Optimierung von Fahrweisen im spurgeführten Verkehr und deren Umsetzung

von
Dipl.-Ing. Ulrich Linder
aus Berlin

Von der Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. P. Mnich (TU Berlin)
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. J. Siegmann (TU Berlin)
Gutachter:	Prof. Dipl.-Ing. H. Brändli (ETH Zürich)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 26. April 2004

Berlin 2004
D 83

Vorwort

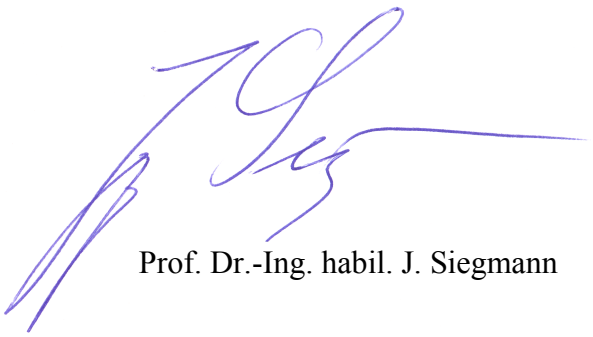
Die Verminderung des Verbrauchs natürlicher Ressourcen und von Energie ist weltweit eine gesellschaftliche Zukunftsaufgabe von höchster Aktualität, ihre technische Bewältigung stellt für die Forschungsthemen der Hochschulen und die Entwicklungsprojekte der Industrie eine zentrale Herausforderung dar. Dabei dürfen sich die Lösungsansätze nicht nur auf die technische Machbarkeit konzentrieren, sondern ihre Umsetzung in die betriebliche Realität setzt auch wirtschaftliche Effizienz und unternehmerische Erfolgsperspektiven voraus. Nicht zuletzt beruht sie auch auf einer Akzeptanz bei Anwendern und Nutzern.

Zahlreiche Untersuchungen belegen, dass das Potenzial an Energieeinsparung im Bereich des Eisenbahnwesens beachtlich ist und für die Betreiber einen wesentlichen wirtschaftlichen Faktor darstellt. Damit ist es auch für die Systemhersteller lohnend, entsprechende Systeme zu entwickeln bzw. bereits verfügbare weiter zu verbessern.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der automatisierten Optimierung der Fahrweise als Methode für eine energiesparsame Fahrtechnik, sowie mit deren technischer Umsetzung in Form von Advice Systemen. Sie behandelt zunächst neben den Kriterien für eine energiesparsame Fahrweise auch deren Wechselwirkungen mit betrieblichen Vorgaben bzw. Anforderungen. Entscheidend für die Möglichkeiten der Energieeinsparung sind die Spielräume im Fahrplan und der Grad der pünktlichen Züge, die dann ihre Fahrzeitreserven zum Energiesparen nutzen können.

Danach setzt sich Herr Linder mit dem Optimierungsmodell und dem technischen Prinzip von Advice Systemen auseinander und diskutiert dessen Vor- und Nachteile gegenüber anderen Lösungsansätzen. Des Weiteren definiert er Entwicklungsstrategien und -ziele von computergestützten Fahrerassistenzsystemen und behandelt die technischen und betrieblichen Voraussetzungen zu deren Einführung in den realen Bahnbetrieb. Abschließend wird ein Modell zur Systembewertung vorgestellt.

Mit dieser Arbeit steht für die Entwicklung, Einführung und Systembewertung von Advice Systemen ein umfassendes Planungsinstrument zur Verfügung. Sie trägt hoffentlich dazu bei, dass sich Systemanbieter und Betreiber in ihren Entwicklungszielen weiterhin mit diesem zukunftsträchtigen Thema beschäftigen und es gemeinsam mit der Hochschulforschung bearbeiten.



Berlin, im Mai 2004 Prof. Dr.-Ing. habil. J. Siegmann

Kurzfassung

U. Linder: Optimierung von Fahrweisen im spurgeführten Verkehr und deren Umsetzung

Der Bewegung von Schienenfahrzeugen auf einem Bahn-Infrastrukturnetz sind durch vorgegebene Randbedingungen wie Höchstgeschwindigkeiten, Signalstellungen, Fahrzeugvermögen, Fahrplan und Betriebsvorgaben Grenzen gesetzt. Innerhalb dieser Grenzen sind die Fahrten jedoch mit unterschiedlichen Fahrweisen oder Fahrstrategien realisierbar.

Mit der Wahl einer geeigneten Fahrweise kann der Energieverbrauch gesenkt, der Verschleiß sowie die Lärmbelastung verringert, die Pünktlichkeit gesteigert und der Streckendurchsatz erhöht werden. Diese Ziele müssen sich nicht gegenseitig ausschließen, sondern können häufig gemeinsam erreicht werden. Wird jedes dieser Ziele situationsabhängig mit einer Priorität versehen, kann durch eine dafür geeignete Fahrweise ein Gesamtoptimum erreicht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zunächst die Grundlagen zu Fahrweisen und die Einflüsse von Fahrzeug, Infrastruktur, Leit- und Sicherungstechnik sowie des Fahrplanes auf die Fahrweise analysiert. Der wichtige Bereich der Realisierung einer Fahrweise wird durch die Beschreibung einer typischen Fahrzeugsteuerung, eines typischen Fahrtverlaufes sowie der Einflüsse von Triebfahrzeugführer und der Systeme zum automatischen Fahren abgedeckt. Die theoretischen Grundlagen zur Optimierung von Fahrweisen werden anhand der energiesparsamen Fahrweise erläutert. Hierzu werden die grundlegenden Algorithmen für unterschiedliche Einsatzgebiete hergeleitet und analysiert.

Zur Umsetzung von theoretisch ermittelten Fahrweisen im realen Betrieb werden Systeme zur Berechnung und Anzeige von Fahrempfehlungen eingesetzt (Advice Systeme). Neben den Aufgaben und dem prinzipiellen Aufbau dieser Systeme werden auch verschiedene realisierte oder in Entwicklung befindliche Systeme vorgestellt. Im Anschluss daran wird ein Leitfaden zur Entwicklung eines Advice Systems entwickelt.

Wichtige Kriterien zur Bewertung von Fahrten und Fahrweisen werden aus der Auswertung von aufgezeichneten oder simulierten Fahrten gewonnen. Die Anforderungen an die Auswertung und deren Methoden werden erarbeitet und an Beispielen demonstriert. Zur wirtschaftlichen Bewertung von Advice Systemen wird ein Einblick in die Wirtschaftlichkeitsrechnung für solche Systeme gegeben.

Die Einführung und Bewertung von Advice Systemen wird anhand einer typischen Abfolge und eines Beispiels für den Nahverkehr ausführlich dargelegt. Es wird gezeigt, dass moderne Advice Systeme in der Lage sind, die an sie gestellten Forderungen zur Optimierung der Fahrweise zu erfüllen und dass durch gezielte Schulung der Triebfahrzeugführer eine hohe Akzeptanz erreicht werden kann. Neben der technischen Machbarkeit wird die Wirtschaftlichkeit als bestimmendes Entscheidungskriterium identifiziert, denn diese ist nicht zwangsläufig gegeben und muss für jeden Anwendungsfall explizit nachgewiesen werden.

Ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen und Systeme zur Optimierung von Fahrweisen schließen diese Arbeit ab.

Abstract

U. Linder: Optimization of running profiles in the guided land transport and their realization

The motion of trains on a railway infrastructure is limited by given conditions such as maximum speed, signalling, engine power and the timetable as well as operational instructions. Nevertheless different kinds of driving strategies are possible within these limitations.

By selecting an appropriate running profile, traction energy can be lowered, punctuality can be improved, wear and tear as well as noise pollution can be reduced and the throughput can be increased. These objectives are not necessarily mutually exclusive, but can frequently be achieved together. If each of these objectives is provided with a situation-dependent priority, a total optimum can be achieved by a suitable running profile.

In the context of this work, first the basics of running profiles and the influences of vehicle, infrastructure, railway operation and control systems as well as the timetable on the running profiles are analyzed. The important topic of the realization of a running profile is covered by the description of a typical vehicle control, a typical travel process as well as the influences of the engine driver and of automatic driving systems. The fundamentals for the optimization of running profiles are described exemplary by the energy-economical running profile. For this the fundamental algorithms for different operational fields are deduced and analyzed.

The realization of theoretically determined running profiles in operation is done by advice systems which compute and announce driving recommendations to the driver. In addition to the tasks and the structure of such systems some realized and developmental advice systems are presented. Subsequently, a guide for the development of an advice system is derived.

Important criteria for the assessment of drives and running profiles are extracted from the evaluation of recorded or simulated drives. The requirements on the evaluation and their methods are developed and demonstrated by examples. After that a general guideline in economic evaluation of an advice system is given.

The introduction and evaluation of Advice systems are stated in detail based on a typical implementation process and an example of the suburban traffic. It is shown that modern advice systems are able to fulfil the requirements in optimization running profiles and that calculated training of drivers can achieve a great acceptance. Apart from the technical feasibility economy is identified as determining decision criterion, because this is not inevitably given and must be proven for each application explicitly.

An outlook on future developments and future advice systems conclude this work.

Inhalt

Vorwort i

Kurzfassung iii

Abstract iv

Inhalt v

1 Randbedingungen 1

1.1 Einführung 1
1.2 Grundlagen von Fahrweisen 3
1.3 Motivation zur Optimierung von Fahrweisen 6
1.4 Kategorisierung von Einflüssen auf die Fahrweise 9
1.5 Fahrzeuge 11
1.6 Infrastruktur 11
1.7 Leit- und Sicherungstechnik 12
1.7.1 Sicherungstechnik 12
1.7.2 Zugbeeinflussung 13
1.7.2.1 Punktförmige Zugbeeinflussung (PZB) 14
1.7.2.2 Linienzugbeeinflussung (LZB) 14
1.7.3 European Train Control System (ETCS) 16
1.7.3.1 ETCS Level 1 18
1.7.3.2 ETCS Level 2 18
1.7.3.3 ETCS Level 3 19
1.7.4 Betriebsleittechnik 20
1.8 Fahrplan 21
1.8.1 Fahrplanarten 21
1.8.2 Definitionen 23
1.8.3 Fahrzeitermittlung 24
1.8.4 Fahrplangestaltung 24

2 Realisierung von Fahrweisen 25

2.1 Fahrzeugsteuerung 25
2.2 Antriebssteuerung 27
2.2.1 Fahrstufen und Zugkraftkennlinien 27
2.2.2 Wirkungsgrad von Antrieb und regenerativer Bremse 28
2.3 Bremssteuerung 32
2.4 Fahrtverlauf 32
2.4.1 Haltepunkt 33
2.4.2 Zielbremsung 33
2.4.3 Zugabfertigung 33

2.4.4 Überschneidung von Bahnverkehr und Individualverkehr 34
2.5 Triebfahrzeugführer 35
2.6 Automatisches Fahren 36
2.6.1 Automatische Fahr- und Bremssteuerung 36
2.6.2 Automatic Train Operation 37
2.7 Advice Systeme 39

3 Energiesparsame Fahrweise (ESF) 41

3.1 Grundlagen der energiesparsamen Fahrweise 41
3.2 Cost-Time-Curve (CTC) 44
3.3 Algorithmen zur Bestimmung der energiesparsamen Fahrweise 48
3.3.1 Grundlagen 48
3.3.2 Theoretische (Offline-) Verfahren 49
3.3.3 Online-Verfahren 49
3.3.4 Personen-Fernverkehr 50
3.3.4.1 Ermittlung potenziell interessanter Fahrphasen 50
3.3.4.2 Ermittlung der optimalen Kombination von Fahrphasen 52
3.3.4.3 Erweiterungen zum Einsatz in Online-Systemen 52
3.3.5 Güterverkehr 54
3.3.6 Nahverkehr 55
3.3.6.1 Vereinfachung durch Reduktion auf eine einzelne Fahrempfehlung 55
3.3.6.2 Vereinfachte Onboard-Simulation durch Annahme einer durchschnittlichen Roll- und Bremsverzögerung 55
3.4 Einfluss der Traktion 59
3.4.1 Elektrotraktion ohne Rückspeisefähigkeit 59
3.4.2 Elektrotraktion mit Rückspeisefähigkeit 59
3.4.3 Dieselelektrische Traktion 60
3.4.4 Dieselhydraulische Traktion 61
3.5 Fahrzeugortung 61
3.5.1 Ortungskomponenten 62
3.5.1.1 Streckenatlas 62
3.5.1.2 Wegimpulszähler 63
3.5.1.3 Linienleiter 63
3.5.1.4 Ortungsbalisen 64
3.5.1.5 Satellitenortung 65
3.5.1.6 Weitere Ortungskomponenten 66
3.5.1.7 Verfügbarkeit und Fehlerarten verschiedener Ortungskomponenten 67

3.5.2 Ortungsfehler / Anforderungen an die Ortung ... 67
3.5.2.1 Makroskopische Ortungsfehler ... 68
3.5.2.2 Mikroskopische Ortungsfehler ... 68
3.5.2.3 Untersuchungen zu mikroskopischen Ortungsfehlern ... 69
3.6 Technische Voraussetzungen ... 73
3.6.1 Fahrzeugortung ... 73
3.6.2 Datenversorgung ... 73
3.6.3 Bordcomputer und Synergieeffekte ... 77
3.6.3.1 EBuLa ... 77
3.6.3.2 Anwendungsmanager der DB AG ... 78
3.6.3.3 IBIS ... 79
3.7 Betriebliche Voraussetzungen ... 80
3.7.1 Fahrzeitreserve ... 80
3.7.2 Pünktlichkeit ... 81
3.7.3 Zugfolge ... 81
3.8 Optimierung von Fahrplänen für die ESF ... 84
3.9 Andere Ziele zur Optimierung der Fahrweise ... 87
3.9.1 Optimierung der Schallemission vorbeifahrender Züge an lärmempfindlichen Orten durch dynamische Optimierung der Fahrweise ... 87
3.9.2 Übertragung des Know-hows aus der ESF auf andere Optimierungsziele ... 89

4 Advice Systeme ... 91

4.1 Aufgaben eines Advice Systems ... 91
4.2 Advice Systeme zur Unterstützung eines Triebfahrzeugführers ... 92
4.3 Advice Systeme zur Unterstützung einer ATO ... 94
4.4 Aufbau eines Advice Systems ... 96
4.4.1 Hardwarekomponenten ... 96
4.4.2 Softwarekomponenten ... 99
4.4.2.1 Betriebssystem ... 101
4.4.2.2 Entwicklungs-Framework ... 101
4.4.2.3 Anwendungen und Dienste ... 101
4.4.2.4 Ortung ... 102
4.4.2.5 Datenhandling und Datenaufbereitung ... 102
4.4.2.6 Datenversorgung und Datenformate ... 103
4.4.2.7 Kommunikation ... 105
4.4.2.8 Wartung ... 107
4.4.3 Sicherheitsnachweis ... 108

4.5 Erwartungen an ein Advice System ... 110
4.6 Akzeptanz eines Advice Systems ... 111
4.6.1 Akzeptanz beim Triebfahrzeugführer ... 111
4.6.2 Akzeptanz beim Betreiber ... 113
4.6.3 Akzeptanz bei Kunden des Bahnsystems ... 114
4.7 Realisierte Advice Systeme ... 114
4.7.1 ESF ICE ... 114
4.7.2 ESF LOK ... 114
4.7.3 Siemens METROMISER™ ... 115
4.7.3.1 On Board Unit ... 116
4.7.3.2 Time Table Optimiser ... 118
4.7.3.3 Datenversorgung ... 119
4.8 Leitfaden zur Entwicklung eines Advice Systems ... 119

5 Auswertung von Fahrten ... 121

5.1 Anforderungen an Fahrtsimulationen und aufgezeichnete Fahrten ... 121
5.2 Auswertung aufgezeichneter Fahrten ... 121
5.2.1 Aufzeichnungsverfahren ... 122
5.2.2 Aufzuzeichnende Größen ... 123
5.3 Fahrdynamische Auswertung ... 124
5.3.1 Messfehler und Güte der fahrdynamischen Aufzeichnung ... 124
5.3.1.1 Wegimpulszähler ... 125
5.3.1.2 Zeitsignal ... 126
5.3.1.3 Geschwindigkeitsbestimmung ... 127
5.3.1.4 Beschleunigungsbestimmung ... 127
5.3.1.5 Onlinebestimmung von Momentangeschwindigkeit und Momentanbeschleunigung ... 127
5.3.2 Aufarbeitung von aufgezeichneten Geschwindigkeitsverläufen ... 128
5.3.2.1 Berechnung nicht aufgezeichneter Größen ... 129
5.3.2.2 Glättung von Geschwindigkeitsverläufen ... 130
5.3.3 Bestimmung fahrdynamischer Daten aus aufgezeichneten Fahrten ... 130
5.4 Bewertung von Fahrten ... 134
5.5 Bewertung von Fahrempfehlungen und Advice Systemen ... 136

6 Wirtschaftlichkeit von Advice Systemen 139
6.1 Discounted-Cash-Flow-Methode 140
6.2 Wirtschaftlichkeit aus Sicht des Betreibers 140
6.2.1 Einzahlungen 141
6.2.2 Auszahlungen 142
6.2.3 Finanzierungsparameter 143
6.2.4 Modell zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit 143
6.3 Wirtschaftlichkeit der Systementwicklung und -vermarktung 144
6.3.1 Einzahlungen 145
6.3.2 Auszahlungen 145
6.3.3 Umsatzsteigerung durch die Übernahme einer Erfolgsgarantie 147
6.3.4 Bewertung der Wirtschaftlichkeit während der Entwicklung bzw. nach dem Markteintritt 148

7 Einführung und Bewertung eines Advice Systems 149
7.1 Allgemeines Vorgehen 149
7.2 Motivation 150
7.3 Pre-Sales-Aktivitäten 151
7.3.1 Erwartungshaltung 153
7.3.2 Überprüfung der Voraussetzungen 153
7.3.3 Voruntersuchung 154
7.3.4 Testbetrieb 155
7.3.5 Detaillierte Untersuchungen zum Einsatz im ganzen Netz 159
7.3.6 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung 161
7.4 Systemeinführung 163
7.4.1 Projektierung 163
7.4.2 Ausrüstung der Fahrzeuge 163
7.4.3 Stationäre Ausrüstung 163
7.4.4 Schulung des Personals 163
7.4.5 Einführung des Systems in den normalen Betrieb 165
7.5 Laufende Systembewertung 165

8 Fazit und Ausblick 167
8.1 Aktueller Stand 167
8.2 Entwicklungsstrategie 168
8.3 Entwicklungsziele 169

9 Zusammenfassung 171

Anhang 173

A Fahrdynamik 175
B Zugfahrtsimulation 189
C Beispiel zur Optimierung der Fahrweise 193
D Beispielsimulation Ortungsfehler 197
E Datenbedarf eines Advice Systems 203
F Nahverkehrsbetreiber TransAdelaide 209

Literatur 215

Abkürzungen 223

Formelzeichen / Einheiten 225

Glossar 227

Stichwortverzeichnis 235

Danksagung 239

Lebenslauf 241

Rechtliche Hinweise

Die Informationen in diesem Werk werden ohne Rücksicht auf einen eventuellen Patentschutz veröffentlicht.

Fast alle Firmen-, Marken- und Produktnamen, die in diesem Werk erwähnt werden, sind gleichzeitig auch eingetragene Warenzeichen oder sollten als solche betrachtet werden. Sie sind im Besitz ihrer jeweiligen Eigentümer.

Warennamen werden ohne Gewährleistung der freien Verwendbarkeit benutzt.

1 Randbedingungen

1.1 Einführung

Der Betrieb eines Bahnsystems ist geprägt von der Bewegung von Schienenfahrzeugen auf einem Bahn-Infrastrukturnetz, bestehend u.a. aus Streckengleisen, Bahnhofsgleisen, Weichen und Sicherungsanlagen. Die Art der Bewegung der einzelnen Fahrzeuge ist durch äußere Randbedingungen beschränkt, wie z.B. Höchstgeschwindigkeiten, Signalstellungen, Fahrzeugvermögen, Fahrplan und Betriebsvorgaben. Innerhalb dieser Vorgaben kann die Wahl der Fahrweise die Qualität des Betriebes und des Verkehrs deutlich beeinflussen.

Im Zuge der Bahnreformen, die alle Bahnen Europas in den letzten zehn Jahren nachhaltig beeinflusst haben, wurden die einstigen monolithischen (Staats-)Bahnen jeweils in mehrere eigenständige Unternehmen zerteilt, die wirtschaftlich unabhängig voneinander operieren [EWG-1991]. Im Wesentlichen handelt es sich um eine Trennung von Netz und Transport, wobei der Transport häufig noch weiter aufgeteilt ist in Fernverkehr, Nahverkehr und Güterverkehr.

Während das Eisenbahn-Infrastruktur-Unternehmen (EIU) für den Bau, die Wartung, die Bereitstellung und die Vermarktung des Fahrweges sowie die Betriebsführung zuständig ist, betreibt das Eisenbahn-Verkehrs-Unternehmen (EVU) den Bahnverkehr mit eigenen oder geliehenen Fahrzeugen auf dem Netz des EIU und bezahlt für die Bereitstellung und die Nutzung der gebuchten Fahrtrassen. Die Höhe dieser Vergütung wird in einem Trassenpreissystem (TPS) gemäß der EU-Richtlinie 91/440 [EWG-1991] und den nationalen Gesetzen geregelt. Die DB AG hat zum 01.07.1994 als erste Bahn der Welt ein derartiges TPS eingeführt. Der politische Wunsch war, dass das Netz 100 % seiner Kosten inkl. Abschreibung und Zinsen über die Trassenpreise verdienen soll.

EVU und EIU haben aufgrund ihrer jeweiligen Ziele unterschiedliche Interessen an der Durchführung der Zugfahrten und damit an der zu realisierenden Fahrweise (Tabelle 1). Da EVU und EIU sowohl wirtschaftlich als auch im operativen Betrieb voneinander abhängig sind, können die jeweiligen Interessen jedoch nicht isoliert voneinander betrachtet werden, d.h. es muss eine Lösung gesucht werden, die beiden Partnern gerecht wird.

Im Rahmen dieser Abhandlung werden Verfahren und Systeme entwickelt und beschrieben, die einen Beitrag zur Optimierung der Fahrweisen im Bahnverkehr leisten können, wobei sowohl auf die Belange des EVU als auch auf die des EIU und der Kunden des Bahnsystems eingegangen wird. Obwohl hier ausschließlich Bahnsysteme berücksichtigt werden, lassen sich viele der Methoden und Systeme auch auf andere Verkehrsträger übertragen, sofern die jeweiligen Voraussetzungen der Methoden und Systeme sowie die Besonderheiten des Verkehrsträgers berücksichtigt werden.

