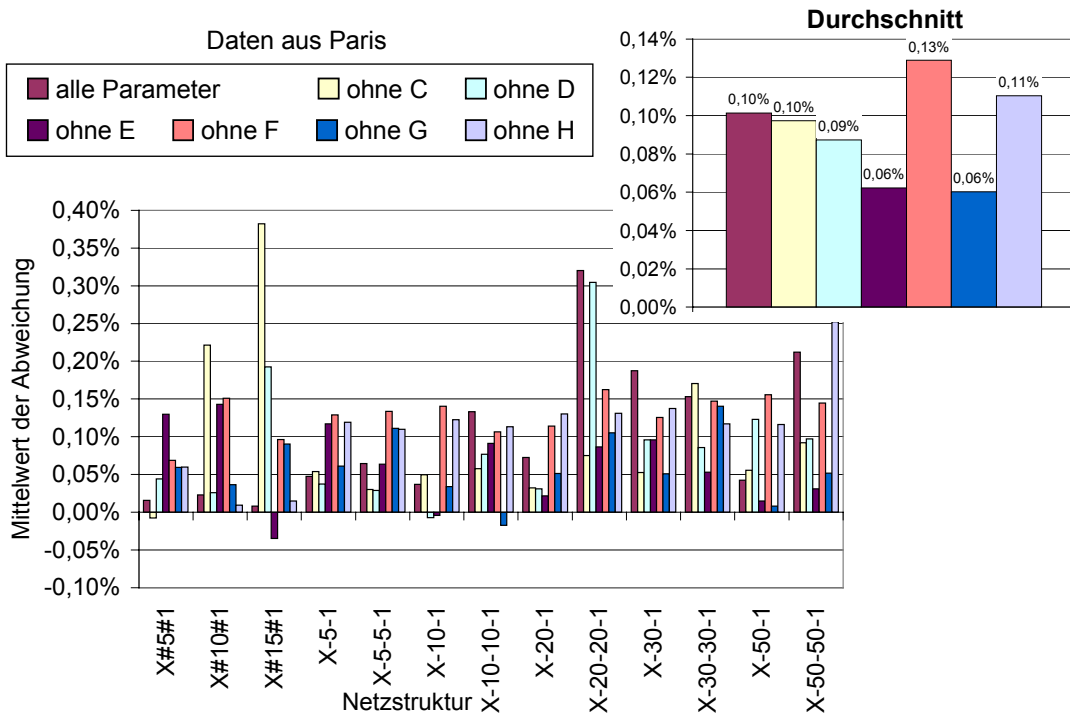
Für die Simulation des automatischen Betriebes gibt es bezüglich des Eingangsparameters Tag (Parameter B) keine Aussage, weil sich die verfügbaren Betriebsdaten nur auf eine Woche beziehen. Da somit für jeden Tag nur eine Messreihe vorhanden ist, existiert keine hinreichende Basis von Trainingsdaten, um das Verhalten bezüglich des Tages zu untersuchen.

Im automatischen Betrieb ist für die mittlere Abweichung in Abbildung 71 eine starke Streuung festzustellen, die keine klare Tendenz erkennen lässt. Das Auslassen von Parametern führt teilweise sogar zu leicht besseren Werten.

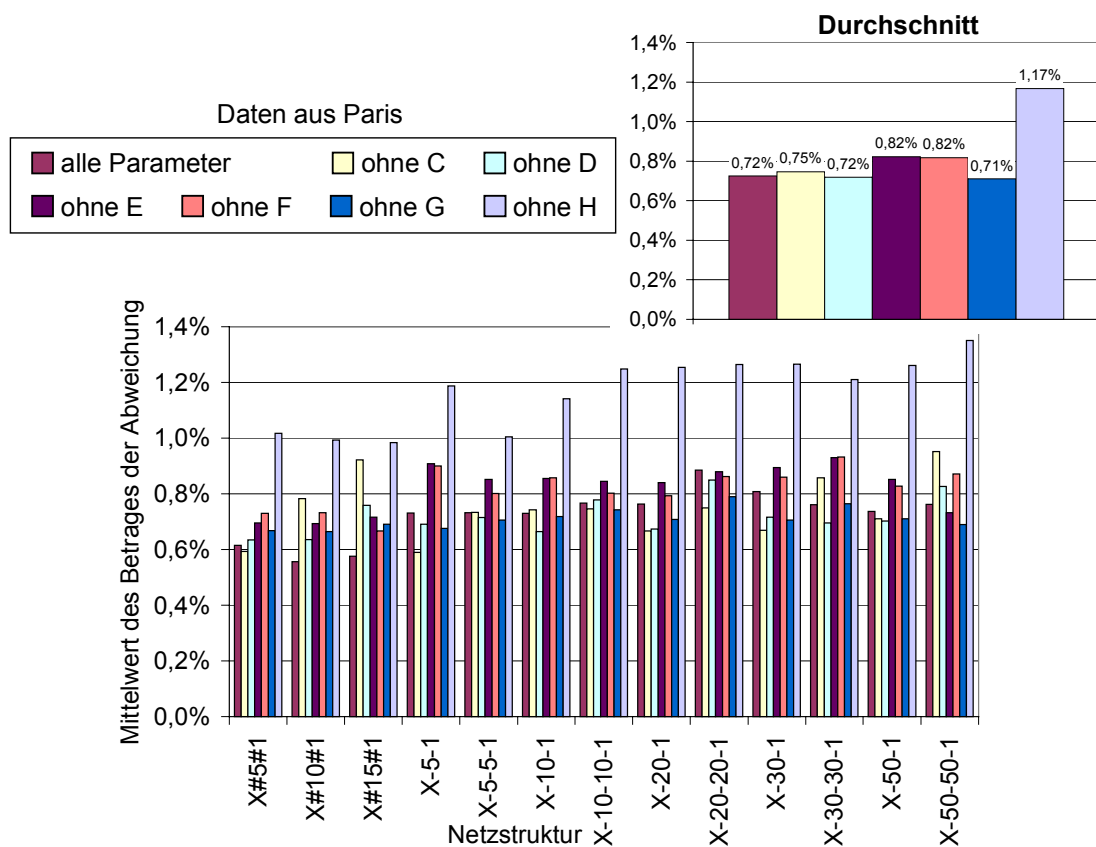
Für den Mittelwert des Betrages der Abweichung in Abbildung 72 zeichnet sich ein ähnliches Bild wie im konventionellen Betrieb ab. Die Fahrzeit des Vorgängerzuges (Parameter H) besitzt den stärksten Einfluss und die Soll- und die Ist-Zugfolgezeit (Parameter E und F) besitzen den zweitstärksten Einfluss. Genau die gleiche Tendenz ist für die Standardabweichung der Abweichung in Abbildung 73 erkennbar. Allerdings treten hier bei RBF-Netzen mit mehr als fünf Neuronen in der versteckten Schicht Instabilitäten auf, die sich auf die dargestellten Durchschnittswerte negativ auswirken.

Für die maximale positive Abweichung in Abbildung 74 ist keine klare Tendenz für die unterschiedlichen Parameter zu erkennen. Deutlich sind jedoch Instabilitäten bei den RBF-Netzen mit mehr als fünf Neuronen in der versteckten Schicht.

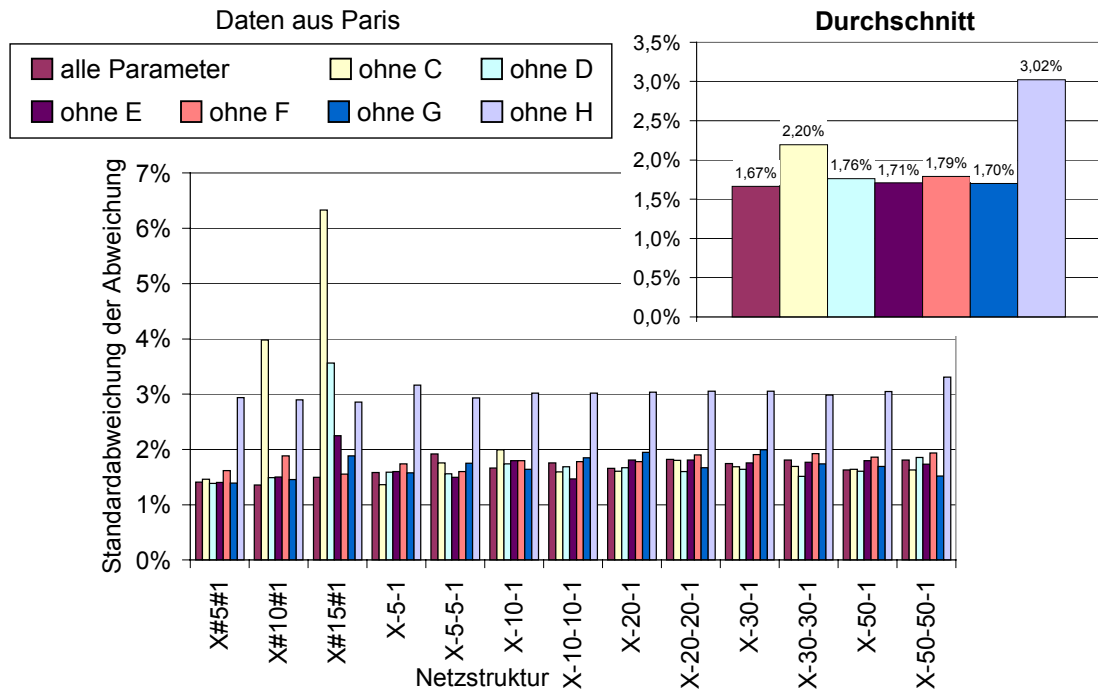
Für die maximale negative Abweichung in Abbildung 75 lässt sich die Dominanz des Einflusses der Fahrzeit des Vorgängerzuges (Parameter H) erkennen. Für die übrigen Eingangsparameter ergibt sich keine klare Tendenz. Auffällig ist die Instabilität des RBF-Netzes mit 15 Neuronen in der versteckten Schicht.