	Interesse des	
	EVU	EIU
Fahrplantrasse Die Fahrplantrasse wird vom EVU angefordert; das EIU erstellt den Fahrplan und ist für die Bereitstellung der Trasse verantwortlich	• Bedarfsbezogene Ankunfts- und Abfahrtszeiten • Gute Verknüpfungen an andere Verkehre • Ggf. Taktfahrplan • Günstiger Trassenpreis	• Gute Auslastung von Strecke und Bahnhofsanlagen • Keine Überlastung • Kurze Belegungszeiten
Pünktlichkeit	• Verkehrlich festgelegte Zeiten (Abfahrt und Ankunft) sollen möglichst auf die Minute eingehalten werden • Umsteigebeziehungen sollen gewährleistet werden	• Betrieblich festgelegte Zeiten (Durchfahrtszeiten, Kreuzungen, etc.) sollen eingehalten werden • Kurze Belegungszeiten auf ausgelasteten Abschnitten; längere Belegung mit Pufferzeiten auf nicht ausgelasteten Abschnitten
Geschwindigkeit	• Hohe *Reisegeschwindigkeit*: führt zu kürzeren Fahrzeiten und damit zu höherer Kundenakzeptanz und zu geringeren Umlaufzeiten • Niedrige momentane *Fahrgeschwindigkeit*: führt zu einer Reduzierung der Energie- und Verschleiß-Kosten	• Hohe Fahrgeschwindigkeit führt zu kurzen Belegungszeiten, aber auch zu höherem Verschleiß • Homogene Fahrweisen mit wenigen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen können zu einer Reduzierung des Verschleißes führen
Energieverbrauch	• Großes Interesse an energiesparsamen Fahrweisen, wenn der Energieverbrauch nicht pauschal abgerechnet wird	• Interesse an energiesparsamen Fahrweisen nur dann, wenn Versorgungseinrichtungen kleiner dimensioniert werden können
Lärm/Verschleiß Die Berücksichtigung des vom Fahrzeug verursachten Lärms und des fahrzeug-spezifischen Verschleißes ist im TPS zwar vorgesehen, jedoch noch nicht realisiert	• Lärm ist nur dann von Bedeutung, wenn dadurch die Trassenkosten beeinflusst werden oder behördliche Einschränkungen bezüglich des Betriebs zu befürchten sind • Fahrzeugseitiger Verschleiß hat einen großen Einfluss • Fahrwegseitiger Verschleiß hat nur dann eine Bedeutung, wenn dadurch Schädigungen am Rollmaterial zu erwarten sind oder wenn der Trassenpreis dadurch beeinflusst wird • Kundenzufriedenheit	• Lärm ist dann von Bedeutung, wenn behördliche Auflagen zu erfüllen sind bzw. Anliegerproteste und Verzögerungen im Genehmigungsverfahren zu befürchten sind • Fahrwegseitiger Verschleiß hat einen großen Einfluss und wird im Trassen-Grundpreis pauschal an die EVU weitergegeben, solange noch keine spezifische Abrechnung möglich ist

Tabelle 1: Interessen von EVU und EIU, die einen Einfluss auf die Fahrweise haben

1.2 Grundlagen von Fahrweisen

Als ***Fahrweise*** wird die Art der Bewegung des Fahrzeuges von einem definierten Start- zu einem definierten Zielpunkt bezeichnet. Start- und Zielpunkt können beliebig festgelegt werden. Neben dem Ort muss jedoch auch der jeweilige Fahrzustand definiert sein. Die komplette ***Fahrt*** zwischen zwei verkehrlichen Halten kann demnach aus einer Abfolge mehrerer Fahrweisen bestehen.

Eine Fahrweise wird häufig durch eine typische Abfolge von Fahrzuständen charakterisiert. In dieser Arbeit wird eine allgemeiner gefasste Definition verwendet, indem das zugrunde liegende Verfahren zur Bestimmung der Abfolge von Fahrzuständen gemeint ist. Sie kann sich aus einzelnen ***Fahrphasen*** mit unterschiedlichen ***Fahrmethoden*** zusammensetzen.

Im Gegensatz zur Fahrweise, die immer einen ganzen Bereich einer Fahrt abdeckt, stellt der ***Fahrzustand*** eine Momentaufnahme dar, der z.B. die Zustände Stillstand, Beschleunigung, Halten der Geschwindigkeit, Rollen oder Bremsen annehmen kann. Der Fahrzustand wird häufig durch die zusätzliche Angabe von weiteren Parametern (z.B. Geschwindigkeit, Zugkraft, Beschleunigung etc.) präzisiert.

Die ***Fahrstrategie*** beschreibt das Verfahren, welche Fahrweise in Abhängigkeit von den äußeren Randbedingungen zu wählen ist.

Basis der Berechnung oder Simulation von Fahrweisen ist die ***Fahrdynamik***, die sich mit der Längsbewegung des Fahrzeuges im Gleis beschäftigt. In Anhang A werden die Grundlagen der Fahrdynamik beschrieben.

Zugfahrten können in Fahrschaulinien dargestellt werden. Üblicherweise wird hierbei die Zuggeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Ort dargestellt (Bild 1). Weiterhin ist die Darstellung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit (Bild 2) und die Darstellung als Zeit-Weg-Linie (Bild 3) gebräuchlich. Zeit-Weg-Linien werden in Deutschland aus historischen Gründen mit dem Ort auf der X-Achse und der Zeit auf der Y-Achse abwärts gerichtet dargestellt, während in vielen anderen Ländern die Achsen vertauscht sind. Alle Abbildungen stellen die gleiche Fahrt dar.

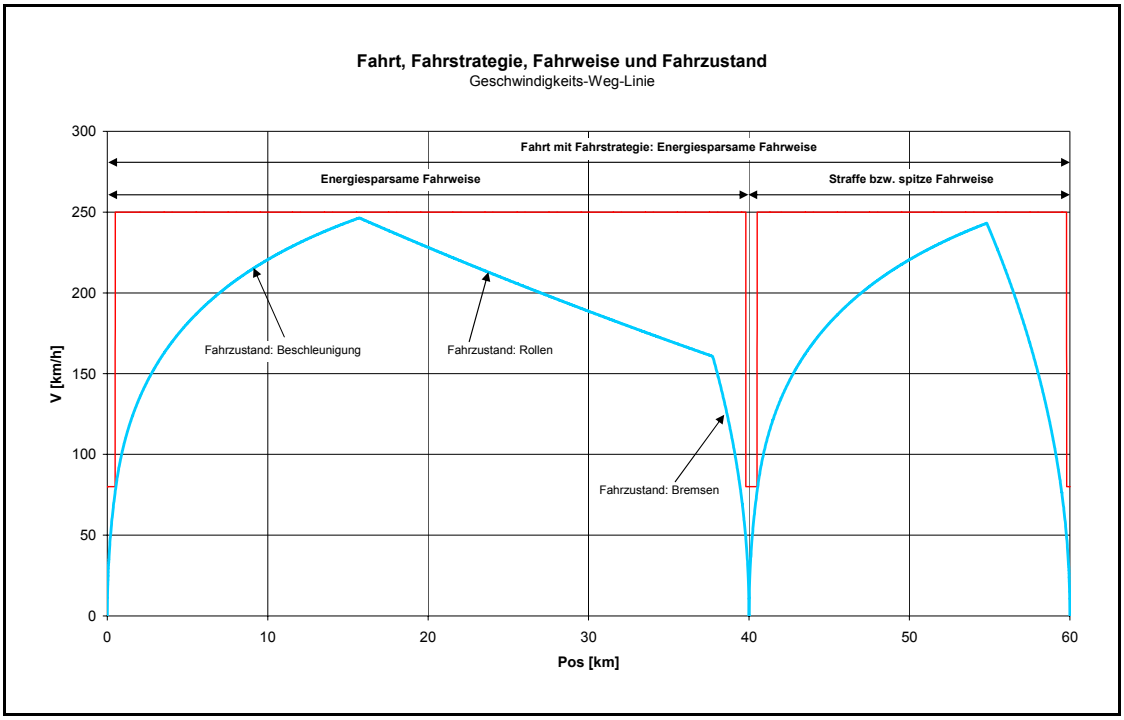


Bild 1: Geschwindigkeits-Weg-Linie

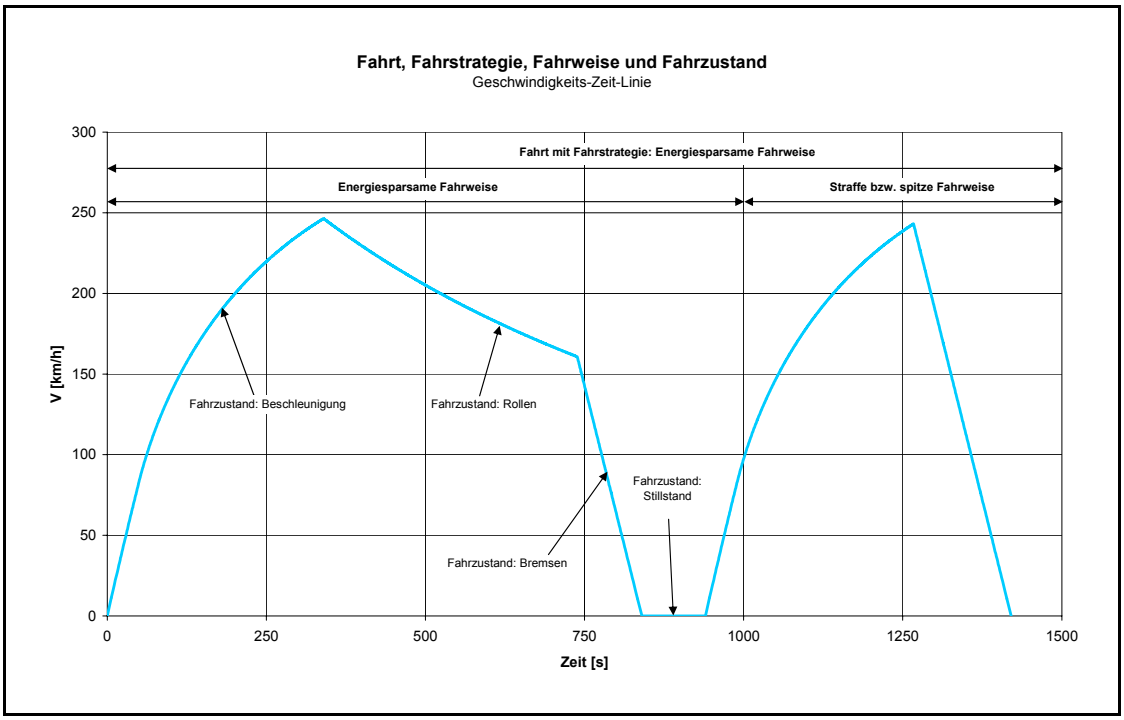


Bild 2: Geschwindigkeits-Zeit-Linie

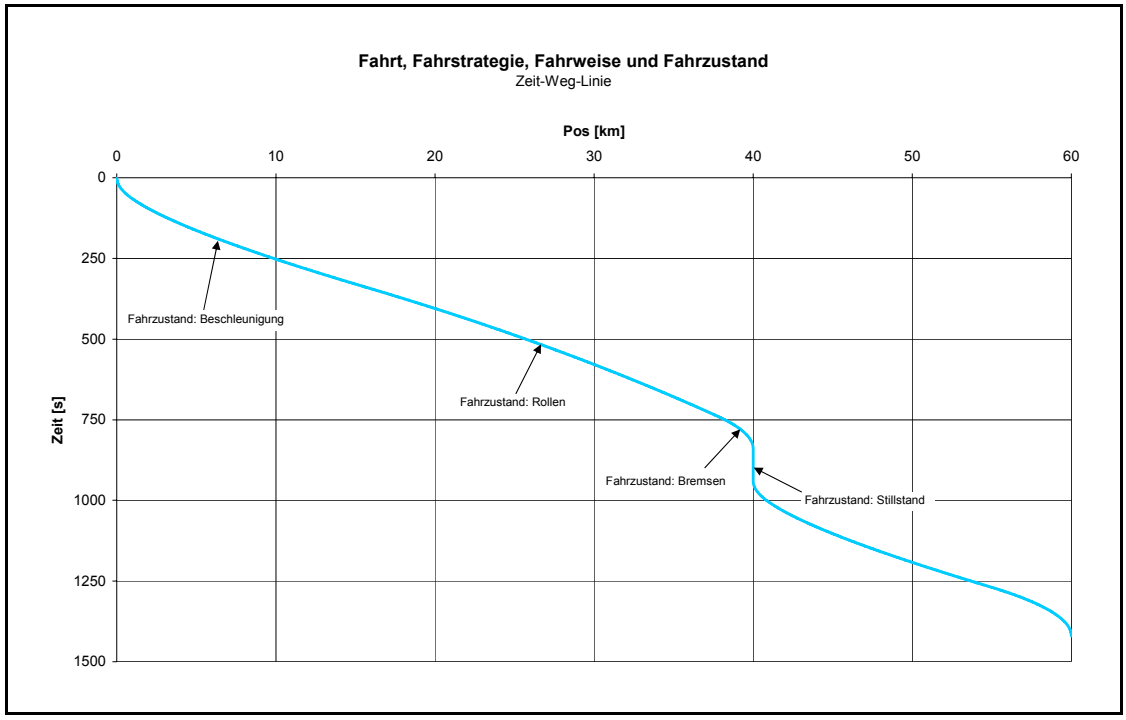


Bild 3: Zeit-Weg-Linie

Die einfachste Fahrweise zwischen zwei Orten besteht im Allgemeinen aus einer Beschleunigungsphase, einer Beharrungsphase mit konstanter Geschwindigkeit und einer Bremsphase. Wenn die Beschleunigungsphase direkt in die Bremsphase übergeht, nennt man dies auch ***spitze Fahrweise***.

Grundlage vieler Berechnungen, u.a. bei der Fahrzeitberechnung, ist die ***straffe Fahrweise (SFW)***. Hierbei beschleunigt das Fahrzeug mit maximaler Zugkraft auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit und hält diese, bis es mit der vorgesehenen Betriebsbremsverzögerung abbremst. Auf eine örtliche Änderung der zulässigen Streckenhöchstgeschwindigkeit reagiert das Fahrzeug jeweils mit maximaler Zugkraft bzw. vorgesehener Betriebsbremsverzögerung. Ausrollphasen werden nicht berücksichtigt. Die straffe Fahrweise führt zur kürzesten Fahrzeit, mit der ein Fahrzeug eine Strecke unter Berücksichtigung seiner Nennleistungsfähigkeit und der Streckenparameter befahren kann.

Im Gegensatz dazu werden bei der ***energiesparsamen Fahrweise (ESF)*** gezielt die im Fahrplan berücksichtigten Fahrzeitzuschläge für Maßnahmen zur Reduktion des Traktionsenergieverbrauchs genutzt, indem z.B. die Geschwindigkeit örtlich reduziert oder partiell gerollt wird. Später wird die energiesparsame Fahrweise ausführlich erläutert (→ Kapitel 3).

Während es sich sowohl bei der SFW als auch bei der ESF um theoretische Fahrweisen handelt, die zwar hervorragend berechnet oder simuliert, nicht aber exakt gefahren werden können, sollte in eine Bewertung immer nur die ***praktizierte Fahrweise (PFW)*** eingehen. Dieser Begriff ist als Oberbegriff für alle im realen Betrieb durchgeführten Fahrweisen zu sehen, d.h. es gibt nicht eine eindeutige PFW, sondern diese bezieht sich immer auf eine konkrete Fahrt unter festgelegten Bedingungen.

Während bei den theoretisch ermittelten Fahrweisen (spitz, straff und ESF) jeweils entsprechend den technischen Möglichkeiten des Triebfahrzeuges (Tfz) gefahren wird, wird bei der praktizierten Fahrweise häufig sowohl das Potenzial beim Beschleunigen als auch beim Abbremsen nicht voll ausgenutzt (Bild 4).

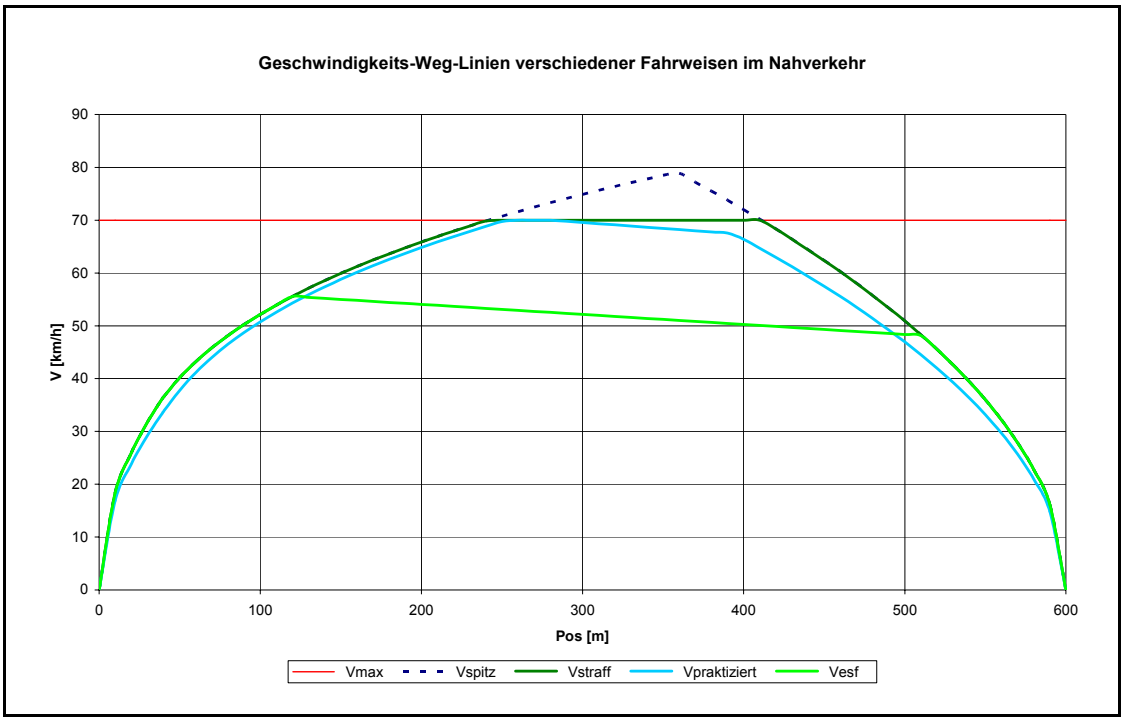


Bild 4: Geschwindigkeits-Weg-Linien verschiedener Fahrweisen im Nahverkehr

1.3 Motivation zur Optimierung von Fahrweisen

Wenn prinzipiell verschiedene Fahrweisen möglich sind, die die verkehrlichen und betrieblichen Voraussetzungen einhalten, stellt sich die Frage, welche dieser Fahrweisen am besten geeignet ist und wie diese realisiert werden kann.

Bei der Optimierung der Fahrweise ist zu unterscheiden, ob es sich um eine theoretische Optimierung, die sich in einer Soll-Fahrweise niederschlägt, oder um eine Online-Optimierung während der Fahrt handelt, bei der anhand der äußeren Randbedingungen eine Fahrweise bestimmt und sofort umgesetzt wird.

Die folgenden Ziele können eine Optimierung der Fahrweise motivieren:

- **Reduzierung des Energieverbrauchs**
  Der Energieverbrauch ist - vereinfacht ausgedrückt - abhängig von der Art und der Anzahl der Beschleunigungsvorgänge sowie der Höchstgeschwindigkeit. Energiesparsame Fahrweisen werden mittels gezielter Nutzung der unverbrauchten Fahrplanreserven durch Ausrollphasen oder örtlich variable Geschwindigkeitsreduzierungen verwirklicht.

Die Reduzierung des Energieverbrauchs kann sich sowohl auf die einzelne Fahrt, als auch auf das ganze Netz beziehen, indem z.B. die Nutzung der von bremsenden Fahrzeugen zurück gespeisten Energie durch andere Verbraucher optimiert wird.
Systeme zur Optimierung der Fahrweise hinsichtlich des Energieverbrauchs und der Pünktlichkeit sind weit entwickelt und werden später ausführlich behandelt (→ Kapitel 3 und 4).

- **Erhöhung der Pünktlichkeit**
  Ziel des Bahnbetriebs sollte immer eine pünktliche Abfahrt und Ankunft entsprechend dem betrieblichen oder verkehrlichen Fahrplan sein, so dass sich sowohl Kunden als auch die betrieblich relevanten Organe auf diesen verlassen können. Zur Unpünktlichkeit gehören neben der verspäteten Ankunft auch die auf den ersten Blick weniger kritische verfrühte Ankunft sowie die verspätete Abfahrt, da auch diese aus betrieblicher Sicht Einfluss auf das Gesamtsystem haben.
  Die Pünktlichkeit wird sowohl von äußeren Einflüssen (z.B. zu langer Fahrgastwechsel, ungeplante Streckenbelegung, Betriebsstörung) als auch vom Triebfahrzeugführer (Tf) beeinflusst. Bisher orientiert sich dieser bei der Wahl der Fahrweise am Buchfahrplan und an einer Uhr. Im Nahverkehr wird er dabei häufig durch das ***Integrierte Bordinformationssystem IBIS*** (→ Abschnitt 3.6.3.3) unterstützt, das jedoch keine echte Fahrempfehlung gibt, sondern lediglich Fahrplanabweichungen im 30 oder 60 s Raster anzeigt und dabei weder fahrdynamische Randbedingungen noch Langsamfahrstellen etc. berücksichtigt.

- **Reduzierung des Verschleißes**
  Der mechanische Verschleiß an Bremsen, Rädern und Schienen ist stark abhängig von der Fahrgeschwindigkeit sowie von Art und Anzahl der Brems- und Beschleunigungsvorgänge. Gelingt es, diese unter Berücksichtigung des Fahrplans und der Pünktlichkeit durch Anpassung der Fahrweise positiv zu beeinflussen, kann auch der Verschleiß reduziert werden, ohne dass es zu Reisezeitverlängerungen kommt.
  Das Verfahren zur Optimierung der Fahrweise hinsichtlich des Verschleißes ist ähnlich dem Verfahren zur Reduktion des Energieverbrauchs, da die gleichen Faktoren zu einer Veränderung führen, so dass energiesparsame Fahrweisen häufig auch zur Reduktion des Verschleißes führen.

- **Erhöhung der Strecken- oder Knotenleistungsfähigkeit**
  Die Strecken- und Knotenbelastung ist in komplexen Bahnnetzen häufig inhomogen, d.h. an einigen wenigen Knotenpunkten kommt es zu Engpässen, während andere Abschnitte Kapazitätsreserven aufweisen. Dies ist besonders im Bereich der Zu- und Ablaufstrecken von Knotenbahnhöfen des integralen Taktfahrplans zu beobachten.
  Bei der Fahrplangestaltung wird darauf geachtet, dass auf allen Abschnitten oder Knoten Kapazitätsreserven vorhanden sind. Schon kleine Störungen können sich als umfangreiche Behinderungen auswirken. Da dann einige Züge anhalten und bei freier Strecke wieder anfahren müssen, kommt es zu einem Fahrzeitverlust und damit zu einer längeren Belegungszeit des ohnehin überlasteten Abschnitts.

Dispositive Systeme können diese Konflikte schon im Voraus erkennen und Lösungsvorschläge berechnen. Bei geeigneter Information- und Kommunikationsstruktur können den Triebfahrzeugführern in betroffenen Fahrten differenzierte Solldurchfahrtszeiten und Sollgeschwindigkeiten vorgegeben werden, die dann durch eine geeignete Fahrweise umzusetzen sind. So kann z.B. das Anhalten vor dem Signal durch eine rechtzeitige Geschwindigkeitsreduzierung weit vor dem Signal verhindert werden. Dies führt zu einer Verstetigung des Betriebes und damit zu einem höheren Durchsatz.

- **Reduzierung der Lärmabstrahlung an empfindlichen Stellen**
  Die Lärmemission von Schienenfahrzeugen ist u.a. abhängig von der Geschwindigkeit (aerodynamischer Schall), dem Antriebszustand (Motor- und Lüftergeräusche) und dem Bremszustand (Bremsquietschen, u.a. abhängig von der Bremsart). Während die Lärmbelastung auf der freien Strecke über Land normalerweise nicht so bedeutend ist, ist sie im bewohnten Bereich und in Naturschutzgebieten sehr entscheidend. In besonders belasteten Gebieten wird versucht, durch konstruktive Maßnahmen an der Strecke (z.B. Lärmschutzwände) die Lärmbelastung für die Anwohner zu senken. In Gebieten, wo dies aus geografischen, optischen oder finanziellen Gründen nicht möglich ist oder die Lärmbelastung noch weiter gesenkt werden soll, kann dies auch durch eine Anpassung der Fahrweise geschehen.
  Durch die Verlagerung von Beschleunigungs- oder Bremsphasen außerhalb des kritischen Streckenteils oder durch eine örtliche Reduzierung der Geschwindigkeit kann die Lärmemission örtlich reduziert werden. Wenn diese Optimierung dynamisch in Abhängigkeit von der aktuellen Betriebslage onboard durchgeführt wird, können ständige Fahrzeitverlängerungen und reduzierte Leistungsfähigkeit weitestgehend ausgeschlossen werden.