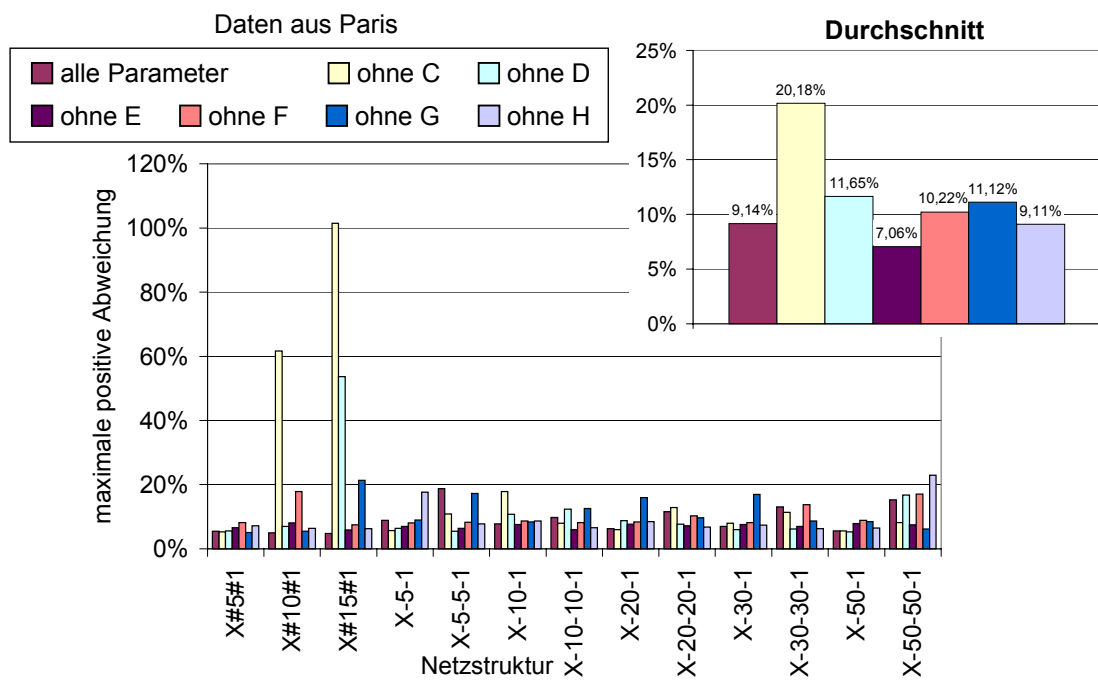
**Abbildung 71: Einfluss der Eingangsparameter, Mittelwert der Abweichung, Betriebsdaten Paris**



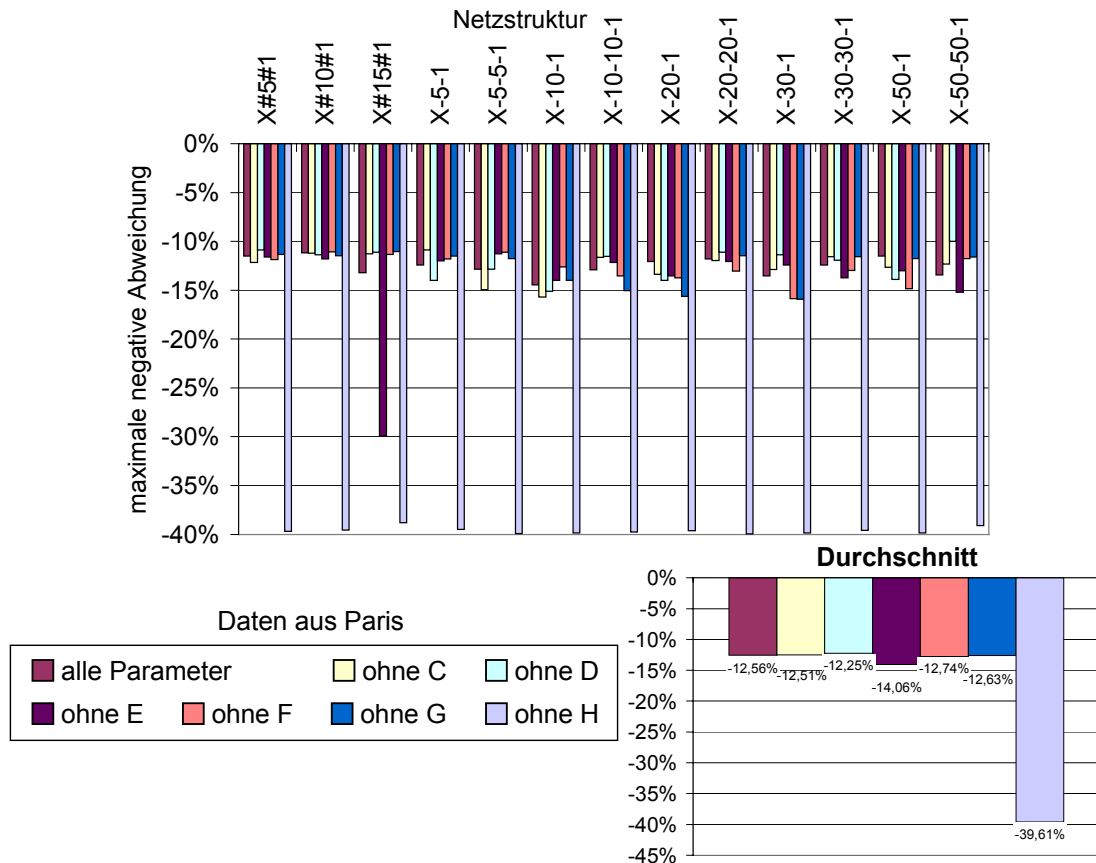
**Abbildung 72: Einfluss der Eingangsparameter, Mittelwert des Betrages der Abweichung, Betriebsdaten Paris**



**Abbildung 73: Einfluss der Eingangsparameter, Standardabweichung der Abweichung, Betriebsdaten Paris**



**Abbildung 74: Einfluss der Eingangsparameter, Maximale positive Abweichung, Betriebsdaten Paris**



**Abbildung 75: Einfluss der Eingangsparameter, Maximale negative Abweichung, Betriebsdaten Paris**

**Fazit zum Einfluss der Eingangsparameter**

Bei der Gesamtbeurteilung ist die unterschiedliche Aussagekraft der fünf Bewertungsgrößen zu berücksichtigen (siehe Seite 85).

Sowohl für den konventionellen als auch für den automatischen Betrieb besitzt die Fahrzeit des Vorgängerzuges (Parameter H) den stärksten Einfluss. Den zweitstärksten Einfluss besitzen die Soll- und die Ist-Zugfolgezeit (Parameter E und F). Der Einfluss der übrigen Parameter ist von untergeordneter Bedeutung.

Das Auslassen von Parametern verschlechtert insbesondere die Simulationsergebnisse der RBF-Netze, die dadurch teilweise Instabilitäten bekommen.

Für die weiteren Untersuchungen wird der Parameter H auf Grund seiner Relevanz separat berücksichtigt.

## 8.5 Bewertung der Eignung zur Simulation des U-Bahnbetriebs

Zur Bewertung der Eignung Neuronaler Netze zur Simulation des U-Bahnbetriebs werden die Simulationsergebnisse verglichen mit Größen, die ohne die Benutzung Neuronaler Netze aus den Trainingsdaten und den Eingangsparametern gewonnen werden können.