- **Reduzierung der Belastung des Triebfahrzeugführers**
  Komplexe Strecken mit häufigen Geschwindigkeitswechseln, knapp kalkulierte Fahrpläne und ein hohes Verspätungsniveau führen schnell zu einer hohen physischen und psychischen Belastung des Tf. Automatisierte Systeme zur Optimierung der Fahrweise können ihn dabei entlasten, indem ihm zumindest der regelmäßige Soll-Ist-Fahrplanvergleich abgenommen wird und davon abgeleitet eine Fahrempfehlung gegeben wird (→ Abschnitt 2.5 und 4.6.1).

Die Vielfalt an Gründen oder Motiven zur Optimierung der Fahrweise ist groß. Häufig ist es jedoch ein Gesamtoptimum, das erreicht werden soll, d.h. unter gewissen Randbedingungen (z.B. Reisezeit) sollen mehrere Faktoren mit unterschiedlichen Prioritäten berücksichtigt werden.

1.4 Kategorisierung von Einflüssen auf die Fahrweise

Bevor Lösungen zur Optimierung der Fahrweise entwickelt werden, müssen zunächst die Einflüsse auf die Fahrweise ermittelt werden. Jede Zugfahrt ist von verschiedenen Faktoren geprägt, die eine Fahrweise beeinflussen. Diese können nach verschiedenen Gesichtspunkten kategorisiert werden.

Zunächst kann nach dem Ursprung des Einflusses unterschieden werden:

- fahrzeugseitige Einflüsse,
- fahrwegseitige Einflüsse,
- betriebliche Einflüsse (inkl. Zugfolge) und
- verkehrliche Einflüsse.

Ein weiterer Aspekt zur Kategorisierung ist die Art der Einflussnahme, d.h. das System welches beeinflusst wird:

- Einfluss auf die Fahrdynamik,
- Einfluss auf die Möglichkeit der Fahrzeugsteuerung und
- Einfluss auf das Grenzprofil der Zugfahrt, d.h. auf die ortsabhängige maximale Momentangeschwindigkeit des Tfz.

Anhand der Zusammenfassung der wesentlichen Einflussfaktoren (Tabelle 2) zeigt sich, dass eine klare Einteilung häufig nicht möglich ist, da einige Einflussfaktoren mehrere Ursprünge haben oder auf mehrere Kategorien Einfluss nehmen.

Einflussfaktor	Kriterien	Ursprung des Einflusses				Art der Einflussnahme		
		fahrzeugseitig	fahrwegseitig	betrieblich	verkehrlich	Fahrdynamik	Fahrzeugsteuerung	Einschränkung des Grenzprofils
Fahrzeugdaten	• Antriebs- und Bremsdaten • Masse • Länge • Bremshundertstel	X				X	(X)	(X)
Zulässige Fahrzeughöchst-geschwindigkeit	u. U. auch ladungsabhängig	X			(X)			X
Fahrzeugsteuerung	• Fahr- und Bremsstufen • Schaltzeiten • Art der Steuerung (manuell, automatisch)	X					X	(X)
Triebfahrzeugführer	bei manueller Steuerung	X					X	
Rad-Schiene-Kontakt	z.B. Schlupf, Gleiten	(X)	(X)			(X)	(X)	(X)
Strecken-Topografie	• Neigungen • Krümmungen • Tunnel		X			X		
Zulässige Streckenhöchst-geschwindigkeit			X	(X)				X
Zugfolgeeinrichtungen	• Signale (ortsfest oder Führerraumsignalisierung) • Vorausfahrendes Fahrzeug (bei Fahrt auf Sicht)			X	(X)			X

Tabelle 2: Einflussfaktoren auf die Fahrweise
Einflüsse, die mit (X) markiert sind, sind indirekt bzw. sekundär

Im Folgenden werden die wesentlichen Komponenten erläutert und deren Einfluss auf die zu realisierende Fahrweise beschrieben.

1.5 Fahrzeuge

Die Bandbreite der möglichen Fahrweisen ist entscheidend von der Fahrdynamik abhängig und damit auch vom Spektrum der eingesetzten Fahrzeuge. Fahrzeugseitig haben großen Einfluss das Antriebs- und das Bremssystem sowie die fahrdynamisch relevanten Daten wie Länge, Masse, Massenverteilung und die Laufwiderstandsparameter (Tabelle 3).

	Einfluss auf die Fahrweise	Verweise
Fahrzeug-Komponente		
Antriebsart	Fahrdynamik	→ Anhang A.1.2.2
	Antriebssteuerung	→ Abschnitt 2.2
	Verbrauch / Einsparpotenzial	→ Abschnitt 3.4
Bremsart	Fahrdynamik	→ Anhang A.1.2.4
	Bremssteuerung	→ Abschnitt 2.3
	Rückspeisefähigkeit	→ Abschnitt 3.4
Fahrzeugsteuerung	Fahr- und Bremsstufen	→ Abschnitt 2.1
Rad-Schiene-Kontakt	Fahrdynamik	→ Anhang A.1.2.2
Fahrzeugdaten		
Länge	Fahrdynamik	→ Anhang A.1.2.9
	Haltepunkt am Bahnsteig	→ Abschnitt 2.4.1
Masse, Masseverteilung	Fahrdynamik	→ Anhänge A.1.1, A.1.2.9
Fahrdynamische Grenzwerte	Fahrdynamik	→ Anhang A.2.3
Bremshundertstel	Fahrdynamik	→ Anhang A.1.2.5
Wirkungsgrad Antrieb und Rückspeisung	Energieverbrauch	→ Abschnitt 2.2.2

Tabelle 3: Fahrzeugseitige Einflüsse auf die Fahrweise

1.6 Infrastruktur

Zur Infrastruktur gehören alle ortsfesten Bahnanlagen, wobei im Zusammenhang mit der Fahrweise insbesondere die topografischen Streckendaten wie Neigungen und Krümmungen sowie die örtlichen Höchstgeschwindigkeiten von Bedeutung sind (Tabelle 4). Die ebenfalls zur Infrastruktur gehörenden Systeme der Leit- und Sicherungstechnik werden gesondert behandelt (→ Abschnitt 1.7).

	Einfluss auf die Fahrweise	Verweise
Topografie		
Neigung	Fahrdynamik (Hangabtriebskraft)	→ Anhang A.1.2.3
	Fahrstrategie	→ Abschnitt 3.1
Krümmung	Fahrdynamik (Bogenwiderstand)	→ Anhang A.1.2.8
Tunnel	Fahrdynamik (Tunnelwiderstand)	→ Anhang A.1.2.7
Sonstige Infrastrukturdaten		
Höchstgeschwindigkeit (ggf. abhängig von Fahrzeugausrüstung), Bahnübergänge	Fahrdynamik (insb. Luftwiderstand)	→ Anhang A.1.2.6
	Fahrstrategie	→ Abschnitt 3.1
Temporäre Langsamfahrstellen	Fahrstrategie	→ Abschnitt 3.1
Stationen	Haltepunkt am Bahnsteig	→ Abschnitt 2.4.1
	Fahrdynamik (Geschwindigkeits-begrenzung) am Bahnsteig	→ Anhang A.2.3

Tabelle 4: Infrastrukturseitige Einflüsse auf die Fahrweise

1.7 Leit- und Sicherungstechnik

Einen häufig unterschätzten oder nur pauschal behandelten Einfluss auf die Fahrweise haben die Systeme der Leit- und Sicherungstechnik. Letztendlich sind sie es, die eine Zugfahrt erst ermöglichen. Sie haben einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Strecke und damit auch auf eine unbehinderte Zugfahrt.

1.7.1 Sicherungstechnik

Die Eisenbahn-Sicherungstechnik ist für die Sicherheit im Bahnbetrieb, d.h. nach DIN 31004 für das Freisein von Gefährdung, verantwortlich.

Der Fahrweg von Zugfahrten muss signaltechnisch gesichert sein (Fahrstraße). Dies bedeutet, dass alle zu überfahrenden Weichen und Flankenschutzeinrichtungen verschlossen und gegeneinander festgelegt sind, der gesamte Fahrweg inkl. des Durchrutschwegs vollends frei ist und alle sonstigen technischen Einrichtungen (z.B. Bahnübergänge, bewegliche Brücken) die Fahrt ermöglichen. Durch den Ausfall eines Sicherungssystems darf keine Gefahr, sondern höchstens eine Behinderung ausgehen.

Einen Sonderfall stellt das Fahren auf Sicht dar, wie es z.B. bei Straßenbahnen häufig realisiert wird. Hier ist der Tf alleine für die Zugfolgeregelung verantwortlich und wird dabei höchstens teilweise von technischen Einrichtungen unterstützt.

Zur Sicherungstechnik gehören u.a. die Abstandsregelung zwischen zwei Zugfahrten auf derselben Strecke in derselben Richtung (Zugfolge), die Verhinderung von Flankenfahrten, das Absichern von Durchrutschwegen und die Verhinderung der Einfahrt zweier Züge aus beiden Richtungen in eine eingleisige Strecke. Die Erlaubnis, in einen oder mehrere

Fahrwegsabschnitte einzufahren, wird dem Tf üblicherweise über ortsfeste Signale oder fahrzeugseitige Einrichtungen (Führerraumsignalisierung) erteilt. Im Falle des automatischen Betriebs ist eine punktuelle oder kontinuierliche Übertragung der Signalbegriffe nötig. Die Aufgabe der Fahrzeugsteuerung wird dann von einem fahrzeugseitigen signaltechnisch sicher auszulegenden Gerät übernommen, das die übertragenen Signalbegriffe verarbeitet.

Die Erlaubnis zum Befahren eines Abschnitts kann durch zusätzliche Signale eingeschränkt werden (z.B. durch eine Geschwindigkeitsbegrenzung).

Die Grundlagen der Sicherungstechnik und der Zugfolge sowie die dazu verwendeten Anlagen werden in der Literatur eingehend behandelt, u.a. in [Pachl-2002], [Fenner-1998] und [Hausmann-2000], so dass hier nur die Aspekte zusammengefasst werden, die einen Einfluss auf die Fahrweise haben.

Die Zugfolge bzw. die Sicherungstechnik hat immer dort einen Einfluss auf die Fahrweise, wo es durch diese zu Einschränkungen bezüglich der Weiterfahrt oder bezüglich der erlaubten Geschwindigkeit kommt. Sofern diese Einschränkung statisch oder vor der Fahrt schon bekannt ist, kann sie in der Soll-Fahrweise berücksichtigt werden. Wenn sie jedoch vorher nicht bekannt ist, kommt es zwangsläufig zu einer Abweichung von Soll- und Ist-Fahrweise. Dies macht eine Optimierung der Fahrweise schwieriger oder gar unmöglich. Wenn eine regelmäßige Beeinträchtigungen der Fahrt durch Einschränkungen aus der Sicherungstechnik zu erwarten ist, kann die Berücksichtigung dieser Einschränkungen in der Fahrtoptimierung sinnvoll sein. Hierzu sind bei theoretischen Untersuchungen die zu erwartenden Beeinträchtigungen statistisch zu berücksichtigen. Im realen Betrieb kann die Integration von Informationen aus der Zugbeeinflussung einen Beitrag zur Verbesserung der Fahrweise leisten.

1.7.2 Zugbeeinflussung

Die Zugbeeinflussung (Automatic Train Protection – ATP) ist eine Sicherungseinrichtung, die Daten über die erlaubte Fahrweise vom Fahrweg oder von der Zentrale zum Zug überträgt und bei Abweichungen von der erlaubten Fahrweise eingreift.

Grundsätzlich wird zwischen punktförmiger und kontinuierlicher Zugbeeinflussung unterschieden, wobei auch Mischformen möglich sind.

In Deutschland fordert der Gesetzgeber in der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) § 15 [EBO-1992]:

> (2) Strecken, auf denen mehr als 100 km/h zugelassen sind, müssen mit Zugbeeinflussung ausgerüstet sein, durch die ein Zug selbstständig zum Halten gebracht werden kann.
>
> (3) Strecken, auf denen mehr als 160 km/h zugelassen sind, müssen mit Zugbeeinflussung ausgerüstet sein, durch die ein Zug selbstständig zum Halten gebracht werden und außerdem geführt werden kann.

Diese Forderungen sind im Geschwindigkeitsbereich 100 bis 160 km/h durch punktförmige, bei darüber liegenden Geschwindigkeiten mit kontinuierlichen Zugbeeinflussungsanlagen erfüllbar.

EBO § 28 enthält die entsprechende Forderung des Gesetzgebers für die Ausrüstung der Fahrzeuge mit der zusätzlichen Maßgabe, dass eine Ausrüstung des Fahrzeuges auch dann erforderlich ist, wenn seine zulässige Geschwindigkeit zwar nur bis 100 km/h beträgt, es jedoch überwiegend auf Strecken mit Zugbeeinflussung verkehrt. Kleinlokomotiven sind von dieser zusätzlichen Forderung ausgenommen [Hausmann-2000].

Ein Sonderfall der Zugbeeinflussung ist das European Train Control System (ETCS), da die Zugbeeinflussung hierbei nur eine Komponente des gesamten Systems darstellt. Es wird deshalb getrennt von den anderen Systemen dargestellt.

Aus Sicht der Echtzeitoptimierung von Zugfahrten können Zugbeeinflussungssysteme nur dann zur Verbesserung der Fahrweise führen, wenn die Informationen über Restriktionen rechtzeitig vor deren Inkrafttreten signalisiert werden, so dass z.B. eine Rollphase vor der Bremsung eingelegt werden kann.

1.7.2.1 Punktförmige Zugbeeinflussung (PZB)

Bei der punktförmigen Zugbeeinflussung erfolgt die Informationsübertragung zwischen Gleis und Fahrzeug an diskreten, fest vorgegebenen Punkten, z.B. an Vorsignalen, Hauptsignalen, Geschwindigkeitsüberwachungspunkten oder Bahnübergängen.

Bei den punktförmigen Zugbeeinflussungssystemen herrscht eine große Vielzahl an unterschiedlichen Übertragungsverfahren und unterschiedlichen Betriebsprogrammen. Die Spannweite reicht von der mechanischen „Fahrsperre“ bei der Berliner S-Bahn über die im Bereich der DB AG verwendete induktive Zugsicherung (Indusi) mit ihrem Nachfolger PZB 90 bis hin zu Datenübertragungssystemen auf Transponderbasis wie den Systemfamilien ZUB 100 und ZUB 200 von Siemens. Die Funktionsweise und die zugehörigen Betriebsprogramme der unterschiedlichen Systeme sind in der Literatur hinreichend beschrieben, u.a. in [Pachl-2002], [Fenner-1998] und [Hausmann-2000].

Die Komponenten der punktförmigen Zugbeeinflussungssysteme sind normalerweise ortsnah zu der Restriktion installiert bzw. nahe dem Punkt, an dem auf die folgende Restriktion gehandelt werden muss. Deshalb können deren Informationen kaum noch zur Optimierung der Fahrweise genutzt werden. Dagegen können moderne Verfahren auf Transponderbasis hervorragend zur Ortssynchronisation verwendet werden (→ Abschnitt 3.5.1.4).

1.7.2.2 Linienzugbeeinflussung (LZB)

Die kontinuierliche Zugbeeinflussung wird zurzeit in Deutschland noch überwiegend in Form der Linienzugbeeinflussung LZB 80 auf Basis eines im Gleis verlegten Linienleiters realisiert (Bild 5). Hierbei dient der Linienleiter zum einen als Kommunikationsmedium der Zugbeeinflussung zwischen Fahrzeug und Zentrale und zum anderen zur Ortsbestimmung des Fahrzeuges (→ Abschnitt 3.5.1.3).

Der Systemaufbau und das zugehörigen Betriebsprogramme der LZB sind in der Literatur hinreichend beschrieben, u.a. in [Murr-1991], [Pachl-2002], [Fenner-1998] und [Hausmann-2000].

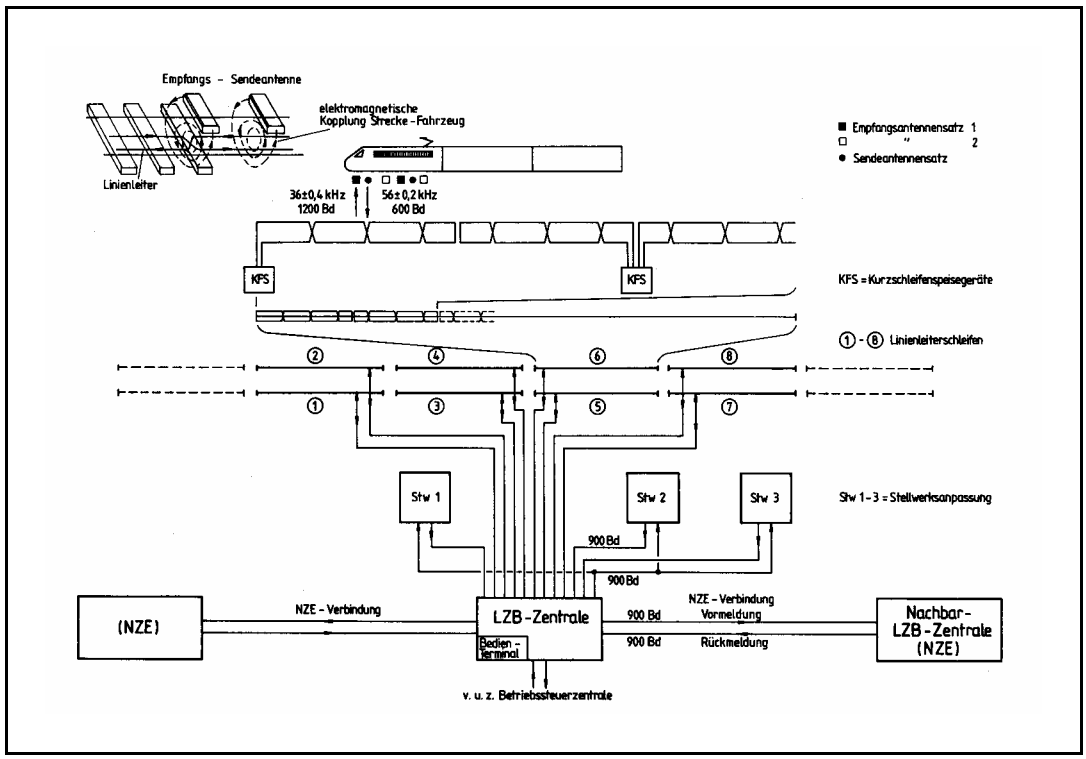


Bild 5: LZB-Prinzipübersicht [Murr-1991]

Die LZB hat gegenüber einer punktförmigen Zugbeeinflussung den Vorteil, dass sie nicht nur zur Überwachung des Tf dient, sondern dass sie auch zur Führung des Zuges verwendet werden kann. Hierzu wird von der Zentrale der sog. Vorschaubereich (10 km) vor dem Fahrzeug überwacht. Gleichzeitig werden alle Informationen über Streckenbelegung und Geschwindigkeitsrestriktionen in diesem Bereich an das Fahrzeug kontinuierlich übertragen. Durch die Führerraumsignalisierung dieser Informationen kann die Außensignalisierung präzisiert oder gar überflüssig gemacht werden. In der Multifunktionsanzeige MFA (Bild 6) wird die aktuelle Sollgeschwindigkeit mit einem roten Zeiger im Geschwindigkeitsmesser (rechts) angezeigt. Der Abstand zur nächsten relevanten Geschwindigkeitsbeschränkung wird durch ein Entfernungsband und eine Digitalanzeige in der Mitte der MFA angezeigt. Die Zielgeschwindigkeit wird digital im unteren Bereich des Geschwindigkeitsmessers eingeblendet.

Durch Nutzung der Informationen aus dem Vorschaubereich kann die Fahrweise den Restriktionen angepasst werden, d.h. die Optimierung der Fahrweise beruht nicht mehr auf statischen Solldaten, sondern kann mit dynamischen Zusatzinformationen deutlich aufgewertet werden.

Bild 6: Multifunktionsanzeige (MFA) der BR 185 in Displaytechnologie [EiB-2003]

1.7.3 European Train Control System (ETCS)

Der grenzüberschreitende europäische Eisenbahnverkehr ist bisher durch eine hohe Zahl unterschiedlicher Zugsicherungs- und Zugbeeinflussungssysteme geprägt, so dass grenzüberschreitende Triebfahrzeuge mit einer Vielzahl entsprechender Systemkomponenten ausgestattet sein müssen. Zur Vereinfachung dieses Verkehrs und zur Vereinheitlichung der Systeme sowie zur Steigerung von Sicherheit und Leistungsfähigkeit wurde von den UIC-Bahnen in Zusammenarbeit mit der Industrie ab 1992 das ***European Train Control System (ETCS)*** entwickelt. Es ist Bestandteil des neuen Betriebsleitsystems der europäischen Bahnen ***European Rail Traffic Management System (ERTMS)***. ETCS und ERTMS sind noch in Entwicklung, erste Pilotstrecken werden jedoch schon damit betrieben. Die Systeme wurden in der Literatur bereits ausführlich beschrieben, u.a. in [Pachl-2000] und [SFWBB-2001a], so dass hier nur auf die Grundsätze und die Besonderheiten bezüglich der Fahrweisen eingegangen wird.

Die wesentlichen technischen Komponenten des ETCS sind:

- ***EURO-Balise***:
  Die EURO-Balise ist ein transponderbasiertes System zur punktförmigen Datenübertragung von Telegrammen vom Fahrweg zum Fahrzeug. Man unterscheidet Festdatenbalisen, die ausschließlich feste Telegramme mit Ortungsinformationen versenden, und transparente Balisen, die variable Telegramme, z.B. Signalbegriffe, versenden können.

- ***EURO-Loop***:
  Die EURO-Loop ist ein örtlich begrenztes linienförmiges Datenübertragungssystem ähnlich des Linienleiters der LZB. Es werden ähnliche Daten wie bei der transparenten Balise übertragen. Die EURO-Loop bewirkt eine Erhöhung der betrieblichen Leistungsfähigkeit hauptsächlich dadurch, dass eine Geschwindigkeitsaufwertung zur Befreiung aus einer Bremskurvenüberwachung sofort dem Fahrzeug übermittelt wird, wenn der folgende Streckenabschnitt wieder frei ist.

- ***EURO-Radio***:
  EURO-Radio ist für die Datenübertragung zwischen Fahrzeug und Zentrale zuständig. Es basiert auf einer sicheren und standardisierten GSM-Verbindung (GSM-R) im 900 MHz-Frequenzbereich. Die Integrität und die Authentizität der Datenübertragung sind durch die Verwendung kryptografischer Verfahren gewährleistet. Sie kann in beide Richtungen mit der gleichen Leistungsfähigkeit erfolgen.

- ***EURO-Cab***:
  EURO-Cab ist eine standardisierte Fahrzeugeinrichtung, deren Elemente über einen ***ETCS-Bus*** mit dem sicheren Fahrzeugrechner ***European Vital Computer (EVC)*** verbunden sind.

Ein mit ETCS aufgerüstetes Fahrzeug hat einen EVC und Empfangseinrichtungen für EURO-Radio, EURO-Balise und EURO-Loop, die mit dem ETCS-Bus verbunden sind (Bild 7). Wenn das Fahrzeug auch Strecken ohne ETCS-Ausrüstung verkehren soll, sind die dort nötigen Zugbeeinflussungskomponenten zusätzlich zu berücksichtigen (z.B. LZB, PZB).