Anstatt einer Berechnung der Fahrzeit mittels Simulation durch Neuronale Netze werden zur Prognose der Fahrzeit die folgenden Größen herangezogen:

- die Fahrzeit des Vorgängerzuges,
- die mittlere Fahrzeit der Zugfahrten der Trainingsdatensätze und
- die Soll-Fahrzeit.

Für jede dieser Größen wird die Abweichung von der Fahrzeit gebildet. Auf Grund der in 8.4.2 festgestellten Relevanz des Parameters  $H$ , werden für die Simulation auch stets die ohne den Parameter  $H$  erzielten Ergebnisse mit berücksichtigt.

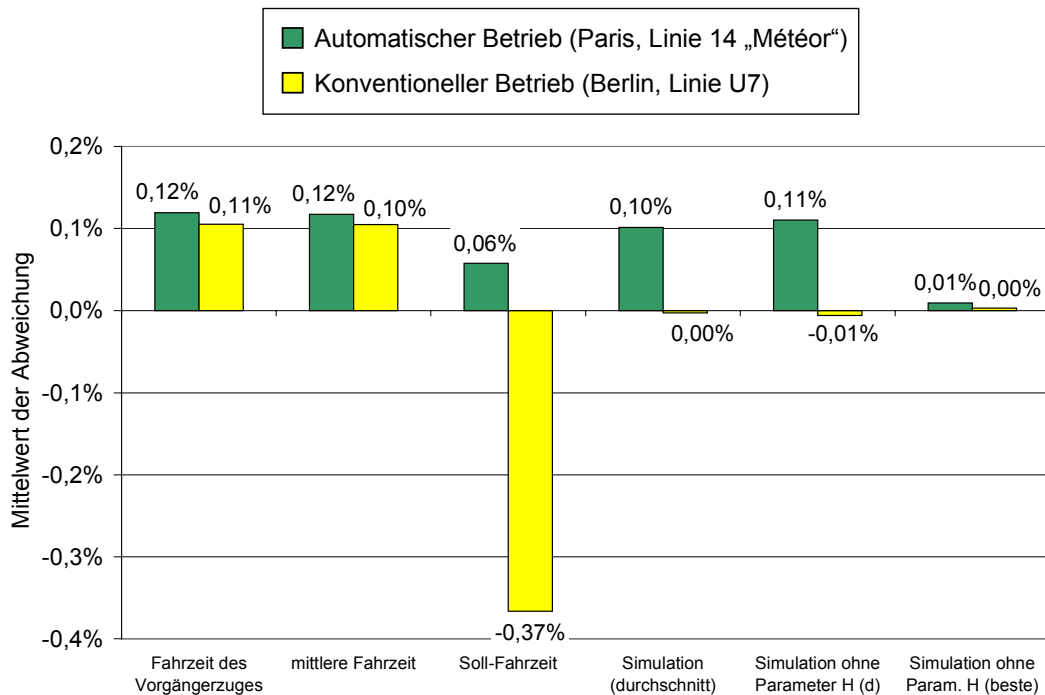
Die Bewertung erfolgt anhand der fünf Bewertungsgrößen, die in den folgenden Abbildungen dargestellt sind.

Die Ergebnisse für den automatischen und den konventionellen Betrieb werden jeweils als Säulenpaar dargestellt. Die ersten drei Säulenpaare repräsentieren die Abweichungen, die aus Fahrzeit-Prognosewerten resultieren, die nur mit Hilfe der Betriebsdaten ohne Neuronale Netze berechnet wurden. Die letzten drei Säulenpaare repräsentieren die Abweichungen, die sich aus der Simulation mit Neuronalen Netzen ergeben. Dabei sind angegeben

- der Durchschnitt aller 13 Simulationsreihen mit allen Eingangsparametern,
- der Durchschnitt aller 13 Simulationsreihen mit Auslassung des Parameters  $H$ ,
- die vom Ergebnis beste Simulationsreihe mit Auslassung des Parameters  $H$ .

Beim Mittelwert der Abweichung in Abbildung 76 lässt sich mit Hilfe der ersten beiden Säulenpaare keine relevante Aussage über den Betriebsablauf machen, da sie nur von der zufälligen Auswahl der Testdaten aus der Gesamtmenge der Zugfahrten abhängen.

Dies gilt sowohl für den Mittelwert der Abweichung der Fahrzeit des Vorgängerzuges von der Fahrzeit des jeweils betrachteten Zuges (erstes Säulenpaar) als auch für den Mittelwert der Abweichung der mittleren Fahrzeit der Zugfahrten der Trainingsdaten von der Fahrzeit des jeweils betrachteten Zuges (zweites Säulenpaar). Letztere stellt lediglich das Verhältnis des Mittelwertes der Fahrzeiten der Zugfahrten der Trainingsdaten zum Mittelwert der Fahrzeiten der Zugfahrten der Testdaten dar.



**Abbildung 76: Bewertung der Eignung zur Simulation des U-Bahnbetriebs, Mittelwert der Abweichung**

Das zweite Säulenpaar kann folglich als Indikator für die Zufälligkeit der Auswahl der Testdaten aus der Gesamtmenge der Prozessdaten dienen. Bei einer mittleren Abweichung von 0 % besitzen die Fahrzeiten der Zugfahrten der Trainings- und der Testdaten exakt den gleichen Mittelwert. Die für die untersuchten Simulationsreihen erfolgte Auswahl der Testdaten kann sowohl für den konventionellen Betrieb in Berlin (0,10 %) als auch für den automatischen Betrieb in Paris (0,12 %) als hinreichend zufällig betrachtet werden.

Die mittlere Abweichung von der Soll-Fahrzeit (drittes Säulenpaar) zeigt, dass für die betrachteten Testdaten die Soll-Fahrzeit in Berlin im Durchschnitt um 0,37 % zu gering bemessen ist und in Paris um 0,06 % zu hoch.

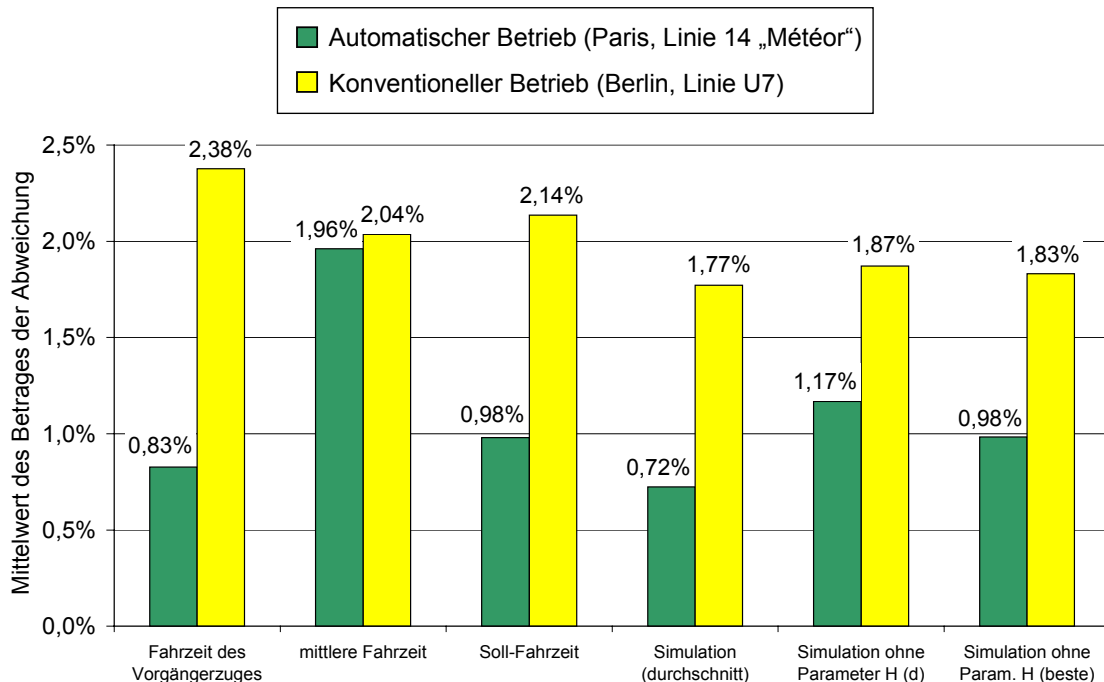
Die durch die Simulation mit Neuronalen Netzen berechneten Fahrzeiten liegen für Berlin im Durchschnitt nur um 0,0028 % zu niedrig. Selbst, wenn bei der Simulation der Parameter H ausgelassen wird, liegen die berechneten Fahrzeiten im Durchschnitt nur um 0,0060 % zu niedrig.

Die Simulationen für Paris besitzen zwar prozentual etwas höhere Abweichungen, es ist jedoch die unterschiedliche Linienlänge zu beachten. So beträgt eine Abweichung von 0,1 % für die Berliner Linie U7 3,45 s, während der gleiche prozentuale Wert für die Pariser Linie 14 nur 0,61 s bedeutet. Insgesamt heißt das, dass es sich hier um Simulationsfehler von im Durchschnitt unterhalb einer Sekunde handelt.

Für den Mittelwert des Betrages der Abweichung in Abbildung 77 ergeben sich insgesamt höhere Werte. Die mittlere Abweichung von der Fahrzeit des Vorgängerzuges (erstes Säulenpaar) ist in Berlin (2,38 %) deutlich höher als in Paris (0,83 %). Die größere Differenz der Fahrzeit zweier aufeinander folgenden Züge in Berlin macht deutlich, dass sich das Phänomen der Aufschaukelung (siehe 6.2) im konventionellen Betrieb wesentlich stärker bemerkbar macht als im automatischen. Dies liegt einerseits am individuellen Abfertigungs- und Fahrverhalten der Zugfahrer, das deutlich leichter Aufschaukelungen von Verspätungen und Zugpaarbildungen entstehen lässt als ein automatisch geführtes System. Andererseits ist es durch eine automatische Zugfolge-regelung im automatischen Betrieb wesentlich einfacher, dieses unerwünschte Verhalten zu unterbinden (siehe 7.2.3).

Die Verspätung eines Zuges entspricht der Abweichung von der Soll-Fahrzeit. Der Mittelwert des Betrages der Verspätung (drittes Säulenpaar) liegt für die Pariser Linie 14 (0,98 %) deutlich unter dem der Berliner Linie U7 (2,14 %). Dies kann ebenfalls auf den automatischen Betrieb zurückgeführt werden, in dem der Fahrplan sekundengenau durch einen Computer umgesetzt wird.

Sowohl für den konventionellen als auch für den automatischen Betrieb sind die Abweichungen des Durchschnitts der mit allen Eingangsparametern durchgeführten 13 Simulationsreihen geringer als die Abweichungen der Soll-Fahrzeit von der realen Fahrzeit. Eine Verbesserung des Fahrplans durch Neuronale Netze ist also möglich, wobei das Potenzial in Berlin größer ist als in Paris, da der Pariser Fahrplan bereits besser dem realen Betrieb entspricht.

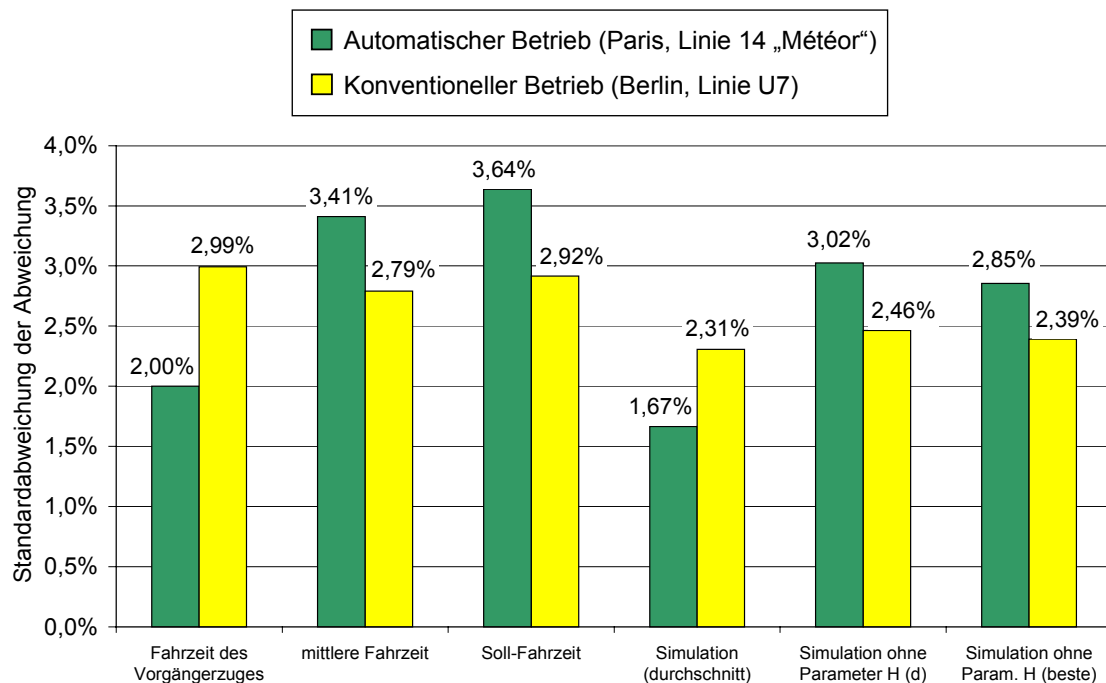


**Abbildung 77: Bewertung der Eignung zur Simulation des U-Bahnbetriebs, Mittelwert des Betrages der Abweichung**



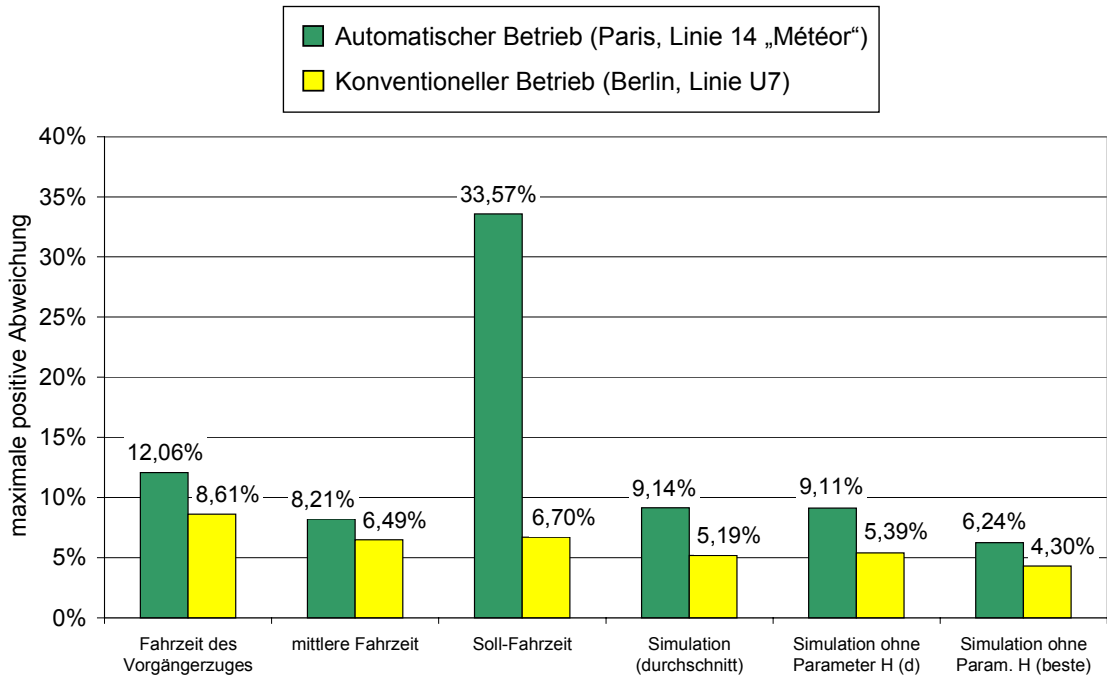
Für die Standardabweichung der Abweichung in Abbildung 78 ergeben sich in Paris bezüglich der Soll-Fahrzeit (drittes Säulenpaar) schlechtere Werte als in Berlin. Durch eine detaillierte Analyse der einzelnen in den Testdaten enthaltenen Zugfahrten lässt sich jedoch feststellen, dass diese Abweichungen wesentlich durch eine einzelne um vier Minuten und acht Sekunden verspätete Zugfahrt verursacht werden. Es ist davon auszugehen, dass es sich hier um eine durch externe Einflüsse (siehe 4.3) verursachte Betriebsstörung handelt, die nicht vorhersehbar ist. Ohne diese Zugfahrt würde die Standardabweichung der Abweichung der Soll-Fahrzeit für Paris anstatt 3,64 % nur 2,67 % betragen und läge damit unter dem Wert für Berlin.

Interessant ist jedoch, dass trotz dieser Störung durch die Simulation eine größere Verbesserung für Paris (um 1,97 %) als für Berlin (um 0,61 %) erzielt wird (Differenz zwischen dem dritten und vierten Säulenpaar). Sogar bei Auslassung des Parameters H ergibt sich eine Verbesserung durch die Simulation.