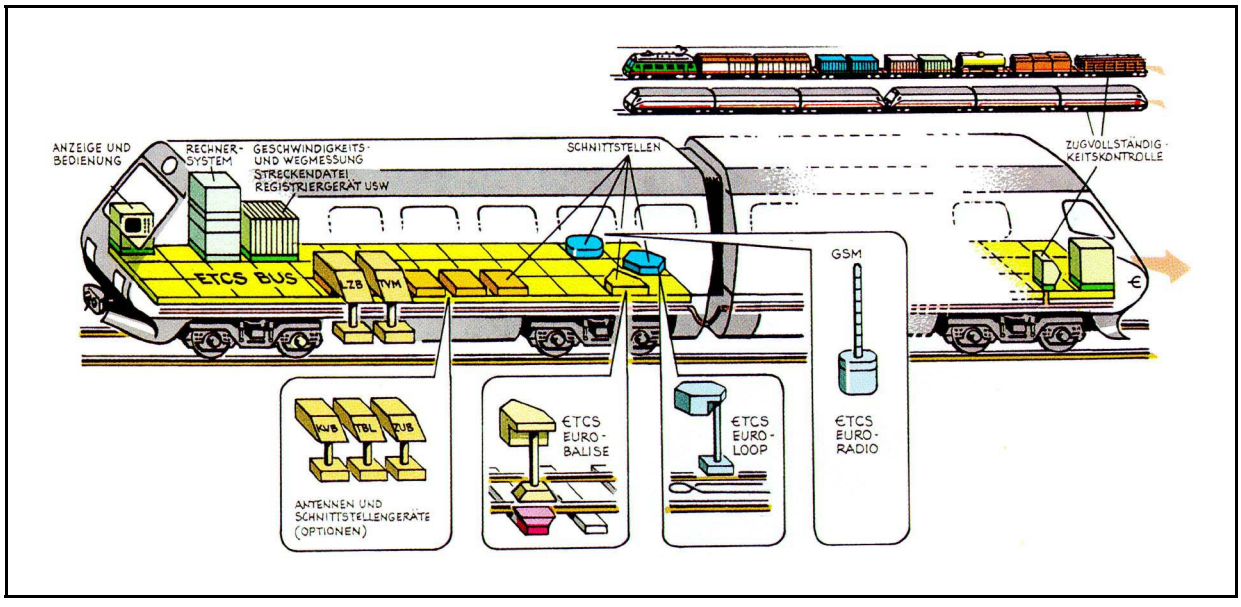


Bild 7: ETCS-Komponenten [SFWBB-2001a]

Es sind drei unterschiedliche ETCS-Funktionsstufen (auch Levels genannt) definiert, die sich nicht nur hinsichtlich ihrer Aufgaben sowie ihrer Komplexität unterscheiden, sondern auch hinsichtlich ihres Einflusses auf die Fahrweise sowie ihrer Eignung als Informationslieferant zur Optimierung der Fahrweise.

1.7.3.1 ETCS Level 1

Die niedrigste Funktionsstufe entspricht weitestgehend einer klassischen Zugbeeinflussung, die jedoch europaweit harmonisiert wurde. ETCS Level 1 wird einem vorhandenen klassischen ortsfesten Signalsystem überlagert. Es gibt keine Führerstandssignalisierung, die Funk-Datenübertragung EURO-Radio ist optional und wird nur selten verwendet (Bild 8).

Zur Informationsübertragung dienen schaltbare EURO-Balisen, die bei Bedarf durch EURO-Loop ergänzt werden. Die für die punktförmige Zugbeeinflussung benötigten Informationen werden über Anpassungsbaugruppen aus der bestehenden Sicherungstechnik abgegriffen.

Durch die gegenüber der klassischen PZB nur geringen Vorteile von ETCS Level 1 planen bisher nur einige Transitländer (z.B. Luxemburg, Österreich und die Schweiz) eine Umrüstung von einer nationalen PZB auf ETCS Level 1. Bei neuen Systemen oder bei Systemen, die bisher schon auf Transponderbasis arbeiten und die an ETCS anpassbar sind, kann die Einführung von ETCS Level 1 sehr interessant sein. So plant die Berliner S-Bahn, die bisher nur eine mechanische Fahrsperre hat, die Einführung eines Systems, ähnlich ETCS Level 1.

Hinsichtlich des Einflusses auf die Fahrweise und den Möglichkeiten zur Nutzung dieser Informationen zur Optimierung der Fahrweise entspricht ETCS Level 1 weitestgehend der klassischen punktförmigen Zugbeeinflussung, d.h. die Optimierung der Fahrweise kann höchstens in einem örtlich sehr begrenzten Bereich durch die Nutzung dieser Informationen aufgewertet werden. Die Balisen eignen sich jedoch sehr gut zur Ortsbestimmung (→ Abschnitt 3.5.1.4).

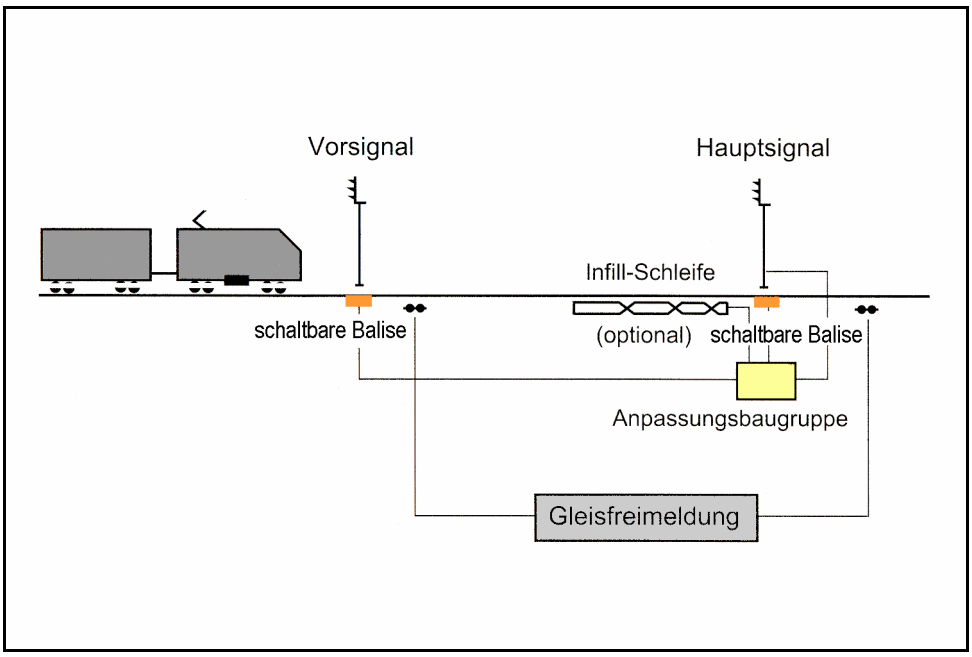


Bild 8: ETCS Level 1 [Pachl-2000]

1.7.3.2 ETCS Level 2

Auch ETCS Level 2 basiert auf der klassischen blockorientierten Gleisfreimeldung, verfügt jedoch über eine Führerstandsignalisierung. Es entspricht von der betrieblichen Funktionalität in etwa einer Linienzugbeeinflussung, als Informationsübertragungsmedium wird jedoch EURO-Radio benutzt. Die Züge orten sich durch Ortungsbalisen und Koppelsensorik selbst

und melden ihren Standort in festgelegten Intervallen per Funk (GSM-R). Die Fahrerlaubnis wird von der Zentrale unter Berücksichtigung des Standortes und der Gleisfreimeldung dann per Funk an das Fahrzeug gesendet (Bild 9). Ortsfeste Signale sind nicht mehr erforderlich, können jedoch als Rückfallebene vorgesehen werden.

Die meisten der derzeitigen europäischen ETCS Pilotstrecken basieren auf ETCS Level 2, da hier der Nutzen in Relation zum Aufwand am besten ist.

Bei ETCS Level 2 können die Informationen der aktuellen Fahrerlaubnis ähnlich der LZB zur Optimierung der Fahrweise verwendet werden. EURO-Radio als universelles Zugfunksystem bietet sich hierüber hinaus als Kommunikationsmedium zwischen Betriebsleittechnik und Fahrzeug an, so dass die Zugfahrt bei entsprechender Betriebsleittechnik sogar über einen größeren Zeit- und Ortshorizont optimiert werden kann (→ Abschnitt 1.7.4).

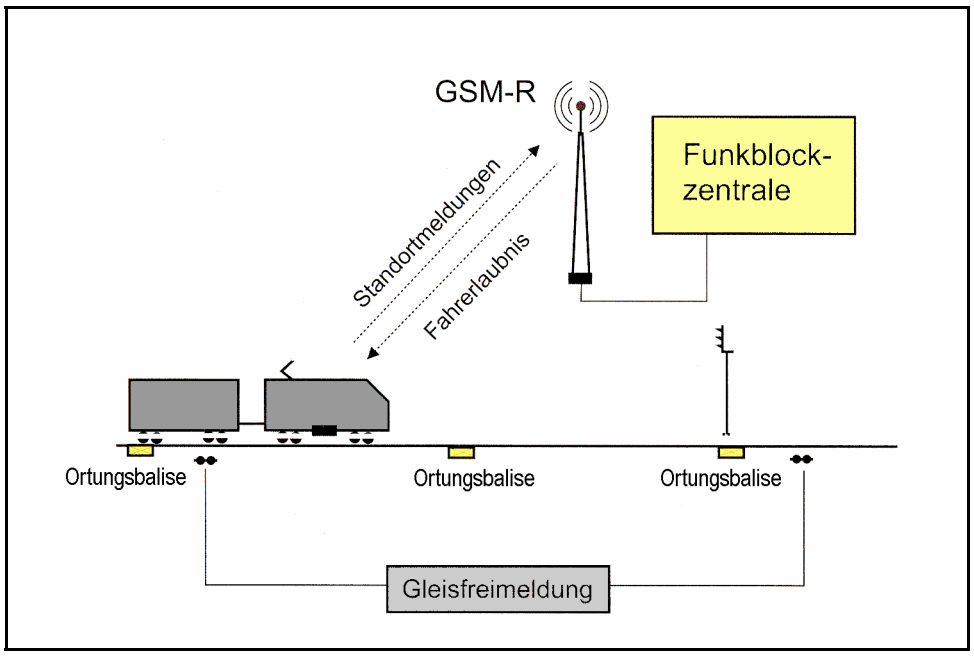


Bild 9: ETCS Level 2 [Pachl-2000]

1.7.3.3 ETCS Level 3

In ETCS Level 3 kann durch die fahrzeugautonome Zugvollständigkeitsüberprüfung in Zusammenhang mit der Fahrzeugortung über Balisen und Koppelsensorik auf eine stationäre Gleisfreimeldung und auf Streckensignale vollständig verzichtet werden (Bild 10). Somit handelt es sich nicht nur um ein Zugbeeinflussungssystem, sondern um ein komplettes Zugsicherungssystem mit vollwertiger funkbasierter Abstandssicherung. Wenn bei hinreichend kurzen Ortungsintervallen eine quasikontinuierliche Fahrwegsfreigabe erreicht wird, nähert sich die Abstandshaltung dem Prinzip des Fahrens im absoluten Bremswegabstand. Durch das Fehlen der klassischen Gleisfreimeldeanlagen können auf diesen Strecken nur noch Züge mit vollständiger ETCS Level 3 Ausrüstung verkehren. Aus diesem Grund ist auch die Installation von ortsfesten Signalanlagen als Rückfallebene nicht möglich.

ETCS Level 3 wird zurzeit noch nicht realisiert, da für die Zugvollständigkeitsprüfung bei Güterzügen noch keine befriedigende Lösung gefunden wurde.

Hinsichtlich der Optimierung der Fahrweise ergibt sich gegenüber ETCS Level 2 durch die quasikontinuierliche Fahrwegsfreigabe noch die Möglichkeit, das „Auffahren“ auf einen vorausfahrenden Zug zu erkennen und dies in die Optimierungsstrategie mit einzubeziehen.

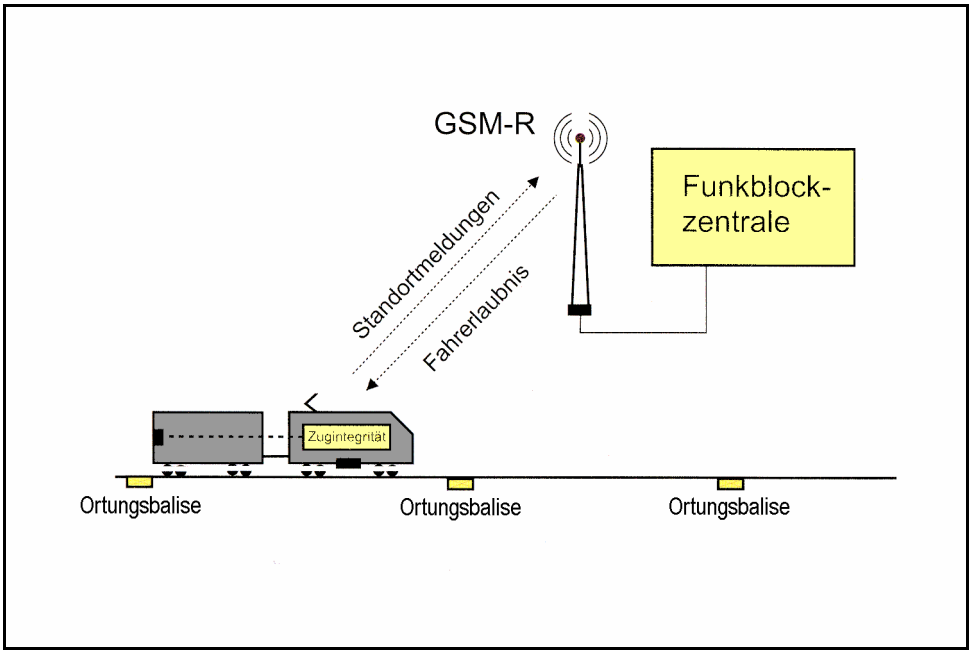


Bild 10: ETCS Level 3 [Pachl-2000]

1.7.4 Betriebsleittechnik

Die Betriebsleittechnik fasst alle technischen Einrichtungen zusammen, die an der betriebslenkenden Stelle über den Prozesszustand informieren und von dieser Stelle, meist unter Nutzung der Sicherungstechnik, die Einflussnahme auf den Prozessablauf gestatten. Zur Betriebsleittechnik gehören u.a. die Zugnummernmelde- und Zuglaufüberwachungsanlagen, die Komponenten zur Konflikterkennung sowie alle Systeme zur Dispositionshilfe.

Die Betriebsleittechnik kann einen wertvollen Beitrag zur Optimierung von Fahrweisen leisten, da hier im Gegensatz zur Sicherungstechnik vorausschauende Entscheidungen getroffen werden. Werden die vom Disponenten oder dem System zur automatischen Konfliktminimierung getroffenen Entscheidungen hinsichtlich der Zugreihenfolge direkt zum Fahrzeug gesendet, kann diese Information zur Optimierung der Fahrweise genutzt werden, bevor das Fahrzeug auf den Konfliktpunkt zufährt. Zur Informationsübertragung können die Systeme der Sicherungstechnik verwendet werden, sofern entsprechende Telegramme definiert sind oder ein universelles Datenfunksystem existiert, über das beliebige Informationen versendet werden können. Gerade die Kombination von ERTMS als Betriebsleitsystem und ETCS als Zugbeeinflussungssystem kann hierfür hervorragend verwendet werden, da alle nötigen Informationen gebündelt vorliegen und zudem ein universelles Kommunikationsmedium (GSM-R) zur Verfügung steht.

Durch die Integration der Methoden zur Optimierung der Fahrweisen in die Betriebsleittechnik kann eine völlig neue Dimension der Fahrweisenoptimierung erreicht werden, da der

Disponent schon auf den ersten Blick erkennt, wie sich seine Entscheidung auf die Fahrweise der betroffenen Züge auswirkt.

1.8 Fahrplan

Bei der Planung und Durchführung jeder Zugfahrt ist der Fahrplan von großer Bedeutung. Durch ihn werden alle Abfahrts-, Ankunfts- und Haltezeiten sowie die Durchfahrtszeiten festgelegt.

1.8.1 Fahrplanarten

Grundsätzlich unterscheidet man Dienstfahrpläne und öffentliche Fahrpläne.

Die ***Dienstfahrpläne*** bilden die Grundlage für die sichere Durchführung der Zugfahrt und beinhalten alle betrieblich relevanten Verkehrszeiten für die am Zuglauf beteiligten Betriebsstellen. In der Fahrplankonstruktion und in der Betriebsüberwachung wird üblicherweise der ***Bildfahrplan*** verwendet. Er beinhaltet einen schematischen Gleisplan, die Kilometrierung, die Zugfolgestellen sowie die Zeit-Weg-Linien aller Zugfahrten des zu untersuchenden Streckenabschnitts im Untersuchungszeitraum (Bild 11). Diese Darstellungsart hat den Vorteil, dass alle Zugfahrten zusammen dargestellt werden und Konflikte sehr leicht zu erkennen sind.

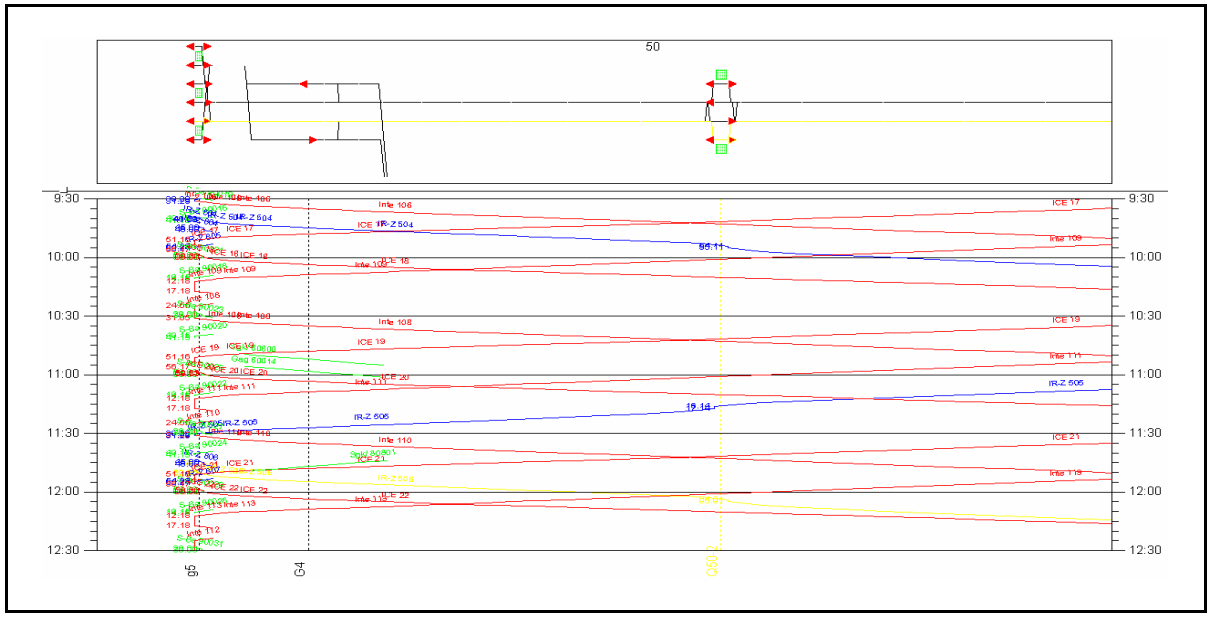
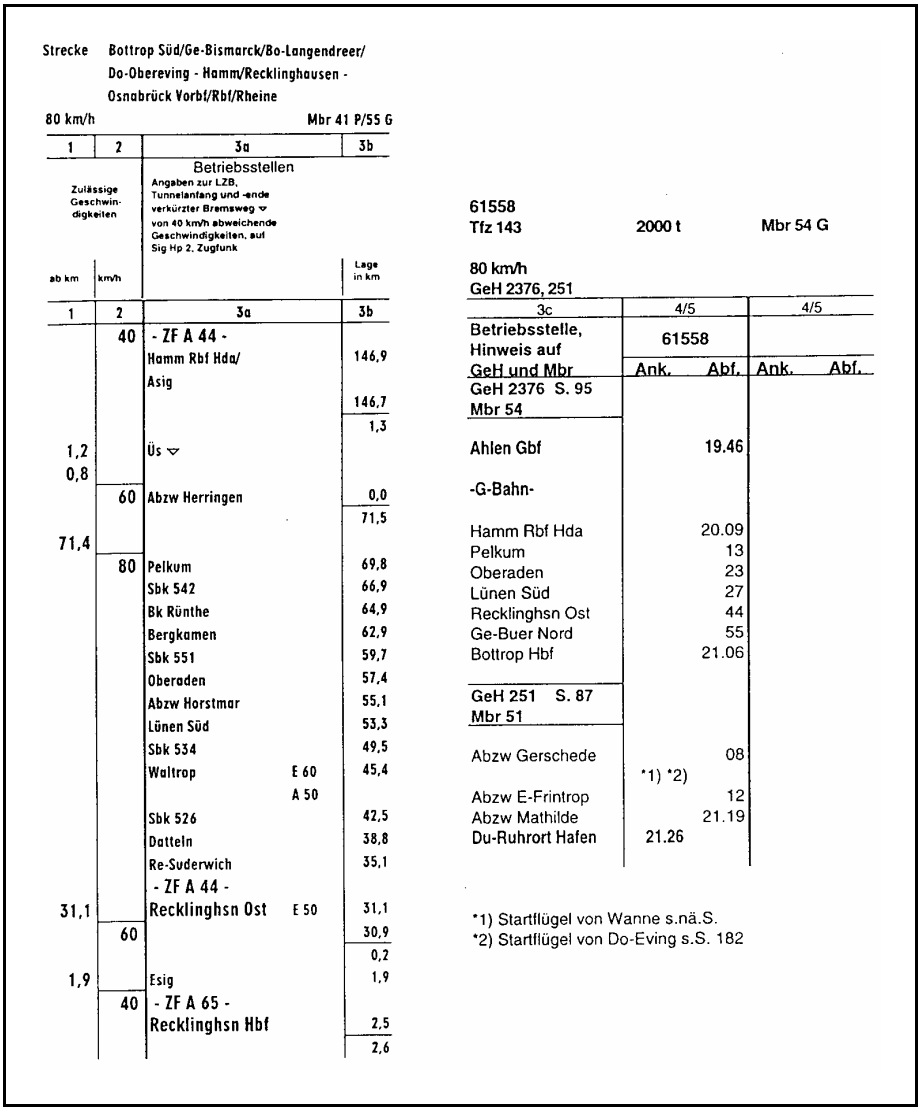


Bild 11: Bildfahrplan

Die Triebfahrzeugführer und das Zugbildungspersonal beziehen die für sie wichtigen Informationen aus dem ***Buchfahrplan***, einer tabellarischen Zusammenfassung aller für die einzelne Zugfahrt relevanten Informationen. Den Buchfahrplan gibt es in schriftlicher Form, getrennt in Geschwindigkeits- und in Fahrzeitenheft (Bild 12), sowie in elektronischer Form. Der ***Elektronische Buchfahrplan mit Langsamfahrstellen (EBuLa)*** verknüpft den statischen Buchfahrplan mit tagesaktuellen Langsamfahrstellen, so dass der Triebfahrzeugführer nur noch einen einzelnen Fahrplan beachten muss (→ Abschnitt 3.6.3.1).