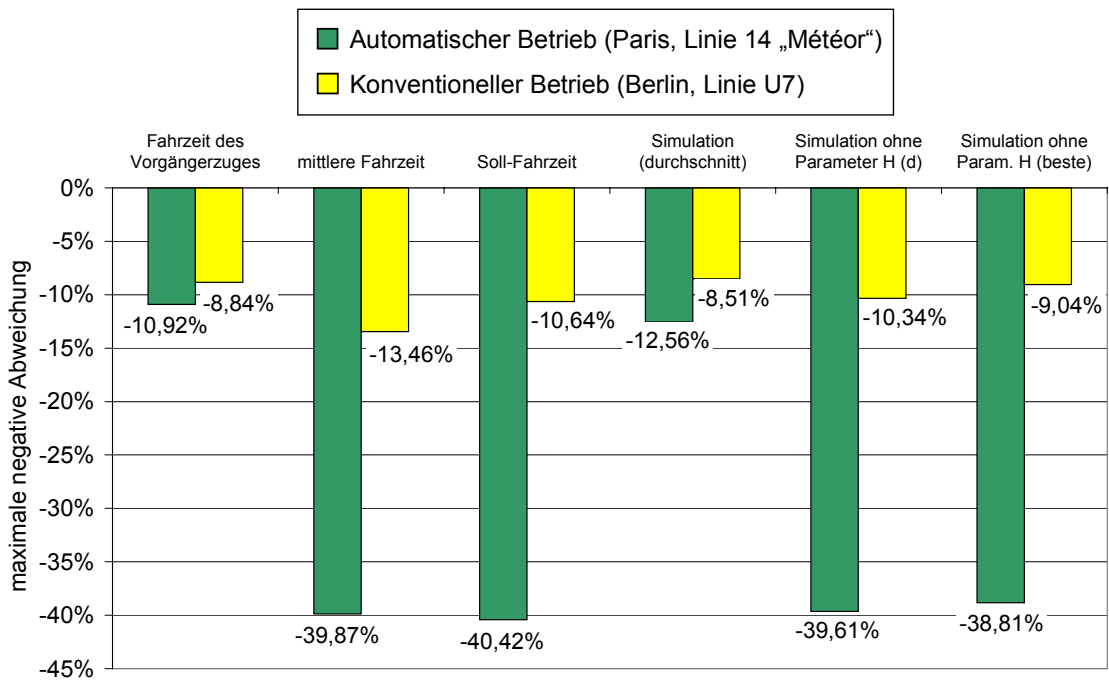


**Abbildung 78: Bewertung der Eignung zur Simulation des U-Bahnbetriebs, Standardabweichung der Abweichung**

Die maximale positive und die maximale negative Abweichung in Abbildung 79 und Abbildung 80 besitzen eine geringere Aussagekraft als die vorhergehenden Bewertungsgrößen, da sie sich nur auf die jeweils am schlechtesten prognostizierte Zugfahrt beziehen (vergleiche Seite 85). Dennoch ist festzustellen, dass verglichen mit der dem Fahrplan entstammenden Soll-Fahrzeit durch die Simulation erhebliche Verbesserungen erzielt werden können.



**Abbildung 79: Bewertung der Eignung zur Simulation des U-Bahnbetriebs, Maximale positive Abweichung**



**Abbildung 80: Bewertung der Eignung zur Simulation des U-Bahnbetriebs, Maximale negative Abweichung**

### **Fazit zur Eignung Neuronaler Netze zur Simulation des U-Bahnbetriebs**

Durch eine Betriebssimulation mittels Neuronaler Netze können die Fahrzeiten sowohl im automatischen als auch im konventionellen Betrieb deutlich zuverlässiger berechnet werden als mit den bisher vorhandenen Mitteln.

Dadurch, dass die Abweichungen vom Fahrplan im konventionellen Betrieb größer sind als im automatischen, ist das Verbesserungspotenzial bei ersterem ebenfalls größer.

## 9 Umsetzung auf ein konkretes U-Bahnsystem

Eine detaillierte Darstellung aller Umsetzungsmöglichkeiten der in Kapitel 7 entwickelten Entstörungsstrategien für ein konkretes U-Bahnsystem würde den Rahmen dieser Ausarbeitung sprengen. Ziel dieses Kapitels ist es daher, beispielhaft aufzuzeigen, wie die in 7.2.3 entwickelte und in Kapitel 8 detailliert untersuchte Entstörungsstrategie mit Benutzung Neuronaler Netze auf ein konkretes U-Bahnsystem umgesetzt werden könnte.

Betrachtet wird das Berliner U-Bahnsystem, da es, wie in 8.5 gezeigt, günstige Voraussetzungen für eine Betriebsoptimierung mit der untersuchten Entstörungsstrategie besitzt. Die meisten Berliner U-Bahnlinien sind bereits mit einer automatischen Betriebsdatenerfassung ausgerüstet und es ist vorgesehen, sukzessive die entsprechende Technik auf alle Linien auszuweiten. Die Entstörungsstrategie könnte also in naher Zukunft systemübergreifend angewendet werden.

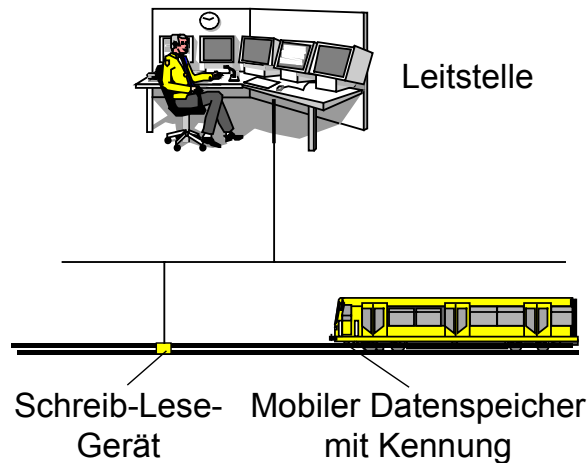
### 9.1 Automatische Betriebsdatenerfassung

Die automatische Betriebsdatenerfassung erfolgt bei der Berliner U-Bahn durch das Leit-, Informations- und Sicherungssystem LISI, das bereits für die meisten U-Bahnlinien eingeführt ist. LISI steht für ein Bündel von Automatisierungsmaßnahmen in den Bereichen Betriebsleittechnik, Zugsicherungstechnik und Fahrgastinformation und -service. Der für die betrachtete Entstörungsstrategie relevante Bestandteil des LISI sind die ATS-Funktionen Zugidentifikation und Zuglaufüberwachung.

An allen betriebsrelevanten Orten einer mit LISI ausgerüsteten U-Bahnlinie (in der Regel bei Gleisverzweigungen, Aufstellgleisen und Bahnhofsein- und -ausfahrten) befinden sich im Gleis zwischen den Schienen Schreib-Lese-Geräte (Typ MOBY-V). Diese sind über Datenkonzentratoren, die die Informationen mehrerer Schreib-Lese-Geräte zusammenfassen, und ein Feldbussystem mit der zentralen Leitstelle verbunden (siehe Abbildung 81). Dort befinden sich für jede Linie ein zentraler Server sowie Bedienplatzrechner mit Mensch-Maschine-Schnittstellen.

Jeder Zug besitzt einen mobilen Datenspeicher, der bei der Überfahrt über ein Schreib-Lese-Gerät die Kennung des Zuges übermittelt. Ein entsprechendes Telegramm wird an den zentralen Server in der Leitstelle übertragen. Dieser vergleicht die Information mit dem aktuellen Fahrplan und erzeugt einen Datensatz in einer ORACLE Datenbank. Die Datensätze enthalten folgende Parameter:

- Datum,
- Zeitpunkt der Erfassung,
- Zugnummer,
- Bahnhof,
- Ankunft oder Abfahrt,
- Soll-Zeitpunkt gemäß Fahrplan,
- Verspätung und
- Verspätungsklasse.



**Abbildung 81: Hardwarestruktur der Zugidentifikation und Zuglaufüberwachung**

Alle Zeiten werden durch das System sekundengenau erfasst. Die Verspätungsklasse (VK) dient der Kategorisierung der Verspätung. Sie ist wie folgt definiert:

- VK1:  $-\infty$  bis -1 Sekunden,
- VK2: 0 bis 60 Sekunden,
- VK3: 61 bis 180 Sekunden,
- VK4: 181 bis  $\infty$  Sekunden.

Die Datensätze werden in sogenannten Wochenarchiven gespeichert.

Auf diese Weise werden für jeden Zug auf jedem Bahnhof Ankunfts- und Abfahrtsverspätung erfasst. Diese Daten stellen ein detailliertes Prozessabbild des Betriebs dar.

## 9.2 Durchführung der Simulation

Die Betriebssimulation mit Neuronalen Netzen kann auf einem Personal Computer durchgeführt werden, der über ein Computernetzwerk mit dem zentralen LISI-Server verbunden ist.