Strecke Bottrop Süd/Ge-Bismarck/Bo-Langendreer/ Do-Obereving - Hamm/Recklinghausen - Osnabrück Vorbf/Rbf/Rheine

80 km/h Mbr 41 P/55 G

1	2	3a Betriebsstellen	3b
Zulässige Geschwindigkeiten		Angaben zur LZB, Tunnelanfang und -ende verkürzter Bremsweg ▽ von 40 km/h abweichende Geschwindigkeiten, auf Sig Hp 2, Zugfunk	
ab km	km/h		Lage in km
1	2	3a	3b
	40	- ZF A 44 -	
		Hamm Rbf Hda/	146,9
		Asig	
			146,7
			1,3
1,2		Üs ▽	
0,8			
	60	Abzw Herringen	0,0
			71,5
71,4			
	80	Pelkum	69,8
		Sbk 542	66,9
		Bk Rünthe	64,9
		Bergkamen	62,9
		Sbk 551	59,7
		Oberaden	57,4
		Abzw Horstmar	55,1
		Lünen Süd	53,3
		Sbk 534	49,5
		Waltrop E 60 A 50	45,4
		Sbk 526	42,5
		Datteln	38,8
		Re-Suderwich	35,1
		- ZF A 44 -	
31,1		Recklinghsn Ost E 50	31,1
	60		30,9
			0,2
1,9		Esig	1,9
	40	- ZF A 65 -	
		Recklinghsn Hbf	2,5
			2,6

61558
Tfz 143 2000 t Mbr 54 G

80 km/h
GeH 2376, 251

3c	4/5	4/5
Betriebsstelle, Hinweis auf	61558	
GeH und Mbr	Ank. Abf.	Ank. Abf.
GeH 2376 S. 95 Mbr 54		
Ahlen Gbf	19.46	
-G-Bahn-		
Hamm Rbf Hda	20.09	
Pelkum	13	
Oberaden	23	
Lünen Süd	27	
Recklinghsn Ost	44	
Ge-Buer Nord	55	
Bottrop Hbf	21.06	
GeH 251 S. 87 Mbr 51		
Abzw Gerschede	*1) *2) 08	
Abzw E-Frintrop	12	
Abzw Mathilde	21.19	
Du-Ruhrort Hafen	21.26	

*1) Startflügel von Wanne s.nä.S.
*2) Startflügel von Do-Eving s.S. 182

Bild 12: Buchfahrplan mit Geschwindigkeitsheft (links) und Fahrzeitenheft (rechts)

Die ***öffentlichen Fahrpläne*** dienen vornehmlich zur Information der Kunden. Hier sind nur die Zeiten angegeben, die verkehrlich relevant sind. Sie werden üblicherweise auf die volle Minute gerundet, lediglich im Nahverkehr wird gelegentlich auf die halbe Minute gerundet. Es muss gewährleistet werden, dass die betriebliche Abfahrtszeit niemals vor der öffentlich publizierten verkehrlichen Abfahrtszeit liegt.

Neben den klassischen öffentlichen Fahrplänen in Form des Aushangfahrplans am Bahnhof und der schriftlichen Fahrplantabelle, dem Taschenfahrplan und dem Kursbuch werden immer häufiger elektronische Medien in Form von CD-ROM, Diskette oder dem Internet angeboten. Bei den elektronischen Medien wird unterschieden zwischen statischen Fahrplaninformationssystemen, die den Sollfahrplan wiedergeben, und den dynamischen Systemen, die ständig an die aktuelle Betriebslage angepasst werden.

1.8.2 Definitionen

Bei der Fahrzeitberechnung und der Fahrplangestaltung werden einige Begriffe verwendet, die hier kurz definiert werden (Tabelle 5).

Geschwindigkeiten	
Höchstgeschwindigkeit	Fahrzeugtechnisch maximal mögliche Geschwindigkeit.
Zulässige Geschwindigkeit	Streckenseitig vorgegebene Geschwindigkeit, die höchstens gefahren werden darf.
Fahrgeschwindigkeit	Momentan gefahrene Geschwindigkeit.
Beförderungs-geschwindigkeit	Mittlere Fahrgeschwindigkeit, die unter Einbeziehung aller Zeitverluste aus Anfahren, Bremsen und Halten tatsächlich erzielt wird.
Reisegeschwindigkeit	Mittlere Geschwindigkeit, die im Haus-zu-Haus-Verkehr erzielt wird.
Zeiten	
Fahrzeit	Zeit, die ein Zug zwischen zwei Stationen benötigt.
Reine Fahrzeit	Zeit, die ein Zug unter voller Ausnutzung der Leistungsfähigkeit des Triebfahrzeuges und unter Beachtung der zulässigen Geschwindigkeiten zwischen zwei Stationen benötigt (straffe Fahrweise).
Planmäßige Fahrzeit	Zeit, die zusätzlich zur reinen Fahrzeit den Regelzuschlag berücksichtigt.
Regelfahrzeit	Zeit, die zusätzlich zur reinen Fahrzeit sowohl den Regel- als auch den Bauzuschlag berücksichtigt.
Wendezeit	Zeit zwischen Ausstieg und Einstieg der Fahrgäste an der Endstation. Diese wird benötigt, um das Fahrzeug für die nächste Fahrt vorzubereiten, dient aber auch als Pufferzeit zum Ausgleich von Verspätungen und ggf. als Pausenzeit für das Fahrpersonal.
Umlaufzeit	Zeit, die ein Zug zwischen zwei Abfahrten von demselben Endpunkt unterwegs ist. Sie setzt sich zusammen aus den Fahrzeiten für Hin- und Rückfahrt, den jeweiligen Stationsaufenthaltszeiten und den Wendezeiten an beiden Endpunkten.
Beförderungszeit	Zeit, die ein Fahrgast bzw. ein Frachtgut von der Einstiegsstation bis zur Ausstiegsstation unter Berücksichtigung der Unterwegshalte im Zug verbringt.
Reisezeit	Zeit, die eine Person für einen Weg von Haus zu Haus benötigt. Sie beinhaltet zusätzlich zur Beförderungszeit auch die Wartezeiten an den Stationen, Umsteigezeiten zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln sowie Zeiten für die Wege zu bzw. von der Station.
Fahrzeitzuschläge	
Regelzuschlag	Prozentualer Zuschlag zur reinen Fahrzeit zum Ausgleich von Verspätungen, die aus technischen, betrieblichen oder verkehrlichen Gründen entstehen. Er ist abhängig von der Zugart, der Anhängelast sowie der Geschwindigkeit und beträgt ca. 3 – 7 % der reinen Fahrzeit.
Bauzuschlag (früher: Sonderzuschlag)	Dient zum Ausgleich infrastrukturbedingter Fahrzeitverluste, die nicht während des gesamten Fahrplanjahres auftreten und deshalb nicht in der Geschwindigkeitskonzeption des Verzeichnisses der zulässigen Geschwindigkeiten enthalten sind.

Tabelle 5: Definitionen von Fahrplanbegriffen des Bahnbetriebs [SFWBB-2001a]

1.8.3 Fahrzeitermittlung

Die Fahrzeitermittlung ist eine der wichtigsten Anwendungen der Fahrdynamik. Ausgehend von den Fahrzeugdaten, dem Streckenband sowie dem Verzeichnis der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten wird die Fahrschaulinie (Geschwindigkeits-Weg-Linie) der Zugfahrt berechnet. Hierbei wird zunächst von der straffen Fahrweise ausgegangen.

Die Vielzahl der Parameter sowie die Komplexität der orts- und geschwindigkeitsabhängigen Faktoren lassen keine analytische Berechnung der Fahrschaulinie zu, so dass hierfür schon frühzeitig grafische Verfahren und elektromechanische Geräte entwickelt wurden. Durch die rasante Entwicklung der EDV werden heute fast ausschließlich digitale Zugfahrt-simulationssysteme verwendet. Die damit mögliche Verringerung der Schrittweite erlaubt eine Berechnungsgenauigkeit, die nur noch durch die Genauigkeit der Eingangsparameter begrenzt wird (→ Anhang B).

1.8.4 Fahrplangestaltung

Grundlage der Fahrplangestaltung ist die Fahrzeitermittlung, durch die die reine Fahrzeit berechnet wird. Fahrpläne basieren jedoch auf der Regelfahrzeit, die gegenüber der reinen Fahrzeit bei straffer Fahrweise üblicherweise eine Fahrzeitreserve berücksichtigt. Diese besteht aus dem Regel- und dem Bauzuschlag (→ Abschnitt 1.8.2). Für die Höhe und die Verteilung des Regelzuschlags existieren Erfahrungswerte in Abhängigkeit von Zugart, Anhängelast und Geschwindigkeit.

Ist die Regelfahrzeit der einzelnen Züge ermittelt, kann unter Berücksichtigung der Zugfolgezeiten (Sperrzeitentreppe), der Haltezeiten, der Pufferzeiten und der Wendezeiten der Fahrplan erstellt werden [Pachl-2002] und [SFWBB-2001a].

2 Realisierung von Fahrweisen

Ein wesentliches Kriterium in der Bewertung von Fahrweisen ist ihre reale Umsetzungsmöglichkeit. Eine theoretisch ermittelte Fahrweise, die in der Praxis nicht umgesetzt werden kann, ist nur von akademischem Interesse. Für ein EVU ist sie nur insoweit relevant, wie sie unter realen Bedingungen verwirklicht werden kann. Daraus folgt, dass schon bei der Wahl der Fahrweise ihre mögliche Umsetzung betrachtet werden muss.

2.1 Fahrzeugsteuerung

Die Umsetzung einer Fahrweise ist direkt abhängig von der möglichen Einflussnahme bei der Fahrzeugsteuerung. Unabhängig von der Betriebsweise (manuelles bzw. automatisches Fahren), des Zugbeeinflussungs-Systems, der Antriebs- und Bremssteuerung sowie des Antriebs- und Bremssystems existiert immer ein typischer Prozessablauf bei der Steuerung eines Schienenfahrzeuges (Bild 13).

Ausgehend von der Betriebslage (u.a. Signalstellungen, Streckensicht, Fahrzeugzustand und Fahrplan) liefert der Prozess „Zugsteuerung“ eine Vorgabe für die Fahr- bzw. Bremsstufe. Dieser Prozess wird durch den Triebfahrzeugführer (Tf), durch einen geeigneten Computer (Automatic Train Operation - ATO) oder durch eine Kombination aus beidem realisiert. Systeme zur Optimierung von Fahrweisen (Advice Systeme) sind üblicherweise auf der Ebene der Zugsteuerung angesiedelt und unterstützen diesen Prozess (bzw. den Fahrer) dahingehend, dass eine Empfehlung für die Fahr- oder Bremsstufe (siehe unten) gegeben wird.

Unterhalb des Zugsteuerungsprozesses befindet sich die Zugbeeinflussung (Automatic Train Protection - ATP), die signaltechnisch sicher ausgeführt ist und durch eine Zwangsbremsung eingreift, wenn eine kritische Situation auftritt, auf die der Zugsteuerungsprozess nicht hinreichend reagiert hat. Die Zugbeeinflussung selbst ist nicht in der Lage, einen Zug zu steuern. Sie dient lediglich dazu, ihn in eine sichere Lage (Stillstand) zu bringen. Im normalen Betriebsablauf hat die Zugbeeinflussung keinen Einfluss auf die Fahrweise.

Einen entscheidenden Einfluss auf die Umsetzungsmöglichkeit einer Fahrweise haben die Fahr- und Bremsstufen. Die Steuerung fast aller Triebfahrzeuge baut auf einer bestimmten Anzahl von Fahr- und Bremsstufen auf, mit denen die Antriebsleistung bzw. die Bremsart und die Bremskraft gesteuert werden kann. Die Anzahl und vor allem die Bedeutung der einzelnen Fahr- und Bremsstufen sind vom Fahrzeugtyp abhängig. Neben den für die Zugsteuerung wichtigen externen, d.h. von der Zugsteuerung zu wählenden Stufen kann es auch noch interne Fahr- und Bremsstufen geben. Diese werden jedoch nur innerhalb der Antriebs- und Bremssteuerung betrachtet.

Die Antriebs- und Bremssteuerung sowie das Antriebs- und Bremssystem werden hier als „Blackbox“ betrachtet. Zur Untersuchung von Fahrweisen ist nur wichtig zu wissen, welche Fahr- bzw. Bremsstufe zu welcher Zug- bzw. Bremskraft führt.

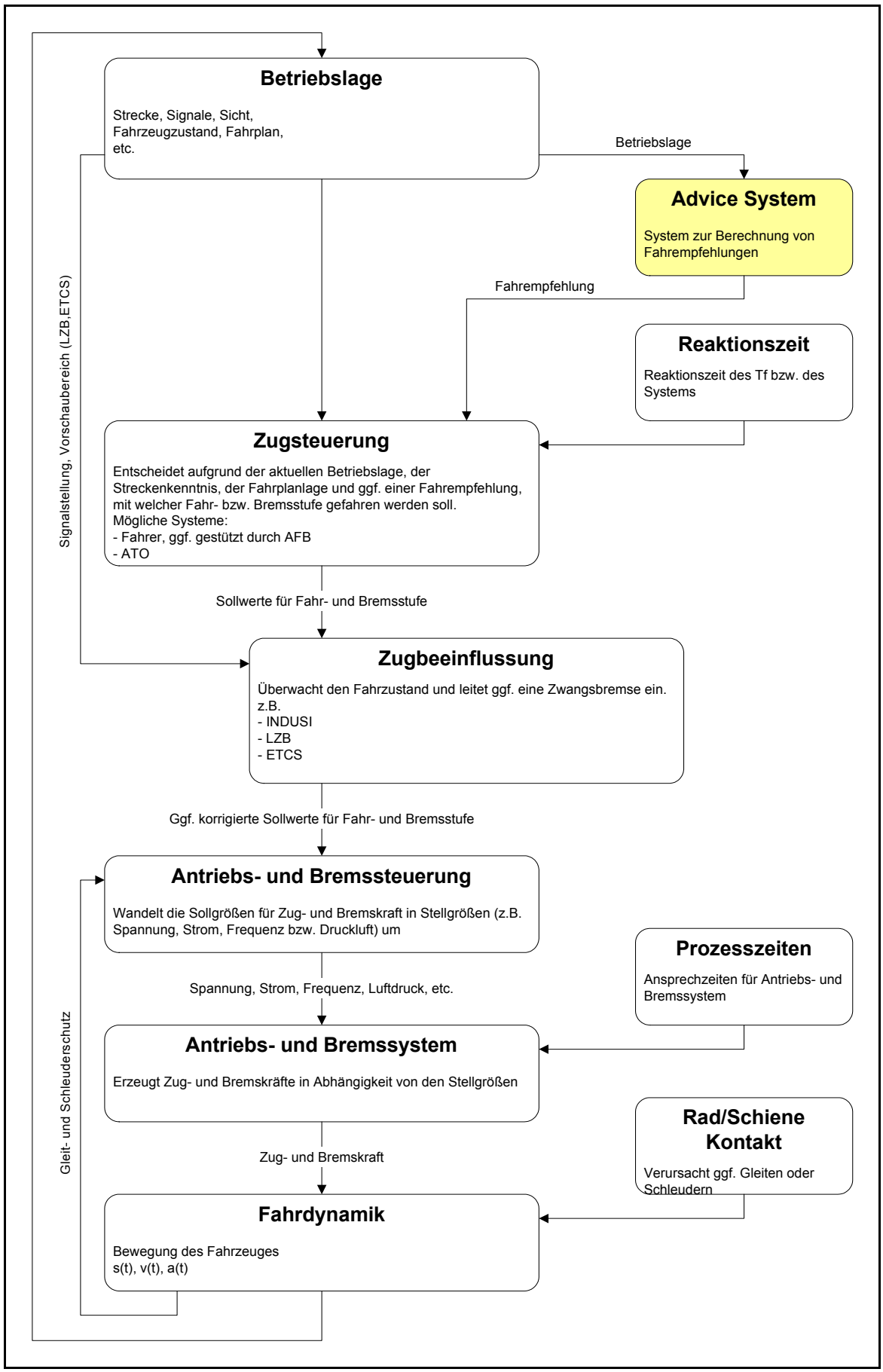


Bild 13: Vereinfachter Prozessablauf beim Steuern von Schienenfahrzeugen

2.2 Antriebssteuerung

Bei der Wahl der Fahrweise wird die Zugsteuerung entscheidend von der Antriebssteuerung beeinflusst. da diese die gewünschte Fahrstufe in die Zugkraft umsetzt. Hierbei werden auch die Prozesszeiten berücksichtigt.

Da die regenerative Bremse (auch → ***Rekupationsbremse*** genannt) der Elektrotraktion vom Antriebssystem bereitgestellt wird, ist auch diese der Antriebssteuerung unterworfen. Die Sollwertvorgabe kommt hier jedoch nicht direkt von dem Zugsteuerungsprozess, sondern über den Umweg durch die Bremssteuerung, die für die Bremskraftverteilung auf die verschiedenen Bremssysteme zuständig ist (→ Abschnitt 2.3).

2.2.1 Fahrstufen und Zugkraftkennlinien

Die Charakteristik des Antriebssystems, bestehend aus Antriebssteuerung, Motor und Getriebe wird üblicherweise mit einem Zugkraftkennlinienfeld beschrieben (Bild 14). Hierbei wird jeder Fahrstufe eine Zugkraftkennlinie zugeordnet. Diese beschreibt den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Zugkraft. Dem Zugkraftkennlinienfeld muss der Bezugspunkt zugeordnet sein. Üblicherweise wird die Zugkraft am Treibradumfang angegeben, sie kann sich jedoch auch auf die Motorwelle oder den Zughaken beziehen (→ Anhang A.1.2.2).

Das dynamische Verhalten, welches den Übergang zwischen verschiedenen Fahrstufen beschreibt, kann daraus nicht entnommen werden. Eine einheitliche Darstellungsweise des dynamischen Verhaltens existiert nicht. Es kann durch Bedingungen, Tabellen, Prozesszeiten und Zugkraft-Zeit-Diagramme beschrieben werden. Da diese Beschreibung jedoch sehr komplex sein kann und die Zeit des Fahrstufenwechsels im Vergleich zur Fahrzeit relativ gering ist, wird der Fahrstufenwechsel häufig gar nicht oder nur durch eine Prozesszeit berücksichtigt.

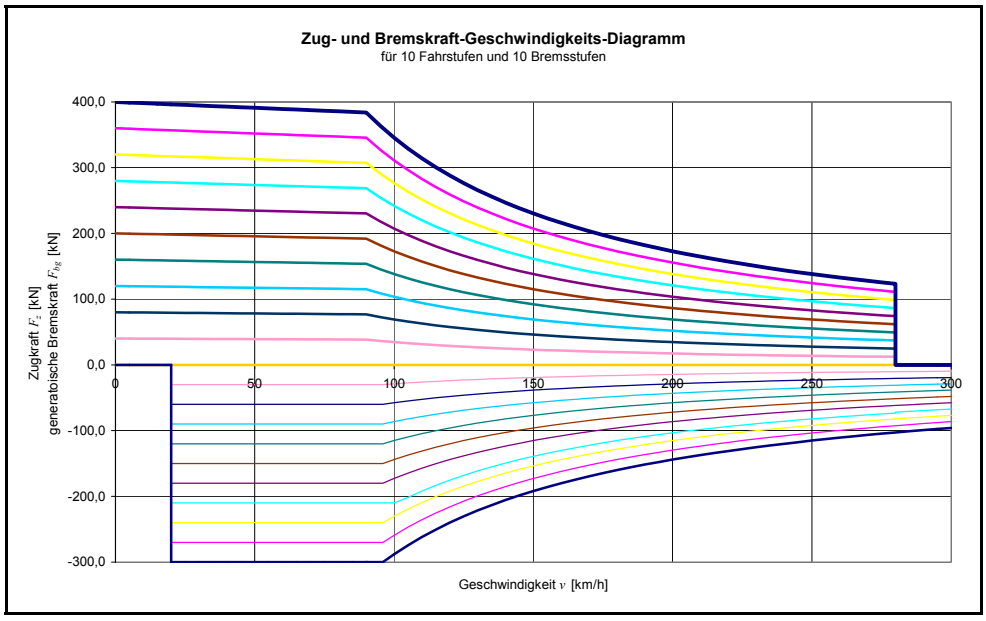


Bild 14: Typisches Zug- und Bremskraft-Geschwindigkeits-Diagramm bei Elektrotraktion mit jeweils 10 Fahr- und Bremsstufen

Der Verlauf der maximalen Zugkraft (Bild 14: oberste Kennlinie) ist normalerweise durch eine Hyperbel, die sich aus der Leistung ergibt, sowie durch eine Zugkraftbegrenzung im unteren Geschwindigkeitsbereich und eine maximale Geschwindigkeit charakterisiert. Ebenso verhält es sich bei der maximalen regenerativen Bremskraft (Bild 14: unterste Kennlinie), wobei diese im niedrigsten Geschwindigkeitsbereich üblicherweise Null ist und dafür keine bzw. eine höhere Höchstgeschwindigkeitsgrenze besitzt.

Die vom Hersteller angegebene Kennlinie der maximalen Zugkraft bezieht sich normalerweise auf die → ***Dauerleistung (Nennleistung)***. Zumindest bei der Elektrotraktion ist es jedoch möglich, kurzzeitig eine höhere Leistung zu erzielen (→ ***Kurzleistung***, → ***Stundenleistung***). Welche Fahrstufen hier verwendet werden, wie sich dies im Zugkraftkennlinienfeld niederschlägt und über welchen Zeitraum diese Fahrstufen verwendet werden dürfen, ist fahrzeugspezifisch und muss den technischen Unterlagen entnommen werden.

Die Charakteristik der Zugkraftkennlinien der Zwischenstufen kann ähnlich der maximalen Zugkraft verlaufen, indem die Zugkraft prozentual zur maximalen Zugkraft mit der Fahrstufe abgesenkt wird (wie in Bild 14 dargestellt). Ebenso können die Zwischenstufen jedoch auch einen anderen Verlauf haben. Dieser ist aus den technischen Unterlagen des Fahrzeuges zu entnehmen. Speziell in der Dieseltraktion kommt es gelegentlich zu Sprüngen in den Zugkraftkennlinien. Weiterhin kann jeder Fahrstufe ein spezifischer Geschwindigkeits-Gültigkeitsbereich zugeordnet sein.

2.2.2 Wirkungsgrad von Antrieb und regenerativer Bremse

Jedes Antriebssystem ist mit Verlusten behaftet. Der Wirkungsgrad gibt das Verhältnis von mechanischer Nutzleistung zu der hierfür nötigen Primärleistung an. Dabei bezieht sich die mechanische Nutzleistung üblicherweise auf die Zugkraft am Treibradumfang sowie die momentane Geschwindigkeit. Die Primärleistung bezieht sich auf die Leistung, die in das Antriebssystem fließt. Hierbei ist es wichtig zu wissen, ob Hilfs- und Nebenbetriebe berücksichtigt werden.

Die einfachste Möglichkeit den Wirkungsgrad anzugeben ist ein ***konstanter durchschnittlicher Faktor***. Dieser liegt bei modernen Fahrzeugen im Bereich $\eta = 0{,}75 \text{ - } 0{,}90$ für den Antrieb und etwas darunter bei der generatorischen Bremse.

Der konstante Wirkungsgrad ist ausreichend, wenn der Energieverbrauch nur makroskopisch betrachtet werden soll. Bei Detailbetrachtungen sollte auf feinere Kennlinien zurückgegriffen werden. Diese können tabellarisch, grafisch oder als Formel mit entsprechenden Koeffizienten vorliegen. Dargestellt wird dabei jedoch häufig nicht der Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Fahrstufe, Geschwindigkeit und Zugkraft, sondern stattdessen die Leistungsaufnahme bzw. der Treibstoffverbrauch in Abhängigkeit von Fahrstufe, Geschwindigkeit und Zugkraft.

Bei modernen elektrischen Triebfahrzeugen misst die DB AG zur Ermittlung des Charakters der Leistungsaufnahme bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten v sowie unterschiedlichen

Zugkräften F_z die aufgenommene Leistung am Fahrdraht P_f und bestimmt für jeden Geschwindigkeitsbereich zwei Kennwerte $K_{1,v}$ und $K_{2,v}$, für die die folgende Beziehung gilt:

$$P_f(F_z, v) = \frac{1}{K_{2,v}} \cdot F_z - \frac{K_{1,v}}{K_{2,v}} \qquad \text{Gl. 1}$$

Aus den ermittelten Koeffizienten (Tabelle 6) kann nun ein grafisches Kennlinienfeld erstellt werden (Bild 15). Bei diesem Beispiel ist zu beachten, dass die Koeffizienten eine Leistung der Hilfsbetriebe in Höhe von 280 kW berücksichtigen.

v [km/h]	$K_{1,v}$ [kN]	$K_{2,v}$ [s/m]
0	-106,315836	0,379699
5	-68,007074	0,242882
10	-51,163686	0,182727
15	-41,132364	0,146901
20	-34,066917	0,121668
⋮		
260	-3,094057	0,011050
270	-2,983134	0,010654
280	-2,872210	0,010258

Tabelle 6: Koeffizienten zur Bestimmung der aufgenommenen Triebfahrzeugleistung am Fahrdraht für BR 401 mit 2 * GTO-TK [EWSN-1996a]

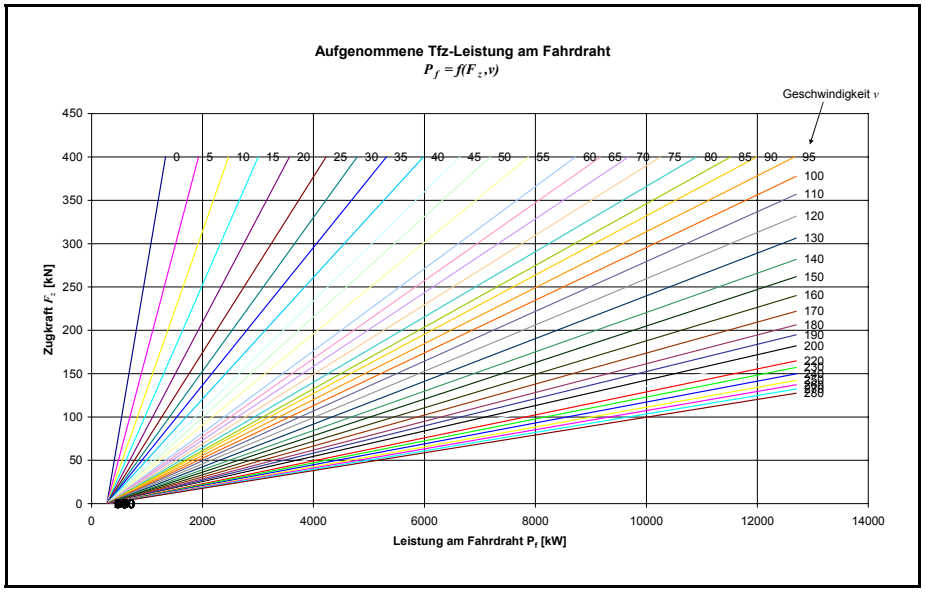


Bild 15: Aufgenommene Triebfahrzeugleistung am Fahrdraht

Der Wirkungsgrad η kann nun als Verhältnis von mechanischer Leistung zu elektrischer Leistung bestimmt werden. Daraus ergibt sich ein dreidimensionales Kennlinienfeld (Bild 16).

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_f} = \frac{F_z \cdot v}{P_f} \qquad \text{Gl. 2}$$

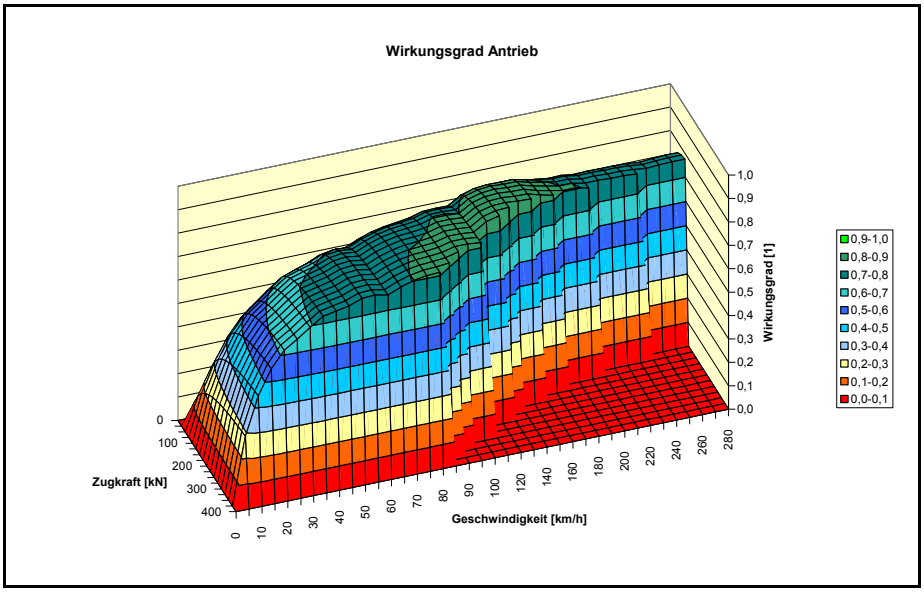


Bild 16: Wirkungsgradkennlinienfeld Antrieb ICE-1

Wenn das Antriebssystem als generatorische Bremse verwendet wird, können auch hierfür die geschwindigkeitsabhängigen Koeffizienten $K_{1,v}$ und $K_{2,v}$ ermittelt und in einem Kennlinienfeld dargestellt werden (Bild 17).

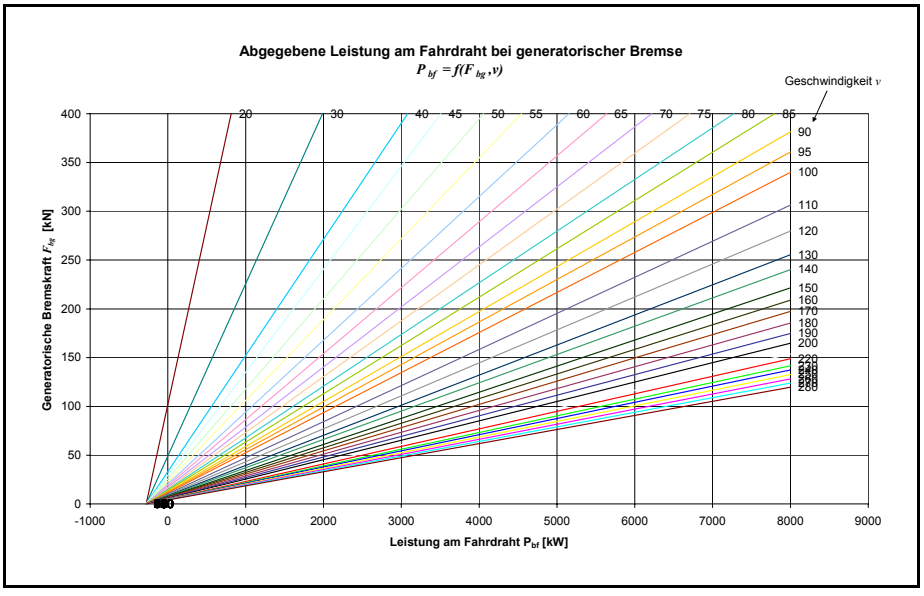


Bild 17: Abgegebene Leistung am Fahrdraht bei generatorischer Bremse

Auch der Wirkungsgrad der generatorischen Bremse kann analog zum Antrieb ermittelt werden, wobei dieser dann als Verhältnis von zurückgespeister elektrischer Leistung zur gesamten mechanischen Bremsleistung definiert ist. Bei der Bestimmung des Wirkungsgrades des Gesamtbremssystems ist zu berücksichtigen, dass die generatorische Bremskraft erst oberhalb einer Mindestgeschwindigkeit wirkt und außerdem hohe Bremskräfte nur durch eine Kombination von mehreren Bremssystemen erzielt werden können (Bild 18).

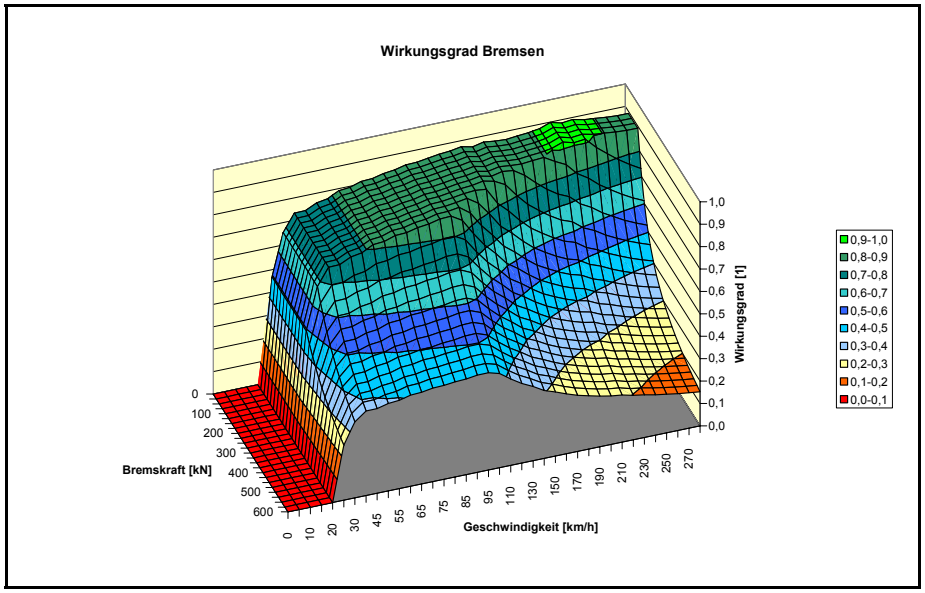


Bild 18: Wirkungsgradkennlinienfeld Bremsen ICE-1

Die Wirkungsgradkennlinien bei Dieseltraktion sind häufig etwas komplexer, jedoch besteht auch hier ein Zusammenhang zwischen Fahrstufe, Zugkraft und Geschwindigkeit [Schnabel-1982] und [ISB-1998c].

Aus den hier vorgestellten Wirkungsgradkennlinienfeldern geht hervor, dass der Wirkungsgrad bei der Wahl der Fahrweise eine Rolle spielt, da er in der Realität in Abhängigkeit von Zugkraft und Geschwindigkeit deutlich schwankt.

2.3 Bremssteuerung

Moderne Fahrzeuge haben mehrere Bremssysteme, die je nach Anwendung einzeln oder gemeinsam die Bremskraft erzeugen. Die folgenden Bremsbauarten kommen zurzeit in unterschiedlicher Kombination zum Einsatz (Tabelle 7):

Kategorie	Bauart	Ansteuerung	Kraftübertragung
Radbremsen	Klotzbremse	pneumatisch	radwirksam
	Scheibenbremse	pneumatisch, elektrisch	radwirksam
	Trommelbremse	pneumatisch	radwirksam
Triebwerksbremsen	generatorische Bremse	elektrisch	radwirksam
	hydrodynamische Bremse	elektrisch	radwirksam
Schienenbremsen	Magnetschienenbremse	pneumatisch	schienenwirksam
	Wirbelstrombremse	elektrisch	schienenwirksam

Tabelle 7: Bremsbauarten [Müller-2002]

Beim ICE-3 werden z.B. die generatorische Bremse, die lineare Wirbelstrombremse sowie die pneumatische Scheibenbremse an den Treibachsen und an den Laufachsen eingesetzt.

Die Bremssteuerung ist für die Verteilung der Bremskräfte auf die einzelnen Systeme verantwortlich. Die Reihenfolge des Zuschaltens der einzelnen Bremsbauarten erfolgt über eine Prioritätenliste, so dass möglicht zunächst die generatorische Bremse eingesetzt wird.

Für die Optimierung der Fahrweise können die Bremssteuerung und die Prioritätenliste von Bedeutung sein, wenn gezielt einzelne Bremsbauarten eingesetzt werden sollen. So kann es z.B. von Vorteil sein, frühzeitig ausschließlich mit der generatorischen Bremse zu bremsen, um gezielt Energie zurückzuspeisen oder um den Bremslärm bei Radbremsen zu verringern (→ Abschnitt 3.9).

Die hochgenaue Simulation von Bremsvorgängen unter Berücksichtigung aller fahrdynamischen Effekte und der Arbeitsweise der Bremssteuerung wurde am Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Universität Hannover beschrieben und kann als Grundlage für die Bestimmung von Bremsvorgängen im Rahmen der Optimierung der Fahrweise dienen [Müller-2002].

2.4 Fahrtverlauf

Der Fahrtverlauf wird neben den vorausschaubaren technischen Einflüssen auch von betrieblichen, verkehrlichen oder menschlichen Einflüssen geprägt, die nicht oder nur ungenau voraussehbar sind. Durch die Einbeziehung dieser Einflüsse und der möglichen Auswirkungen auf die Fahrweise kann der Erfolg einer Fahrweisen-Optimierung entscheidend beeinflusst werden.

2.4.1 Haltepunkt

Züge unterschiedlicher Länge halten am Bahnsteig normalerweise an unterschiedlichen Punkten. Häufig sind die Haltepunkte durch mehrere zuglängenabhängige Haltetafeln gekennzeichnet, wobei diese sich auf den Zugkopf beziehen. Sind keine Haltetafeln vorhanden, existieren meist betriebliche Vorgaben, die den Haltepunkt vorgeben. Speziell im Personennahverkehr wird z.B. darauf geachtet, dass die Zugmitte in der Nähe der Treppen zum Stehen kommt, so dass die Fußwege minimiert werden. Für Umsteigeverbindungen zum Nachbargleis, das Trennen und das Zusammenfügen von Zügen sowie den gemeinsamen Halt von zwei Zügen auf demselben Gleis gibt es besondere Vorschriften, die der Tf einhalten muss.

Bei der theoretischen Untersuchung von Zugfahrten und der Fahrplangestaltung sind die unterschiedlichen Haltepunkte häufig kein Problem, da für die geplanten Züge auch der jeweilige Sollhaltepunkt bestimmt und dann in der Simulation berücksichtigt werden kann. Im Gegensatz dazu kann der Haltepunkt im operativen Einsatz zu Problemen führen, wenn z.B. die Zugkonfiguration nicht der geplanten entspricht oder der Tf an einem anderen Ort anhält. Hierfür gibt es häufig plausible Gründe, so dass eine mögliche Verschiebung des Haltepunktes bei der Optimierung von Fahrweisen berücksichtigt werden muss. Je nach Bahnsteig- und Zuglänge können Ungenauigkeiten von über 100 m auftreten, die besonders dann zu beachten sind, wenn anhand des Haltepunktes eine Ortssynchronisation vorgenommen wird (→ Abschnitt 3.5.1.6).

Zu beachten ist, dass der Haltepunkt sowohl bei der Abfahrt als auch bei der Ankunft unscharf ist, sich aber während des Haltes nicht ändert, d.h. eine Verschiebung bei der Ankunft bedeutet automatisch auch eine Verschiebung bei der Abfahrt.

2.4.2 Zielbremsung

Das exakte Bremsvermögen eines Zuges ist von sehr vielen Faktoren abhängig und kann niemals genau vorausgesagt werden. Deshalb wird von einer durchschnittlichen Betriebsbremsverzögerung ausgegangen, die bei mindestens 95 % der Fälle ohne Probleme einzuhalten ist. Letztendlich ist der Tf für den Bremseinsatzpunkt sowie für die Wahl und die Einhaltung der Bremsverzögerung verantwortlich. Bei der Online-Optimierung der Fahrweise ist deshalb eine individuelle Varianz beim Bremsvorgang zu berücksichtigen.

2.4.3 Zugabfertigung

Während im Fahrplan normalerweise die Zeit des Türenschließens als Abfahrtszeit angegeben ist, verzögert sich die Abfahrt in der Realität aus betrieblichen und technischen Gründen um einige Sekunden, selbst wenn der Fahrgastwechsel und das Türenschließen absolut pünktlich abgeschlossen wurden.

Bei der DB AG wird die Zugabfertigung in folgende Phasen eingeteilt (Bild 19):

- Gong mit Bandansage ($T_{Abfahrt}$ - 15 s);
- Achtungspfiff ($T_{Abfahrt}$ - 5 s);
- Zentrales Türschließen ($T_{Abfahrt}$);
- Abfahrtauftrag durch Zugführer an Tf durch Betätigung des Lichtsignals Zp 9 ($T_{Abfahrt}$ + 5 s);
- Zeitverzögerung zum Einsteigen des Zugführers ($T_{Abfahrt}$ + 12 s);
- Tf schaltet Zugkraft auf. Bis die Zugkraft anliegt und sich das Fahrzeug in Bewegung setzt können je nach Bauart noch einige Sekunden vergehen (ca. $T_{Abfahrt}$ + 20 s).

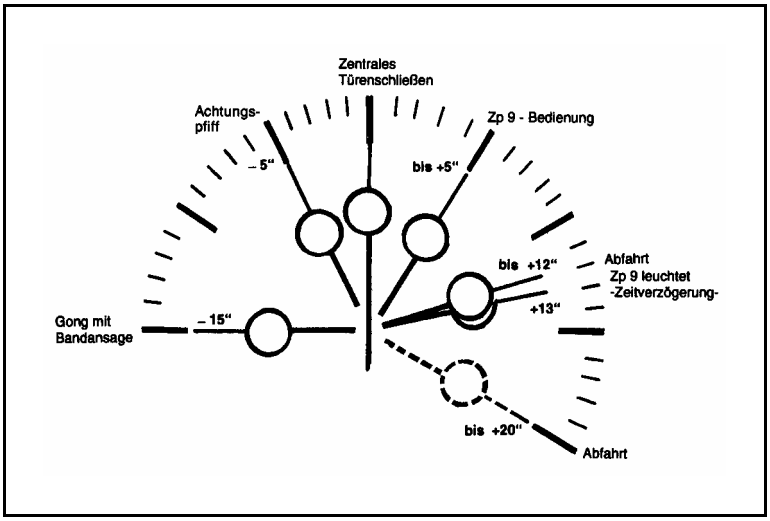


Bild 19: Abfertigungsuhr DB AG [Hausmann-2000]

Im Nahverkehr vollzieht sich die Zugabfertigung üblicherweise schneller. Häufig wird auf die Ansage und/oder auf den Achtungspfiff verzichtet und das zentrale Türschließen durch akustische und optische Signale 1 bis 2 s vorher angekündigt. Durch die Selbstabfertigung bzw. die Abfertigung durch einen stationären Mitarbeiter sowie die deutlich schnellere Reaktionszeit eines Nahverkehrsantriebs kann die Abfahrtverzögerung auf wenige Sekunden nach dem Türschließen verringert werden.

Bei der Optimierung von Fahrweisen sollte die durchschnittliche Zeit der Zugabfertigung berücksichtigt werden, um die real zur Verfügung stehende Fahrzeit besser bestimmen zu können. Dies kann z.B. durch eine Verlängerung der Haltezeit geschehen.

2.4.4 Überschneidung von Bahnverkehr und Individualverkehr

Der Bahnverkehr und der Individualverkehr (IV) berühren bzw. überschneiden sich an Bahnübergängen und auf gemischten Fahrwegen (z.B. bei Straßenbahnen).

Hinsichtlich des Einflusses auf die Fahrweise entsprechen beschrankte Bahnübergänge weitestgehend einem Signal, d.h. solange der Bahnübergang nicht geräumt und die Schranken nicht verschlossen sind, darf der Zug das deckende Signal nicht überfahren. Bei unbeschrankten oder technisch nicht gesicherten Bahnübergängen sind die zugehörige Geschwindigkeitsbeschränkung und der jeweilige Sichtbereich entscheidend für den Einfluss auf die

Fahrweise. Da bei allen Arten von Bahnübergängen der Schienenverkehr vor dem Individualverkehr Vorrang hat und dieser in den meisten Fällen auch gewährt wird, ist der Fahrtverlauf in der Umgebung des Bahnübergangs normalerweise gut voraussehbar, d.h. er kann in der Optimierung der Fahrweise berücksichtigt werden.

Ganz anders verhält es sich, wenn sich Bahnverkehr und IV einen straßenbündigen Fahrweg teilen. Obwohl auch in diesem Fall der Bahnverkehr gegenüber dem IV Vorrang haben sollte, kommt es in hohem Maße zu Behinderungen, auf die der Tf jederzeit reagieren muss. Deshalb kann eine Behinderung des Bahnverkehrs durch den IV bei der Optimierung der Fahrweise höchstens statistisch berücksichtigt werden. Lediglich der Tf selbst ist in der Lage, alle durch den IV vorkommenden Einflüsse abzuschätzen und dementsprechend eine geeignete Fahrweise zu realisieren. Systeme zur Unterstützung des Tf bei der Wahl der Fahrweise (Advice Systeme: → Abschnitt 2.7 und Kapitel 4) können hier nur unter günstigen Bedingungen sinnvolle Vorschläge bereiten, so dass sie in diesen Fahrwegabschnitten vorzugsweise (automatisch) zu deaktivieren sind.

2.5 Triebfahrzeugführer

In nicht automatisierten Bahnsystemen ist der Triebfahrzeugführer (Tf) letztendlich für die Umsetzung der Fahrweise verantwortlich. Er wird dabei von verschiedenen Systemen überwacht, die jedoch nur dann eingreifen, wenn er entsprechend der aktuellen Situation zu schnell fährt oder auf ein Ereignis nicht rechtzeitig reagiert. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um Systeme der ***Zugbeeinflussung*** (→ Abschnitt 1.7.2) und um die ***Sicherheitsfahrschaltung (Sifa)***, mit der die Wachsamkeit des Tf überwacht wird. Eine automatisierte Überwachung, ob der Tf zu langsam fährt oder ob der Fahrplan eingehalten wird, findet normalerweise nicht statt.

Der Tf hat folgende Aufgaben, die im Zusammenhang mit der Fahrweise stehen:

- Beobachtung der Strecke und Berücksichtigung aller Signale,
- Einhaltung aller Geschwindigkeitsbegrenzungen (inkl. Langsamfahrstellen),
- Beachtung des Buchfahrplans,
- Ggf. Beachtung des Individualverkehrs, wenn dieser die Strecke kreuzt oder auf dem selben Weg verkehrt,
- Kommunikation mit dem Fahrdienstleiter bzw. der Zugüberwachung,
- Beobachtung der übrigen Zugfahrten,
- Teilweise Abfertigung des Zuges,
- Teilweise Ansprechpartner für Fahrgäste (z.B. Fahrkartenverkauf, Information),
- Einstellung der Zugdaten (inkl. der Angaben aus dem Bremszettel) und
- Überwachung des technischen Zustandes des Tfz und ggf. Behebung kleinerer Störungen.

Die Fülle an Aufgaben und die damit verbundene hohe Verantwortung des Tf kann diesen physisch und psychisch stark beanspruchen. Speziell die Einhaltung eines knapp kalkulierten

Fahrplans bei betrieblichen oder verkehrlichen Verzögerungen führt schnell zu Stress, insbesondere dann, wenn der Tf diese Verzögerung nicht zu verantworten hat.

In solchen Situationen kann der Tf unter Umständen nicht alle Aufgaben mit derselben Aufmerksamkeit verfolgen. Er wird in diesem Falle zunächst mit hoher Priorität die wesentlichen (sicherheitsrelevanten) Aufgaben durchführen. Zu den weniger kritischen Aufgaben, die dann ggf. vernachlässigt werden, gehören u.a. die (exakte) Einhaltung des Fahrplans und die Optimierung der Fahrweise. Hierbei können ihn jedoch Advice Systeme unterstützen (→ Abschnitt 2.7 und Kapitel 4).

Neben der momentanen persönlichen Verfassung und Motivation des Tf sind jedoch auch die technischen Möglichkeiten zur Umsetzung einer Fahrweise durch den Tf von Bedeutung. Selbst unter idealen persönlichen und betrieblichen Bedingungen ergeben sich Einschränkungen aus der Fahrzeug-, Antriebs- und Bremssteuerung, die eine exakte Realisierung einer theoretisch optimierten Sollfahrweise nicht erlauben. Beim Einsatz eines Advice Systems zur Unterstützung des Tf (→ Abschnitt 4.2) sind deshalb die technischen Steuerungsmöglichkeiten, die Reaktionszeit des Tf und die Akzeptanz des Advice Systems durch den Tf zu berücksichtigen (→ Abschnitt 4.6.1).

Die Motivation des Tf zur Verbesserung der Fahrweise kann durch ein Bonussystem erhöht werden. Schon während der Blütezeit des Dampfbetriebes wurde z.B. der sog. Kohlepfennig eingeführt, womit energiesparsames Fahren belohnt wurde. Die triebfahrzeugführerabhängige Ermittlung dieses Bonus ist jedoch sehr komplex, da die Fahrt stark von betrieblichen und verkehrlichen Randbedingungen geprägt ist, die der Tf nicht zu verantworten hat. Weiterhin sprechen datenschutzrechtliche Bedenken gegen einen triebfahrzeugführerabhängigen Bonus. Leichter zu handhaben ist ein pauschaler Bonus, der allen Tf gezahlt wird, sofern die betrieblichen Ziele nachgewiesen werden. Auch dies wird den Großteil der Tf motivieren, ihren Betrag zur Optimierung der Fahrweise zu leisten.