Als erster Schritt ist die Strecke zu definieren, für die Fahrzeiten prognostiziert werden sollen. Es kann sich dabei um eine beliebige Teilstrecke der U-Bahnlinie handeln. Anschließend müssen die Datensätze über das Netzwerk eingelesen werden, die notwendig sind, um alle auf der betrachteten Teilstrecke durchgeführten Zugfahrten zu analysieren. Für jede Zugfahrt können die in Abbildung 44 definierten Ein- und Ausgangsparameter ermittelt werden. Die somit erstellten Basisdaten werden für das Training des Neuronalen Netzes benutzt. Vor dem Training sollten einige Testdaten aus den Basisdaten entnommen werden, mit deren Hilfe später die Simulationsgüte des trainierten Netzes ermittelt werden kann.

Die Simulation sollte in jedem Fall für mehrere Neuronale Netzstrukturen durchgeführt werden, da die jeweiligen Trainingsergebnisse sehr unterschiedlich ausfallen können (siehe 8.4). Anschließend kann mit Hilfe der Testdaten, das Neuronale Netz ermittelt werden, welches die Fahrzeiten am besten prognostiziert.

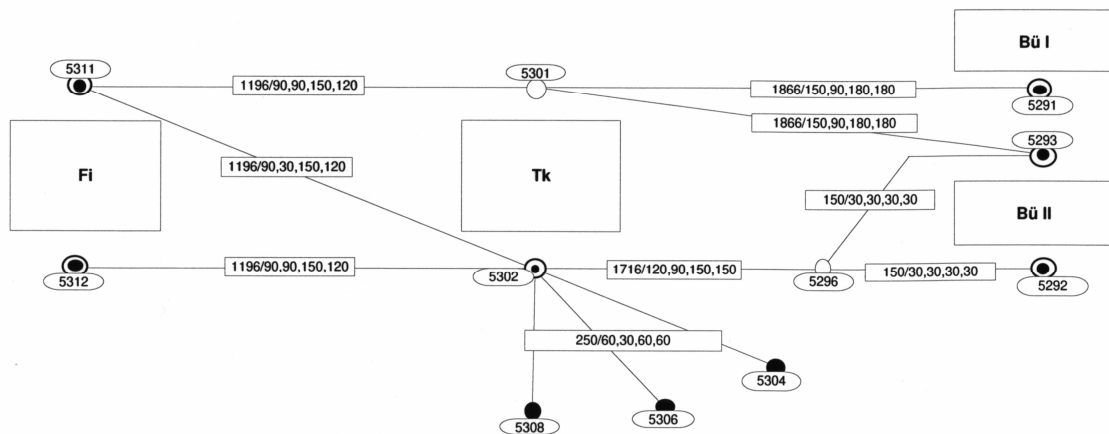
### 9.3 Modifikation des Fahrplans

Bei der Berliner U-Bahn wird das Fahrplanverwaltungssystem BERTA eingesetzt. Dieses verfügt über Grunddaten des U-Bahnsystems, mit denen Fahrpläne erstellt werden können. Ein Beispiel für solche Grunddaten ist für einen Teilabschnitt der Linie U5 in Abbildung 82 dargestellt.

In der Abbildung werden für die Bahnhöfe Friedrichsfelde (Fi), Tierpark (Tk) und Biesdorf-Süd (Bü) die verschiedenen Fahrmöglichkeiten dargestellt. Die Rechtecke repräsentieren Bahnsteige und die Kreise Betriebspunkte, die über die dargestellten Verbindungslinien befahren werden können. Bei den Betriebspunkten 5308, 5306 und 5304 handelt es sich um Aufstellgleise im Tunnel. Die rechteckförmigen Beschriftungen der Verbindungslinien repräsentieren (in der Reihenfolge der Zahlen)

- den Abstand zwischen den Betriebspunkten in Metern,
- die Mindestfahrzeit,
- die zugsicherungstechnisch bedingte Mindestzugfolgezeit,
- die planmäßige Fahrzeit A und
- die planmäßige Fahrzeit B.

Alle Zeiten sind in Sekunden angegeben. Die Fahrzeiten verstehen sich inklusive verkehrlicher Haltezeiten an den Bahnsteigen. Die Fahrzeiten A und B dienen dazu, tageszeitlich bedingte Unterschiede in der Fahrzeit zu berücksichtigen.



**Abbildung 82: Grunddaten des Fahrplanverwaltungssystems BERTA (Beispiel) [BVG]**

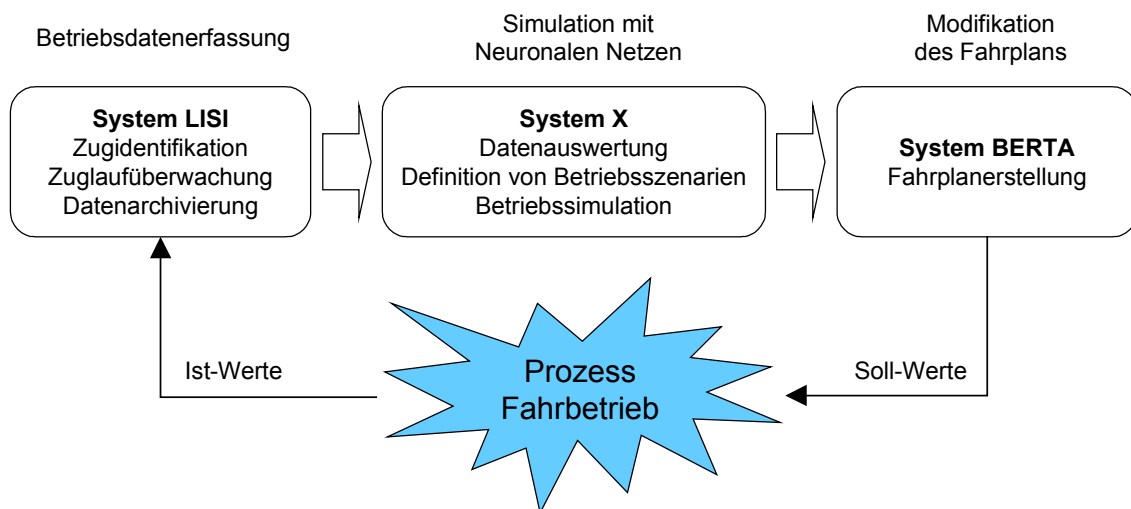
Zur Umsetzung der betrachteten Entstörungsstrategie wäre eine grundlegende Modifizierung des Fahrplanverwaltungssystems BERTA notwendig. Alle angegebenen Fahrzeiten müssten, anstatt bisher starr festgelegt, in Abhängigkeit der in 9.2 berücksichtigten Eingangsparameter variabel sein. Das heißt, die Fahrzeiten für jede Verbindungslinie müssten für jede in den Fahrplan aufzunehmende Zugfahrt mit Hilfe eines Neuronalen Netzes berechnet werden.

Dies stellt zwar einen großen Rechenaufwand dar, führt jedoch zu einer erheblichen Steigerung der Fahrplanqualität.

## 9.4 Systembetrachtung

Nach einer Realisierung der aufgeführten Schritte zur Umsetzung der Entstörungsstrategie kann der U-Bahnbetrieb als ein Regelkreis betrachtet werden (siehe Abbildung 83). Das Fahrplansystem BERTA stellt dem Prozess Fahrbetrieb die Soll-Werte in Form eines Fahrplans zur Verfügung. Die Ist-Werte in Form der Fahrzeiten werden durch das System LISI erfasst und archiviert. Sie werden durch das System X ausgewertet und für Simulationen benutzt. Die Simulationsergebnisse fließen wiederum in die Fahrplanerstellung ein. Das System X kann folglich als Regler verstanden werden.

Der Fahrplan enthält neben den Soll-Werten für die Regelgröße Fahrzeit auch Soll-Werte für Größen die nicht geregelt werden, wie die Zugfolgezeit und die Abfahrzeit.



**Abbildung 83: Der U-Bahnbetrieb als Regelkreis**

Innerhalb des Prozesses Fahrbetrieb existiert ein zweiter Regelkreis. Der Regler ist in diesem Fall der Zugfahrer (und im Fall eines automatischen Betriebs der Computer), der die Zugfahrten entsprechend den vorgegebenen Soll-Werten regelt.

Der durch das System X realisierte Regler wird folglich nur aktiv, wenn der in den Fahrprozess integrierte Regler, also der Zugfahrer, seine Aufgabe nicht mehr zufriedenstellend erfüllen kann.