2.6 Automatisches Fahren

Während die Automatisierung in allen Bereichen der industriellen Technik und der Produktion schon lange nicht mehr wegzudenken ist, stellt der vollautomatische fahrerlose Bahnbetrieb immer noch eine Herausforderung dar, die bisher nur von einigen Stadtschnellbahnen, People Mover Systemen und Magnetschnellbahnsystemen im produktiven Einsatz gemeistert wird. Auch bei konventionellen Fernbahnen ist die Automatisierung schon weit fortgeschritten, ohne dass der Tf jedoch ersetzt werden kann. Hier wird vielmehr auf eine Unterstützung des Tf gesetzt, die Verantwortung über den Fahrtverlauf bleibt jedoch bei ihm.

2.6.1 Automatische Fahr- und Bremssteuerung

Die Automatische Fahr- und Bremssteuerung (AFB) entlastet den Tf weitestgehend von der Zugsteuerung auf der Strecke. Sie baut auf einem kontinuierlichen Zugbeeinflussungssystem auf, mit dem signaltechnisch sicher alle Signalstellungen und Geschwindigkeitsrestriktionen des Vorschaubereiches (z.B. 10 km) auf das Fahrzeug übertragen und überwacht werden

(→ Abschnitt 1.7.2.2). Die AFB selbst muss nicht signaltechnisch sicher ausgelegt werden, da die Zugbeeinflussung die Fahrt überwacht und ggf. eine Zwangsbremsung einleitet.

Die AFB wird bei der DB AG vorwiegend im Hochgeschwindigkeits- und Güterverkehr auf LZB-Strecken eingesetzt. Sie kann jedoch eingeschränkt auch auf Strecken ohne LZB-Ausrüstung eingesetzt werden, wobei sie dann nur zur Regelung einer vom Tf vorgegebenen Geschwindigkeit (v_{soll} <= 160 km/h) dient.

Der Tf hat zur Antriebssteuerung zwei Hebel zur Verfügung. Mit dem Geschwindigkeitshebel wird eine Sollgeschwindigkeit vorgegeben, die im LZB-geführten Betrieb auf die von der LZB gelieferten Sollgeschwindigkeit begrenzt wird, ansonsten auf 160 km/h. Der zweite Hebel dient zur Vorgabe der maximalen Zugkraft. Solange sich das Fahrzeug unterhalb der momentanen Sollgeschwindigkeit befindet, wird das Tfz mit dieser Zugkraft beschleunigt. Im LZB-geführten AFB-Betrieb muss der Tf also nur beide Hebel auf vollen Ausschlag einstellen, um entsprechend der straffen Fahrweise zu fahren. Die derzeitigen AFB-Regelungen sind nicht vorausschauend, d.h. beim Halten einer Sollgeschwindigkeit kann es zu häufigen Antriebs- und Bremsvorgängen kommen. Um dies zu verhindern, kann der Tf eingreifen und die Zugkraft manuell begrenzen bzw. auf Null setzen.

Die AFB überwacht keinen Fahrplan und optimiert nicht die Fahrweise. Sie dient lediglich zur automatischen Realisierung der straffen Fahrweise. Der Tf muss die Fahrt manuell starten, teilweise muss er auch die Zielbremsung beim Stationshalt manuell steuern.

2.6.2 Automatic Train Operation

Die Automatic Train Operation (ATO) geht einen Schritt weiter als die AFB und integriert den Fahrplan und teilweise die Zugabfertigung. Der Tf hat, sofern er noch vorhanden ist, nur noch überwachende Aufgaben und greift nur noch bei Störungen ein. Die Zugabfertigung kann vollautomatisch (z.B. durch Bahnsteigtüren oder computergestützte Videoüberwachung mit Bilderkennung), stationär oder durch den Tf erfolgen.

Für den ATO-Betrieb wird ein kontinuierliches Zugbeeinflussungssystem mit einer sehr genauen Zugortung vorausgesetzt. Bei Systemen mit Bahnsteigtüren muss bei der Zielbremsung eine Genauigkeit von unter 0,5 m gewährleistet werden. Führerlose ATO-Systeme unterliegen einer besonders hohen Sicherheitsanforderung und bedürfen einer sehr hohen Zuverlässigkeit, da kein Tf bei einer Störung eingreifen kann.

Durch die Integration des Fahrplans in die ATO muss diese fähig sein, je nach momentaner Fahrplanlage unterschiedliche Fahrweisen zu berücksichtigen. Klassische ATO-Systeme berechnen hierzu Sollfahrweisen mit reduzierter Höchstgeschwindigkeit bzw. unter Berücksichtigung von theoretisch ermittelten Ausrollvorgängen. Das Ergebnis dieser Berechnung ist eine Sollkurve, bei der für jeden Ort eine Sollgeschwindigkeit vorgegeben wird, die durch eine feinfühlige Geschwindigkeitsregelung umzusetzen ist. Durch diese exakte Geschwindigkeitsvorgabe, die auf theoretischen Simulationen bzw. auf speziellen Versuchsfahrten beruht, kann es zu einer ungünstigen Fahrweise kommen, wenn die reale Ausrollverzögerung nicht exakt mit der vorher bestimmten Soll-Ausrollverzögerung übereinstimmt. Dann wird nicht wirklich gerollt, sondern die Soll-Ausrollverzögerung wird

durch Antreiben bzw. Bremsen realisiert. Dieses bei klassischen ATO-Systemen typische Verhalten konnte in [SFWBB-1999] anhand von Messfahrten eines U-Bahnzuges mit ATO-Steuerung auf einer Teststrecke mit unterschiedlichen Zeitvorgaben nachgewiesen werden. Beim Vergleich zwischen der von der ATO realisierten Fahrweise und der theoretischen energiesparsamen Fahrweise bei gleicher Fahrzeit zeigt sich, dass die ATO von einer höheren Rollverzögerung ausgeht. Dementsprechend beschleunigt sie auf eine höhere Geschwindigkeit und sie bremst leicht anstatt zu rollen (Bild 20, Bild 21).

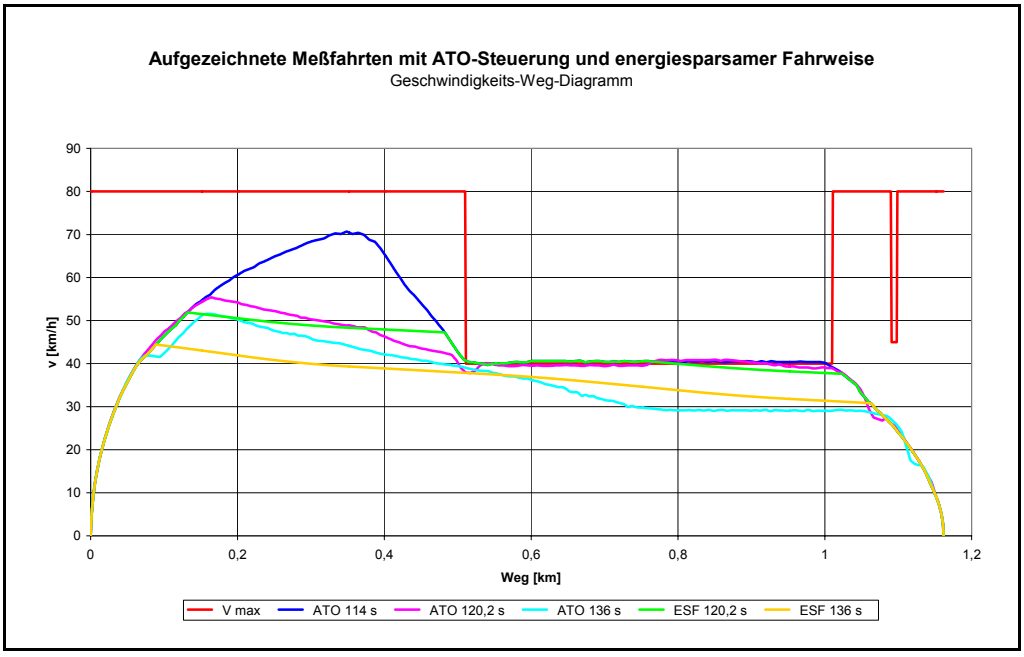


Bild 20: Vergleich der Fahrschaulinien von aufgezeichneten Messfahrten mit ATO-Steuerung und energiesparsamer Fahrweise: Geschwindigkeits-Weg-Linie [SFWBB-1999]

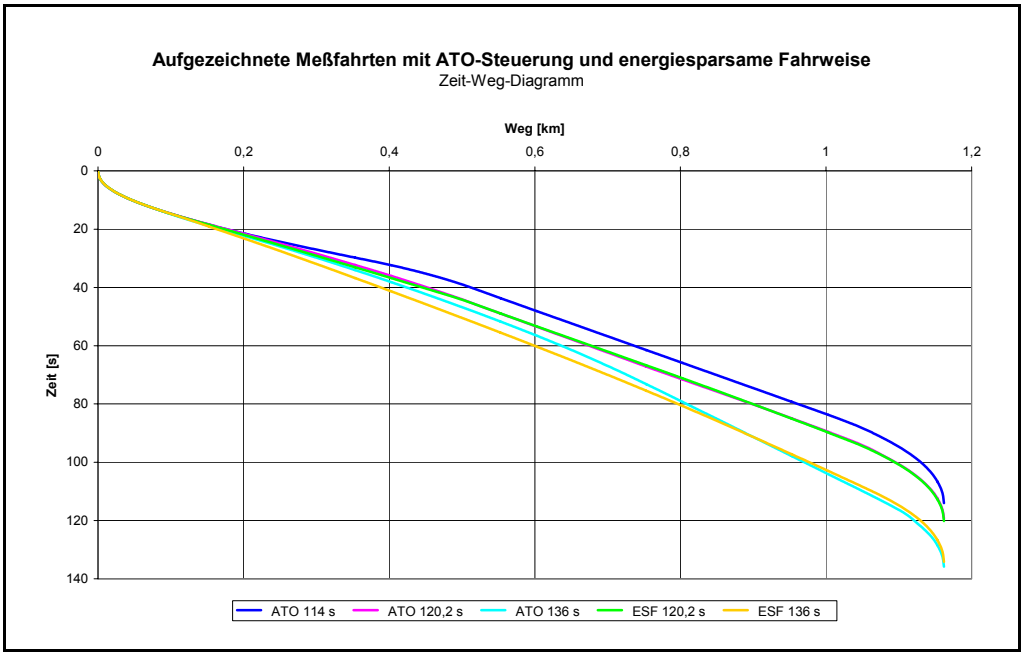


Bild 21: Vergleich der Fahrschaulinien von aufgezeichneten Messfahrten mit ATO-Steuerung und energiesparsamer Fahrweise: Zeit-Weg-Linie [SFWBB-1999]

Zur besseren Vergleichbarkeit basieren alle Fahrschaulinien dieses Beispiels auf Simulationen, wobei die ATO-Fahrten exakte Nachsimulationen von gemessenen Fahrschaulinien sind. Beim Vergleich der Fahrten mit ATO-Steuerung und ESF wird deutlich, dass bei der ESF trotz gleicher Fahrzeit deutlich weniger Energie verbraucht wird (Tabelle 8).

Fahrzeit	114,0 s	120,2 s		136,0 s	
Typ	ATO	ATO	ESF[1]	ATO	ESF[1]
Energie [kWh]	18,7	12,4	9,5	9,9	6,2
Energieeinsparung ESF gegenüber ATO			22,7 %		37,4 %

Tabelle 8: Vergleich ATO und ESF [SFWBB-1999]

Die Fahrweise eines ATO-Systems kann durch die Integration der energiesparsamen Fahrweise oder durch die Einbindung eines externen Advice Systems (→ Abschnitt 2.7 und Kapitel 4) verbessert werden. Je nach Integrationsgrad kann hierfür ein Sicherheitsnachweis nötig sein (→ Abschnitt 4.3).

2.7 Advice Systeme

Unter einem Advice System wird hier ein computergestütztes System zur Berechnung und Anzeige einer Fahrempfehlung während der Fahrt verstanden (Echtzeit-System) . Überwiegend handelt es sich um fahrzeugseitige Systeme (onboard), es sind jedoch auch streckenseitige oder beidseitige Systeme denkbar.

Advice Systeme haben bei der Wahl der im konkreten Fall anzuwendenden Fahrweise eine beratende Funktion, indem ausgehend von der aktuellen Betriebs- und Fahrplanlage Fahrempfehlungen berechnet werden. Diese Fahrempfehlung dient dem Zugsteuerungsprozess (Tf oder ATO) als zusätzliche Information und sollte - muss jedoch nicht - in die Wahl der Fahr- und Bremsstufe eingehen.

Gute Advice Systeme berücksichtigen bei der Berechnung der Fahrempfehlung eine Vielzahl von statischen Daten und aktuellen Betriebsinformationen. Die Verfahren der Berechnung sind sehr komplex und die Qualität der Fahrempfehlung ist stark von der Eignung des Systems für den Einsatzzweck und der Qualität der Eingangsdaten abhängig.

Die genauen Aufgaben, der Aufbau sowie die Integrationsmöglichkeiten eines Advice Systems werden in Kapitel 4 eingehend beschrieben.

[1] Die ESF ist hierbei theoretisch berechnet. In der Realität werden die Einsparungen gegenüber der ATO-Steuerung etwas geringer ausfallen.

3 Energiesparsame Fahrweise (ESF)

Energiesparsame Fahrweisen werden mittels gezielter Nutzung der unverbrauchten Fahrzeitregel- und Bauzuschläge durch Berücksichtigung von Ausrollphasen oder örtlich variablen Geschwindigkeitsreduzierungen verwirklicht. Die in den Fahrplänen vorgesehenen Fahrzeitzuschläge dienen vornehmlich zum Ausgleich von betrieblichen oder durch Baumaßnahmen hervorgerufenen Verspätungen. Sie betragen üblicherweise 5 bis 12 % der minimalen Fahrzeit (→ Abschnitt 1.8.4). Bei pünktlicher oder nur wenig verspäteter Abfahrt kann der verbleibende Fahrzeitzuschlag nun für die energiesparsame Fahrweise verwendet werden.

3.1 Grundlagen der energiesparsamen Fahrweise

Grundlage jeder energiesparsamen Fahrweise ist es, partiell mit einer im Verhältnis zur straffen Fahrweise geringeren Geschwindigkeit zu fahren. Man unterscheidet so genanntes ***Cruisen*** (Fahren mit konstanter Geschwindigkeit) und ***Coasten*** (Ausrollen). Die besten Ergebnisse werden durch eine Kombination von Cruisen und Coasten erreicht. Weiterhin können Fahren und Bremsen mit reduzierter Zug- bzw. Bremskraft sinnvoll sein.

Als Einzelmaßnahme ist das reine Coasten üblicherweise effektiver als das Cruisen. Die im Fernverkehr häufig anzutreffenden, sehr langen ebenen Strecken mit konstanter Streckenhöchstgeschwindigkeit sind für das reine Coasten jedoch ungeeignet, da hier häufig nicht genügend Ausrollphasen möglich sind. Im Nahverkehr zeigt sich jedoch, dass reines Coasten häufig annähernd so effizient ist wie eine Kombination aus Cruisen und Coasten, so dass hier üblicherweise reines Coasten angewendet wird. Reines Ausrollen hat zudem den Vorteil, dass es dem Tf sehr leicht angezeigt werden kann und dieser dann nur noch die Antriebsleistung auf Null zurücknehmen muss.

Beim Ausrollen vor der Bremsung wird zudem die Bremsarbeit reduziert. Bei Reibungsbremsen wird deshalb der mechanische Verschleiß und damit auch der Instandhaltungsaufwand verringert. Beim regenerativen Bremsen wird jedoch auch die zurück gespeiste Energie verringert, die andere Verbraucher im gleichen oder einem verbundenen Unterwerksabschnitt versorgen könnte. Dennoch spricht die Gesamtenergiebilanz im Allgemeinen für den Einsatz des Rollens.

Geschulte Triebfahrzeugführer mit guter Fahrplan- und Streckenkenntnis praktizieren die energiesparsame Fahrweise ansatzweise schon jetzt, indem sie vor der Bremsung eine Rollphase einlegen. Beobachtungen haben jedoch gezeigt, dass hiermit nur ein Teil des realisierbaren Potenzials ausgeschöpft wird ([ISB-1995] und eigene Erfahrungen).

In der Historie wurden unterschiedliche Verfahren getestet, die energiesparsame Fahrweise durch statische Hilfsmittel, wie z. B. vorher festgelegte Ausrolltafeln oder intensive Schulung zu realisieren [Schnabel-1982]. Diese hatten jedoch den Nachteil, dass sie nur schlecht auf die momentane Fahrplanlage oder den aktuellen Betriebsverlauf eingehen konnten. Erst in den letzten Jahren wurde die Computertechnik so leistungsfähig und preiswert, dass computergestützte dynamische Verfahren wirtschaftlich sinnvoll verwendet werden können.

Im Wesentlichen werden vier Fahrmethoden zur Realisierung der ESF angewendet [Schüler-Hainsch-1991] und [EWSN-1996a]. Sie treten jedoch nicht immer in ihrer reinen Form auf:

1. **Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit**
   Die Höchstgeschwindigkeit wird temporär und örtlich begrenzt verringert (Bild 22). Diese Fahrweise basiert auf dem Cruisen und führt zu einer Einsparung von kinetischer Energie für das Beschleunigen und die Überwindung des Laufwiderstandes. Dieser hat durch den aerodynamischen Widerstand einen zum Geschwindigkeitsquadrat proportionalen Anteil, d.h. bei hohen Geschwindigkeiten wächst der Energieverbrauch im Verhältnis zum Fahrzeitgewinn überproportional an.

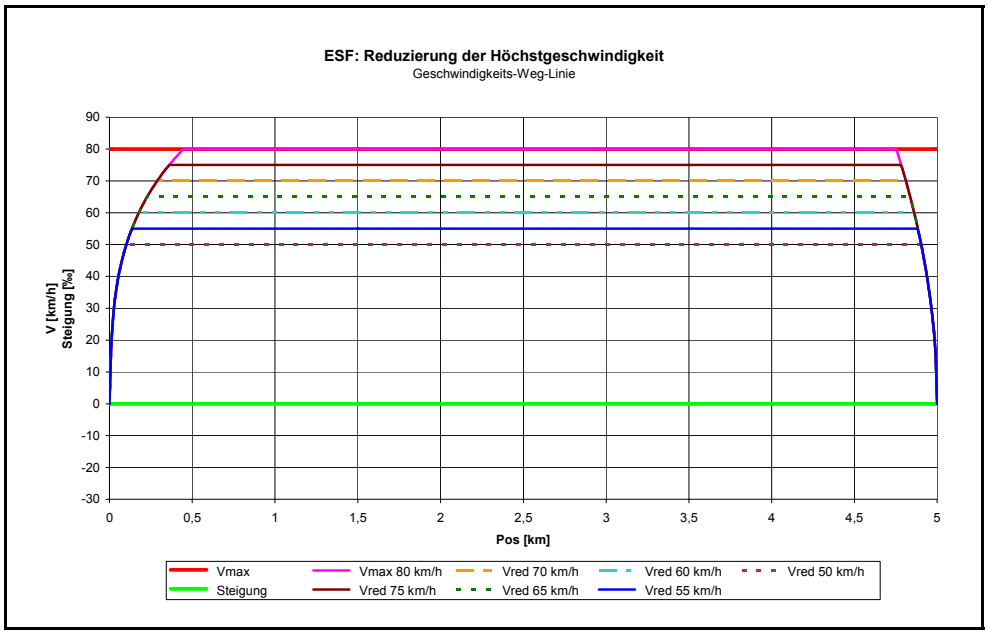


Bild 22: ESF: Reduzierung der Geschwindigkeit

2. Auslauf vor Bremsung

Die Zugkraft wird schon vor Erreichen des nominellen Bremseinsatzpunktes abgeschaltet (Bild 23). Ein Teil der vorhandenen kinetischen Energie wird zur Überwindung von Fahrwiderständen genutzt. Das Fahrzeug rollt und der Bremseinsatzpunkt wandert nach hinten.

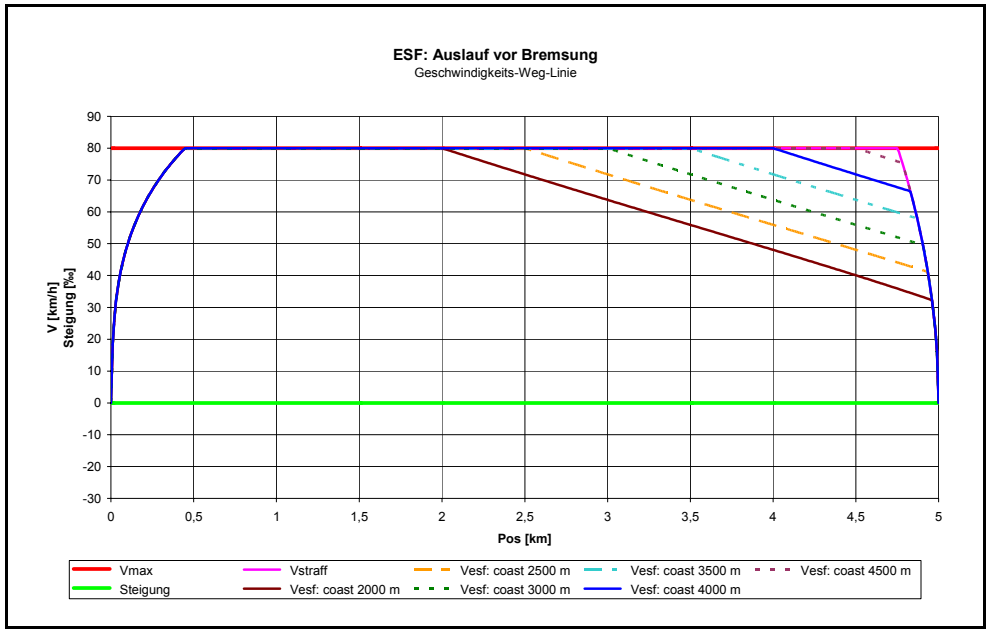


Bild 23: ESF: Auslauf vor Bremsung

3. Bergfahrt mit Schwung

Vor der Bergkuppe wird die Zugkraft abgeschaltet. Nachdem die Bergkuppe mit Schwung überfahren wurde, beschleunigt das Fahrzeug durch seine Schwerkraft wieder auf seine ursprüngliche bzw. die zulässige Streckenhöchstgeschwindigkeit (Bild 24). Die potentielle Energie wird für die Überwindung von Fahrwiderständen genutzt.

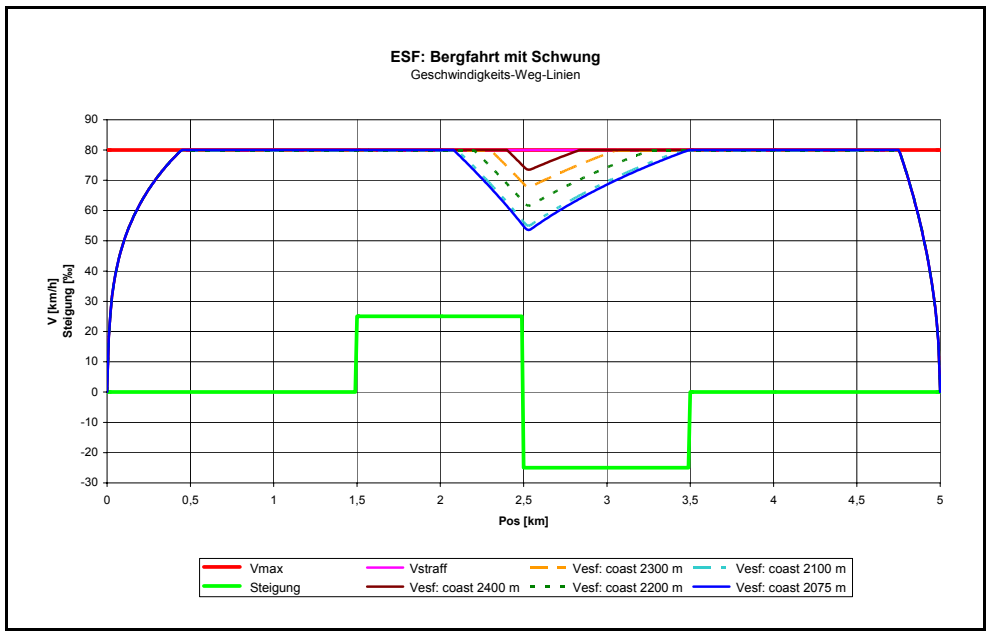


Bild 24: ESF: Bergfahrt mit Schwung

4. Restbeschleunigung durch Schwerkraft

In einem starken Gefälle wird das Fahrzeug durch seine Schwerkraft beschleunigt (Bild 25). Die potentielle Energie wird einerseits zur Überwindung von Fahrwiderständen verwendet und andererseits in kinetische Energie umgewandelt.