## 10 Fazit und Ausblick

Die in Kapitel 5 entwickelten Entstörungsstrategien zeigen deutlich, dass sowohl der Automatisierungsgrad des U-Bahnsystems gegliedert in die Bereiche automatisches Fahren (ATO), automatisches Sichern (ATP) und automatisches Leiten (ATS) (siehe Kapitel 1) als auch die Art der Betriebsstörung gegliedert in technische, betriebliche und externe Ursachen (siehe Kapitel 2) bedeutenden Einfluss auf mögliche Entstörungsmaßnahmen besitzen.

Die Schwachstellenanalyse (Kapitel 3) zeigt für reale automatisch betriebene U-Bahnsysteme, dass wie auch bei konventionellen U-Bahnsystemen betriebliche und externe Einflüsse gegenüber technischen überwiegen. Beim Vergleich der Verfügbarkeiten automatischer Systeme fällt insbesondere der Einsatz von Bahnsteigtüren positiv ins Gewicht.

Die mathematisch-analytischen Herleitungen zur Charakteristik des U-Bahnbetriebs wie auch die darauf bezugnehmende Analyse realer Betriebsdaten in Kapitel 4.2 machen den erheblichen Einfluss des Phänomens der Aufschaukelung von Verspätungen auf die Betriebsabwicklung deutlich. Es wird anhand der realen Betriebsdaten in Kapitel 4.4 aufgezeigt, dass nicht nur der Betrieb, sondern vor allem der Fahrgast durch dieses Phänomen beeinträchtigt wird. Wie in Kapitel 5.2 theoretisch erläutert und in Kapitel 6.5 für die automatisch betriebene Pariser U-Bahnlinie 14 (Météor) praktisch nachgewiesen wird, ist der automatische Betrieb ein geeignetes Mittel zur Reduzierung dieses Phänomens. Die mittlere Fahrgastwartezeit auf dem Bahnsteig kann durch den automatischen Betrieb minimiert werden.

Die mittlere Fahrgastverspätung als weitere Qualitätskenngröße für den Fahrgast kann durch eine in Kapitel 5.2.3 hergeleitete besonders innovative Entstörungsstrategie minimiert werden, die eine Simulation des U-Bahnbetriebs erfordert. Dass der Einsatz Neuronaler Netze ein zur Anwendung dieser Strategie geeignetes Mittel darstellt, wird in Kapitel 6 nachgewiesen. Dazu werden reale Betriebsdaten einer konventionell betriebenen U-Bahnlinie in Berlin und einer automatisch betriebenen U-Bahnlinie in Paris vergleichend herangezogen. Die Analyse und Bewertung der Betriebssimulation bezieht sich auf die Struktur des Neuronalen Netzes, die Bereinigung der Trainingsdaten und den Einfluss der Eingangsparameter.

Es wird dabei deutlich, dass es bei MLP-Netzen bezüglich der Netzstruktur keine signifikanten Unterschiede für die Simulationsgüte gibt, wohingegen RBF-Netze mit mehr als 15 Neuronen in der versteckten Schicht deutlich schlechtere Ergebnisse liefern. Die Bereinigung der Trainingsdaten wirkt sich ebenfalls negativ auf die Simulationsergebnisse aus. Sehr einflussreiche Eingangsparameter für die Simulation einer Zugfahrt sind die Fahrzeit des Vorgängerzuges und die Zugfolgezeit am Startbahnhof.

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl für den konventionellen als auch für den automatischen U-Bahnbetrieb durch eine Betriebssimulation mit Neuronalen Netzen bessere Fahrzeitprognosen erzielt werden können als mit bereits heute vorhandenen Möglichkeiten, das heißt, Neuronale Netze sind zur Simulation des U-Bahnbetriebs geeignet und können für die in Kapitel 5 entwickelte Entstörungsstrategie eingesetzt werden.

Auch eine praktische Umsetzung der untersuchten mit Neuronalen Netzen arbeitenden Entstörungsstrategie ist möglich. Ein Weg dazu wird in Kapitel 7 am Beispiel der Ber-



liner U-Bahn aufgezeigt. Allerdings wäre für die konkrete Umsetzung u. a. eine erhebliche Modifikation des Fahrplanverwaltungssystems erforderlich.

Der nächste Schritt einer Weiterführung der Thematik wäre die in Kapitel 7 beispielhaft beschriebene Umsetzung der Entstörungsstrategie auf ein reales U-Bahnsystem. Besonders vielversprechend wäre dabei die Hinzunahme weiterer Eingangsparameter. So böte eine exakte Erfassung der Fahrgastströme eine gute Möglichkeit zur weiteren Verbesserung der Ergebnisse.

Eine Voraussetzung zur Anwendung der entwickelten Entstörungsstrategie ist stets, dass den Prozesseigenschaften eine regelhafte Systematik zu Grunde liegt. Im Gegensatz zu konventionellen Verfahren braucht diese jedoch nicht mit analytischen Mitteln beschreibbar zu sein. Eine zweite Voraussetzung ist, dass eine hinreichende Anzahl von repräsentativen Betriebsdaten für die Simulation zur Verfügung steht.

Diese Voraussetzungen sind außer für U-Bahnsysteme ebenfalls für andere Verkehrssysteme gegeben. Somit kann die Entstörungsstrategie auf weitere Verkehrssysteme adaptiert werden. Im Rahmen dieser Thematik könnten sich weitere Untersuchungen anschließen.

Es muss jedoch beachtet werden, dass Neuronale Netze keine hellseherischen Fähigkeiten besitzen und damit auch in Zukunft der Betrieb eines Verkehrssystems niemals hundertprozentig prognostiziert werden kann.

## 11 Literatur

- [ACK 98] Ackermann, T.: Die Bewertung der Pünktlichkeit als Qualitätsparameter im Schienenpersonenverkehr auf Basis der direkten Nutzenmessung; Forschungsarbeit des Verkehrswissenschaftlichen Instituts an der Universität Stuttgart; 1998
- [AEG 92] AEG Bahnsysteme: M-Bahn, Anlagen, Konzept, Planung, Betrieb; Broschüre der AEG Bahnsysteme; Berlin; 1992
- [ARA 84] Araya, S.; Sone, S.: Traffic Dynamics of Automated Transit Systems with Pre-established Schedules; IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics; Vol. 14 4/84; S. 677-687
- [BER 82] Berg, W.: Innerbetriebliche Gesetzmäßigkeiten des öffentlichen Linienbetriebes; ETH Zürich; Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik; IVT-Bericht Nr. 82/2, 1982
- [BIE 98] Biesenack, J.; Rehkopf, A.: Simulation pre-empts metro commissioning problems; Metro Report (Railway Gazette Yearbook); 1998; S. 15-16
- [BOY 72] Boyd, R. K. et al.: How to Run an Automated Transportation System; IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics; Vol. 2 3/72; S. 331-341
- [CLA 00] Claussen, C. et al.: Steuerung von Haltestellen beim automatischen U-Bahn-Betrieb, Erfahrungen mit der Haltestellen-Gefahren-Überwachung in Berlin; Der Nahverkehr; 1-2/00; S. 14-17
- [CUR 80] Cury, J. E. et al.: A Methodology for Generation of Optimal Schedules for an Underground Railway System; IEEE Transactions on Automatic Control; Vol. 25 2/80; S. 217-222
- [CZE 99] Czerkewski, P.: Automatisierung von Nahverkehrssystemen am Beispiel der Berliner U-Bahn; in „International Conference - Electric Railway Systems <2, 1999, Berlin>“; ETG-Fachbericht 74; VDE-Verlag; Berlin, Offenbach; 1999; S. 289-293
- [GIE 84] Giesen, U. et al.: Die H-Bahn-Anlage Universität Dortmund; Eisenbahntechnische Rundschau (ETR); 6/84; S. 519-524
- [HEI 79] Heister, G.: Gesetzmäßigkeiten von Zugverspätungen; Archiv für Eisenbahntechnik; 34 (1979); S. 53-58
- [HIL 97] Hille, P.: Konzepte und Strategien für KOBS (Kernsystem für eine optimierte Betriebssteuerung); Signal + Draht; 9/97; S. 18-97
- [HIL 99] Hille, P.: Konfliktlösungsmodelle; Signal + Draht; 3/99; S. 15-18
- [HÖR 93] Hörstel, J. et al.: Interaktive Fahrplankonstruktion mit dem Simulationsmodell SIMU VII; Eisenbahntechnische Rundschau (ETR); 9/93; S. 589-593
- [IFB 88] Institut für Bahntechnik GmbH: Forschungsvorhaben MASON, Entwicklungsstand in Berlin (SELTRAC), Entwicklungsstand in Hamburg (PUSH); Bericht im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie; Institut für Bahntechnik GmbH; Berlin; 1988
- [JAN 97] Jansen, H.: Fahrerlos betriebene spurgeführte Verkehrssysteme - Zulassung des People Mover auf dem Frankfurter Flughafen; ZEV + DET Glasers Annalen; 7/97; S. 396-400
- [KRA 90] Kratzer, K. P.: Neuronale Netze, Grundlagen und Anwendungen; Carl Hanser Verlag; München, Wien; 1990
- [MNI 89] Mnich, P.: MASON, Modulares Automatisierungssystem mit Sicherheitsverantwortung für den öffentlichen Nahverkehr; in „Nahverkehrsforschung '89 - Statusseminar XVI“; Hrsg.: Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie; Ottobrunn; 1989; S. 326-336
- [MNI 99] Mnich, P.: Elektrische Bahnen auf Erfolgskurs, Sind die Stückzahlen zu steigern?; Eisenbahntechnische Rundschau (ETR); 3/99; S. 103-106
- [MÜL 00] Müller-Hellmann, A.: Stand und Entwicklung automatischer U-Bahnsysteme in Deutschland; in „Internationales Forum zum automatischen U-Bahn-Betrieb STAR 2000, Tagungsband“; Hrsg.: Berliner Verkehrsbetriebe (BVG); Berlin; 2000; S. 99-113

- [NEU 98] NeuroSystems, Benutzerhandbuch; C79000-G8200-C143-01; Siemens AG; 1998
- [NEW 74] Newell, G. F.: Control of Pairing of Vehicles on a Public Transportation Route, Two Vehicles, One Control Point; Transportation Science; 3/74; S. 248-264
- [NWI 98] Newi, H. et al.: Verspätungsanalyse durch Simulation; Signal + Draht; 10/98; S. 16-20
- [NÖK 96] Nökel, K.; Rehkopf, A.: Betriebsführung von Nahverkehrssystemen mit dem Simulationswerkzeug TRANSIT; Signal + Draht; 3/96; S. 15-18
- [OSU 72] Osuna, E. E.; Newell, G. F.: Control Strategies for an Idealized Public Transportation System; Transportation Science; 1/72; S. 52-72
- [PAR 98] Parádi, F.; Szilva, P. E.: Konflikterkennung und -lösung durch dynamische Zuglenkung; Signal+Draht; 3/98; S. 26-27
- [PFE 95] Pferdenges, S.; Schaefer, H.: Automatische Konflikterkennung und wissensbasierte Konfliktlösung in der Streckendisposition; Signal + Draht; 5/95; S. 174-177
- [REH 98] Rehkopf, A.: Betriebliche Simulation für den spurgeführten Verkehr; Signal + Draht; 3/98; S. 10-15
- [RIT 00] Ritter, N.: Automatisierung von U-Bahnen unter rollendem Rad, Forschungsvorhaben zur Überführung des laufenden in den automatischen Betrieb bei der U-Bahn Berlin vor dem Abschluss; Der Nahverkehr; 1-2/00; S. 8-11
- [SCH 98] Schnieder, E.: Telematik im Schienenverkehr; in „Kompendium der Verkehrstelematik“, Grundwerk; Hrsg.: Evers, H.; TÜV-Verlag, Unternehmensgruppe TÜV Rheinland/Berlin-Brandenburg; Köln; 1998
- [SMO 91] Smolka, B.: Untersuchungen zur rechnergestützten Betriebseinsatzplanung in einem U-Bahn-System; Bericht zum Test von Softwarebausteinen für die Betriebseinsatzplanung; IVB Ingenieurgesellschaft Verkehr Berlin GmbH; 1991
- [SMT 99] Schmidt, B.: König Fahrgast, Wie Verkehrsbetriebe mit Design und Kommunikation Kunden (zurück)gewinnen; Verkehr und Technik; 7/99; S. 283-287
- [SPP 99] Schnippe, C.: Relevanz von Qualitätskriterien, Der ÖPNV im Urteil der Fahrgäste; Der Nahverkehr; 4/99; S. 52-56
- [STR 98] Strobel, H.: Die automatisierte Stadtschnellbahn mit flexibler Betriebsführung, Eine Analyse der wirtschaftlichen und verkehrlichen Innovationspotentiale; Der Eisenbahningenieur; 4/98; S. 34-43
- [VDV 98] VDV-Schrift 399: Anforderungen an Einrichtungen zur Gewährleistung der Fahrgastsicherheit in Haltestellen bei Fahrbetrieb ohne Fahrzeugführer; Verband Deutscher Verkehrsunternehmen; Köln; Gelbdruck 9/98
- [VNN 95] VDI Bericht 1184: Neuronale Netze, Anwendungen in der Automatisierungstechnik; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1995
- [VSI 95] VDI Bericht 1219: Simulation und Simulatoren für den Schienenverkehr; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1995
- [WIE 85] Wienand, B.: PUSH, Prozessrechnergesteuertes U-Bahn-Automations-System Hamburg; Schlussbericht des Projektes im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie; Hamburger Hochbahn AG; Hamburg; 1985
- [ZAS 99] Zastrow, K. F.: Modelling of Track Bound Line Operation in Public Transportation Systems; in „Process Modelling“, Hrsg.: Scholz-Reiter, B. et al.; Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg, New York; 1999; S. 276-290
- [ZAS 00] Zastrow, K. F.: Simulation of Subway Operation Using Neural Networks; in „Proceedings of the 9th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems 2000“, Hrsg.: Schnieder, E. und Becker, U.; TU Braunschweig; 13.-15. Juni 2000; Volume I; S. 78-82

## **12 Normen und Richtlinien**

DIN EN 50126, Ausgabe 2000-03

Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit (RAMS)

Deutsche Fassung EN 50126:1999

(Norm-Entwurf) DIN EN 50129, Ausgabe 2000-11

Bahnanwendungen - Sicherheitsrelevante elektronische Systeme für Signaltechnik

Deutsche Fassung prEN 50129:1999

DIN 40041, Ausgabe 1990-12,

Zuverlässigkeit, Begriffe

VDI-Richtlinie 4001, Blatt 2, Ausgabe 1986-06

Begriffsbestimmungen zum Gebrauch des VDI-Handbuches Technische

Zuverlässigkeit

VDV 422, Ausgabe 1999-08

Grundsätzliche Anforderungen an Automatisierungs- und Leitsysteme

### 13 Weitere Quellen

- [BVG] BVG, Berlin (Betreiber Berliner U-Bahn)
- [HAN] Projekt: Handbuch für die Betriebsleitstelle der Berliner U-Bahn, 1996
- [LIL] Transpole, Direction de la Production, Lille (Betreiber VAL)
- [LON] Docklands Railway Management Ltd, London (Betreiber Docklands Light Rail)
- [LYO] SEMALY, Ingénierie des Transport Publics, Lyon (Betreiber Ligne D)
- [PAR] Régie Autonome des Transports Parisiens (RATP), Paris (Betreiber Météor)
- [STA] Projekt: STAR, Forschungsvorhaben Berliner U-Bahn, Überführung des Laufenden in den Automatischen Betrieb, 1996-2000
- [TOK] Tokyo Waterfront New Transit, Tokyo (Betreiber Yurikamome Line)
- [VAN] British Columbia Rapid Transit Co. Ltd, Vancouver (Betreiber Sky Train)

## Lebenslauf

Name: Kai Frederik Zastrow  
Geburtstag: 18. Mai 1971  
Geburtsort: Berlin  
Staatsangehörigkeit: deutsch  
Familienstand: verheiratet

### Schulbildung:

1976-1979 Vorschule und Grundschule in Berlin-Kladow  
1979-1983 Grundschule und Orientierungsstufe in Osterholz-Scharmbeck (Niedersachsen)  
1983-1990 Gymnasium in Osterholz-Scharmbeck (Niedersachsen)  
Juni 1990 Abitur

### Studium:

Okt. 1990 - Apr. 1995 Studium der Elektrotechnik an der TU Berlin  
1994 Studienarbeit am Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK Berlin)  
1994/95 Diplomarbeit in der Forschungsabteilung der Firma Renault in Paris (Frankreich)  
Apr. 1995 Diplom

### Praktika und Berufserfahrung:

Jul. - Sep. 1990 Grundpraktikum bei der Siemens AG in Berlin (Schweißen, Drehen, Fräsen)  
Mär. - Apr. 1991 Werkstudententätigkeit bei der Siemens AG in Berlin (Leiterplattenfertigung)  
Feb. 1992 - Sep. 1994 Studentische Hilfskraft am IPK Berlin im Bereich Prozesstechnik  
Okt. 1994 - Mär. 1995 Praktikum in der Forschungsabteilung der Firma Renault in Paris (Frankreich)  
seit Mai 1995 Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der IFB Institut für Bahntechnik GmbH in Berlin im Bereich Betriebsleitsysteme und Kommunikationstechnik