Wenn der Rollvorgang vor dem Gefälle einsetzt, entspricht diese Methode weitestgehend dem Modell einer Bergfahrt mit Schwung.

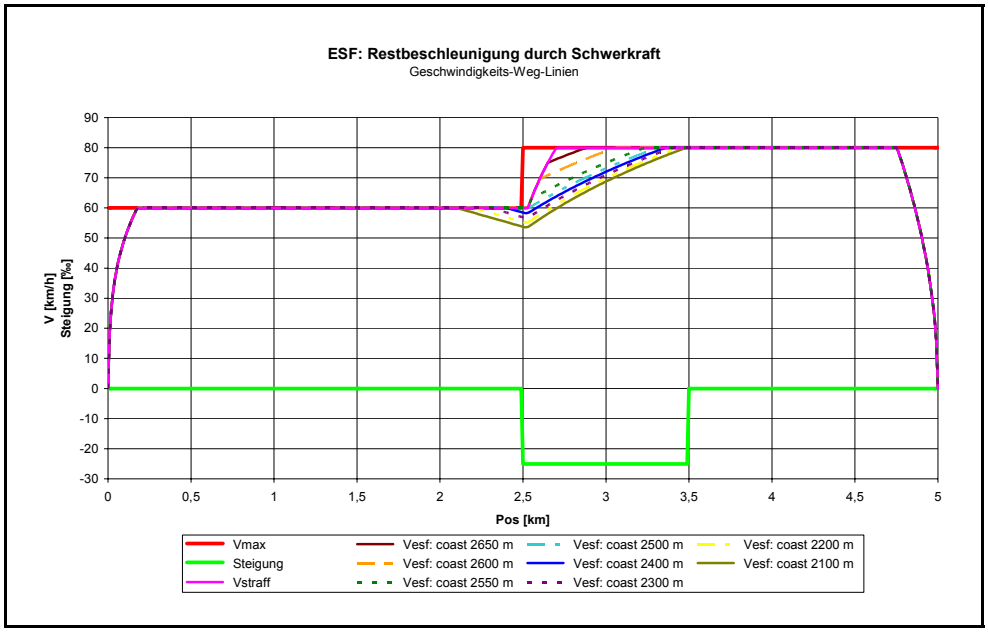


Bild 25: ESF: Restbeschleunigung durch Schwerkraft

Die drei letztgenannten Methoden basieren auf dem Prinzip des Coastens, d.h. die Verfahren zur Umsetzung der Fahrweise sind ähnlich.

Des Weiteren kommen verschiedene weitere Fahrweisen vor, z.B. die Fahrweisen mit reduzierter Anfahrzugkraft bzw. reduzierter Bremsverzögerung, ferner sog. Sägezahnfahrten, bei denen abwechselnd mit hoher Zugkraft und ohne Zugkraft gefahren wird. Diese Fahrweisen sind insbesondere bei thermischen Antriebssystemen interessant, um möglichst immer mit einem hohen Wirkungsgrad zu fahren (→ Abschnitt 2.2.2).

3.2 Cost-Time-Curve (CTC)

Die mögliche Fahrweise einer energiesparsamen Fahrt ist unter anderem abhängig von der zur Verfügung stehenden Fahrzeitreserve. Je mehr Fahrzeit zur Verfügung steht, desto früher kann die Zugkraft zurückgenommen werden und desto größer ist die Ausrollphase.

Zur Demonstration dieses Verhaltens wird ein Beispiel des Nahverkehrs berechnet. Hierzu werden unterschiedliche Fahrweisen eines dieselelektrischen Nahverkehrszuges auf einer 1000 m langen ebenen Strecke mit einer Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h simuliert (Tabelle 9, Bild 26). Die hier berechneten Werte sind rein theoretisch ermittelt. Sie berücksichtigen eine ideale Fahrt ohne Störungen, d.h. die Ergebnisse werden in der Realität voraussichtlich davon abweichen.

Fahrweise	Fahrzeit [s]	Energieverbrauch [kWh]	Vmax [km/h]
Straff	84,4	7,89	70,0
ESF	85,0	6,65	65,4
ESF	86,0	6,02	62,6
ESF	87,7	5,36	59,4
ESF	90,0	4,75	56,3
ESF	91,3	4,44	54,6
ESF	94,0	3,99	52,0
ESF	97,6	3,53	49,1
ESF	101,3	3,16	46,6

Tabelle 9: Nahverkehrsfahrten mit unterschiedlichen Fahrweisen

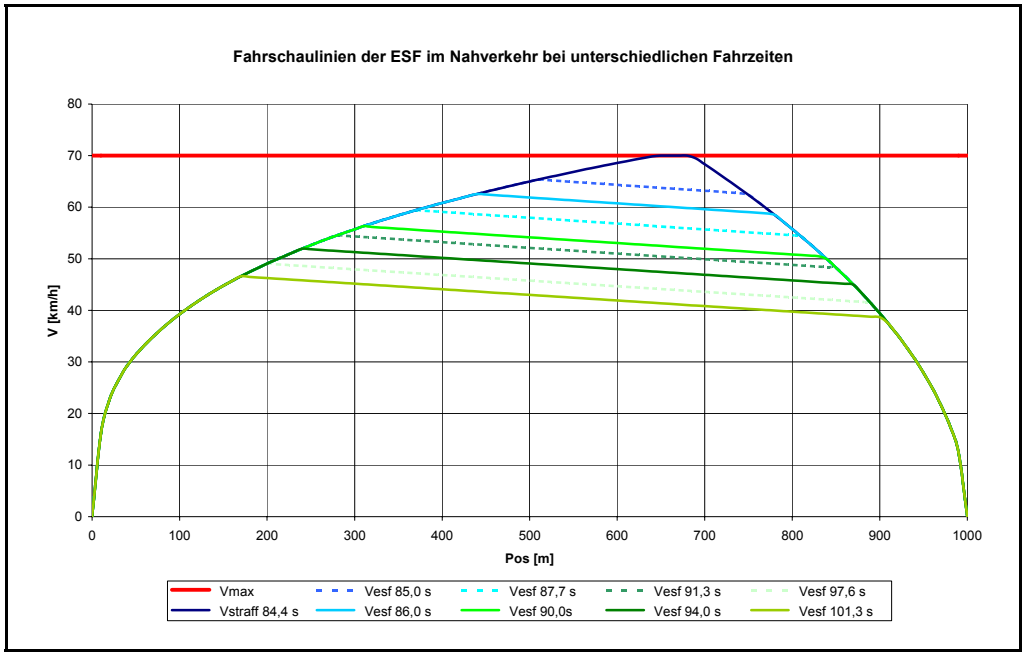


Bild 26: Fahrschaulinien der ESF im Nahverkehr bei unterschiedlichen Fahrzeiten

Je größer die Fahrzeitreserve ist, desto geringer ist gewöhnlich der Energieverbrauch. Dieses Verhalten kann mit einer Cost-Time-Curve (CTC) beschrieben werden [Pudney-1989]. Eine CTC beschreibt den Zusammenhang zwischen der Fahrzeit und dem Energieverbrauch bzw. den Kosten einer Fahrt. Hierzu wird für unterschiedliche Fahrweisen die Fahrzeit und der dazugehörige Energieverbrauch ermittelt und daraus eine Kurve gebildet. Idealerweise fällt diese im Bereich der niedrigen Fahrzeiten stark ab und wird im Bereich der höheren Fahrzeiten immer flacher (Bild 27). In speziellen Fällen, in denen die zur Verfügung stehende Fahrzeit nicht oder nur teilweise ausgenutzt werden kann oder bei komplexen Strecken mit starken Neigungswechseln oder extremen Geschwindigkeitsbeschränkungen, können Unstetigkeiten auftreten, die jedoch nicht charakteristisch sind.

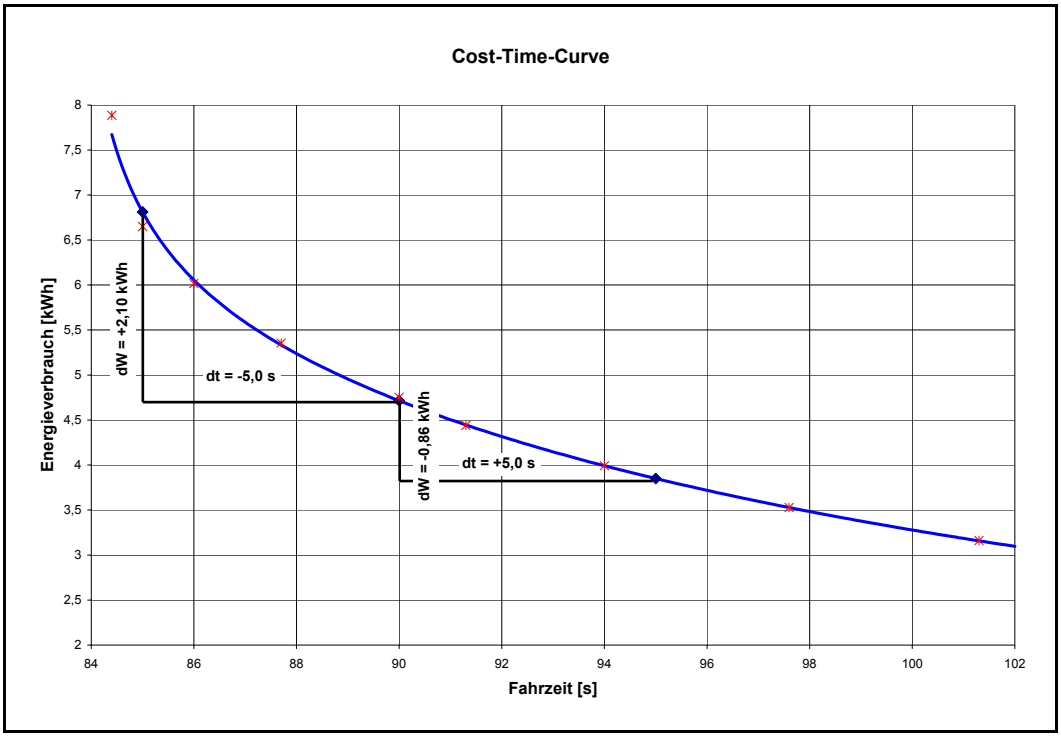


Bild 27: Cost-Time-Curve der Nahverkehrsfahrt aus Tabelle 9 bzw. Bild 26

Soll der Zusammenhang von Fahrzeit und Energieverbrauch als geschlossene Kurve dargestellt werden, kann diese durch Approximation gemessener oder simulierter Fahrzeit-Energie-Paare berechnet werden. Die geschlossene CTC bietet einen ersten Überblick über den Zusammenhang von zusätzlicher Fahrzeit und Energieverbrauch. Sie bildet jedoch nur einen idealisierten Zusammenhang ab. Es ist nicht gewährleistet, dass für jede beliebige zusätzliche Fahrzeit auch eine Fahrweise gefunden werden kann, die zu einer Energieeinsparung gemäß der CTC führt. Lediglich für die Stützpunkte der CTC ist diese (theoretisch) gewährleistet.

Pudney und Benjamin haben zur Bestimmung der geschlossenen CTC eine Methode entwickelt, die auf einer transformierten quadratischen Gleichung beruht [Pudney-1989]. Hierzu sind folgende Schritte nötig:

- Simulation der straffen Fahrweise: Das Ergebnis ist das Fahrzeit-Energieverbrauch-Paar (x_0,y_0).
- Simulation mehrerer energiesparsamer Fahrweisen mit unterschiedlichen Fahrzeitzuschlägen. Wichtig ist, dass die komplette Bandbreite der für diese Fahrt typischen Fahrzeitzuschläge abgedeckt wird. Es hat sich eine Anzahl von ca. fünf Simulationen mit den Fahrzeitzuschlägen von 4 %, 8 %, 12 %, 16 % und 20 % als sinnvoll erwiesen. Das Ergebnis sind n Paare aus Fahrzeit (t_i) und Energieverbrauch (c_i), wobei $i \in [1..n]$ ist.

- Transformation der jeweiligen Fahrzeit (t_i) und des Energieverbrauchs (c_i) in ein Paar (x_i,y_i) unter Verwendung der folgenden Vorschrift:

$$x_i = \left[t_i - 0{,}98 \cdot t_0\right] / r \qquad \text{X-Wert} \qquad \text{Gl. 3}$$

$$y_i = x_i / c_i \qquad \text{Y-Wert} \qquad \text{Gl. 4}$$

$$r = \left[t_n - t_0\right] / 4 \qquad \text{Maßgeblicher Bereich} \qquad \text{Gl. 5}$$

  Der Faktor $0{,}98 \cdot t_0$ repräsentiert die vertikale Asymptote der CTC und wurde empirisch gefunden.

- Bestimmung der Koeffizienten der Gleichung Gl. 6, so dass der mittlere quadratische Fehler minimal wird.

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \qquad \text{Quadratische Funktion} \qquad \text{Gl. 6}$$

  Hierzu wird das Least-Square-Fit-Verfahren nach [Forsythe-1957] verwendet.

- Zur Bestimmung des zu erwartenden Energieverbrauchs zu einer bestimmten Fahrzeit t_s innerhalb des Gültigkeitsbereiches [t_0..t_n] ist t_s entsprechend der oben genannten Vorschrift zu transformieren und in Gl. 6 einzusetzen. Der zugehörige Energieverbrauch ergibt sich aus der Auflösung von Gl. 4 nach c_s.

Die somit gefundene Approximation gilt innerhalb des Definitionsbereiches [t_0..t_n], wobei der maximale Fahrzeitzuschlag höchstens 30 % sein sollte, da ansonsten nicht gewährleistet werden kann, dass sinnvolle Fahrweisen gefunden werden und dass die gewählte Approximation gültig ist. Bei Elektrotraktion mit Rückspeisefähigkeit kann es vorkommen, dass der Gesamtenergieverbrauch auf einer Strecke mit hohem Gefälle negativ ist. In diesem Fall ist die gewählte Approximation ungünstig, sie kann jedoch durch die Einführung eines Offsets so verschoben werden, dass alle Energieverbrauchswerte positiv sind. Dieser Offset muss dann bei der Bestimmung des Energieverbrauchs wieder abgezogen werden.

Aus der CTC lässt sich leicht entnehmen, dass schon geringe Fahrzeitzuschläge zu deutlichen Energieeinsparungen führen, während bei sehr großen Fahrzeitzuschlägen die zusätzlichen Einsparungen geringer werden.

Wenn man bei dem oben berechneten Beispiel von einer nominellen Fahrzeit von 90 s ausgeht, ergibt sich daraus ein Energieverbrauch von 4,75 kWh. Wird die Fahrzeit um 5 s auf 85 s verkürzt, so ergibt sich ein Energieverbrauch von 6,65 kWh (+ 40 %). Bei einer Verlängerung der Fahrzeit um 5 s auf 95 s würde sich hingegen ein Energieverbrauch von 3,85 kWh (- 19 %) ergeben.

Dieses Verhalten macht sehr deutlich, dass die Verteilung der Fahrzeitzuschläge auf die einzelnen Streckenabschnitte einen deutlichen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch hat. Dies stellt ein Potenzial zur Optimierung von Fahrplänen hinsichtlich des Energieverbrauchs dar (→ Abschnitt 3.8).

3.3 Algorithmen zur Bestimmung der energiesparsamen Fahrweise

3.3.1 Grundlagen

Die Bestimmung der ESF lässt sich theoretisch auf ein typisches mathematisches Optimierungsproblem zurückführen. Unter Berücksichtigung bestimmter Randbedingungen soll eine optimale Fahrweise gefunden werden, bei der eine Zielgröße maximiert bzw. minimiert wird. Im Falle der ESF ist die Zielfunktion die Minimierung des Energieverbrauchs unter Berücksichtigung der Streckentopografie, der Streckenhöchstgeschwindigkeiten, der Fahrzeugdaten sowie der Streckenbelegung und des Fahrplans.

Der starke Einfluss der häufig nicht analytisch darzustellenden Strecken- und Fahrzeugdaten auf die Fahrdynamik sowie die komplexen Zusammenhänge innerhalb der Fahrdynamik lassen eine exakte analytische Bestimmung der ESF allenfalls unter sehr einfachen und idealen Bedingungen zu, so dass stattdessen numerische Optimierungsverfahren auf der Basis von Zugfahrtsimulationen (→ Anhang B) eingesetzt werden, um sich dem theoretischen Optimum zu nähern.

Die beste Methode zur Annäherung an das theoretische Optimum wäre die Simulation aller möglichen Kombinationen von Fahr- und Bremsstufen in einem vorher festgelegten Zeitraster. Diese Methode führt jedoch zu einem extrem hohen und nicht zu beherrschenden Rechenaufwand (Tabelle 10).

Anwendungsgebiet	ESF Nahverkehr
Nominelle Fahrzeit	$t_{ges} = 120\,\mathrm{s}$
Zeitraster	$\Delta t = 10\,\mathrm{s}$
Anzahl der Zeitschritte	$n = \frac{t_{ges}}{\Delta t} = 12$
Anzahl der Fahr- und Bremsstufen	$m = 11$ (5 Fahrstufen + rollen + 5 Bremsstufen)
Anzahl der Kombinationen	$z = m^n = 11^{12} = 3{,}1 \cdot 10^{12}$
Zeitbedarf	$t_{sim} = 0{,}1\,\mathrm{ms/Simulation\ (Annahme)}$ $t_{rechen} = 3{,}1 \cdot 10^8\,\mathrm{s} \approx 10\,\mathrm{Jahre}$

Tabelle 10: Beispiel zur Berechnung der ESF im Nahverkehr unter Verwendung des Fahrstufen-Kombinationsverfahrens

Obwohl es sich bei diesem Anwendungsbeispiel um einen recht trivialen Fall handelt und der Zeitbedarf pro Simulation optimistisch abgeschätzt ist, ist der Rechenbedarf nicht akzeptabel. Da die Anzahl der Zeitschritte bei der Berechnung der Kombinationen im Exponenten steht, sind längere Fahrten auf diese Art überhaupt nicht zu berechnen. Weiterhin ist zu beachten, dass nur ein sehr kleiner Anteil der zu berechnenden Kombinationen zu einer gültigen Fahrt führen wird, bei der die Zielstation innerhalb der nominellen Fahrzeit erreicht und die Streckenhöchstgeschwindigkeit niemals überschritten wird. Deshalb kann das Verfahren dahingehend optimiert werden, dass nur Fahrweisen untersucht werden, die diese

Bedingungen einhalten. Trotzdem sind Verfahren, bei denen Fahrstufenkombinationen untersucht werden, äußerst rechenintensiv. Sie werden deshalb nur selten angewendet. Üblich sind stattdessen die später beschriebenen gezielten Untersuchungsverfahren bestimmter Fahrweisen und ihrer Kombinationen.

Die Verfahren zur Bestimmung der energiesparsamen Fahrweise werden zum einen anhand des Verkehrstyps und zum anderen anhand der Einsatzart (online und offline) kategorisiert.

Der Verkehrstyp ist entscheidend für die Komplexität der Algorithmen. Im Nahverkehr können durch die kurzen Strecken und die damit verbundenen kurzen Fahrzeiten einfachere Algorithmen verwendet werden, bei denen normalerweise nur eine einzelne Fahrweise angewendet wird. Im Fernverkehr ist jedoch die Kombination von unterschiedlichen Fahrstrategien innerhalb eines Fahrtabschnittes nötig, um nahe an das theoretische Optimum zu gelangen.

Die Einsatzart hat zunächst keinen direkten Einfluss auf den eigentlichen Algorithmus zur Bestimmung der ESF, hat aber entscheidenden Einfluss auf dessen Umfeld, die Datenqualität und die Anforderungen an die Berechnungszeit.

3.3.2 Theoretische (Offline-) Verfahren

Offline-Verfahren werden zur theoretischen Bestimmung der ESF verwendet. Sie sind vom aktuellen Betriebsablauf unabhängig und basieren ausschließlich auf Solldaten, auf vorher aufgezeichneten Istdaten einzelner Fahrten oder auf Durchschnittsdaten mehrerer aufgezeichneter Fahrten.

Offline-Verfahren sind durch den Einsatz von Arbeitsplatzrechnern oder Servern unter Verwendung einer grafischen bzw. webbasierten Benutzeroberfläche charakterisiert. Eine Echtzeitverarbeitung ist nicht nötig; die maximale Rechenzeit ist nur von der zumutbaren Wartezeit des Benutzers abhängig. Durch geeignete Verfahren und kleine Schrittweiten kann das theoretische ESF-Optimum annähernd bestimmt werden, wobei dann die Rechenzeit stark ansteigen kann.

3.3.3 Online-Verfahren

Online-Verfahren zur Bestimmung der ESF werden normalerweise auf Bordrechnern des Fahrzeuges eingesetzt, um in Echtzeit eine Fahrempfehlung zu berechnen (Advice System; → Kapitel 4). Speziell im Nahverkehr ist eine sehr kurze Rechenzeit nötig, da ansonsten die Fahrempfehlung zu spät ermittelt wird, so dass sie nicht mehr rechtzeitig umgesetzt werden kann.

Die hier beschriebenen Algorithmen zur Verwirklichung der ESF basieren auf der Grundlage, dass während der kompletten Fahrt kontinuierlich bzw. in regelmäßigen Abständen ermittelt wird, welche der vom System unterstützten Fahrweisen am besten geeignet ist, pünktlich und energiesparsam den nächsten Zielpunkt zu erreichen.

3.3.4 Personen-Fernverkehr

Die relativ langen Stationsabstände sowie die damit häufig verbundenen komplexen topografischen Begebenheiten einer Fernverkehrsstrecke erfordern entsprechend komplexe Verfahren zur Bestimmung der ESF. Diese besteht normalerweise aus einer Kombination von mehreren, teilweise unterschiedlichen Fahrmethoden.

Da das oben beschriebene Fahrstufenkombinationsverfahren wegen des nicht handhabbaren Aufwandes ausscheidet, kommen üblicherweise Verfahren zur Anwendung, bei denen zunächst potenziell interessante Fahrmethoden berechnet werden und daraus dann die beste Kombination gesucht wird.

Die in [Schüler-Hainsch-1991] hergeleiteten und in [EWSN-1996a] verbesserten Algorithmen zur Bestimmung der ESF im Fernverkehr beruhen auf diesem zweistufigen Vorgehen:

1. Phase: Ermittlung von potenziell interessanten Fahrphasen mit ggf. unterschiedlichen Fahrmethoden. Zu jeder berechneten Fahrmethode wird der im Verhältnis zur straffen Fahrweise zusätzliche Fahrzeitverbrauch und die Energieeinsparung ermittelt. Diese Phase muss für jede Kombination auf Fahrzeug und Strecke nur einmal durchgeführt werden.

2. Phase: Ermittlung der optimalen Kombination der in der ersten Phase ermittelten potenziellen Fahrphasen mit der Bedingung, den Zielpunkt pünktlich zu erreichen und dabei möglichst wenig Energie zu verbrauchen. Bei der Kombination der Fahrphasen ist darauf zu achten, dass sich diese gegenseitig nicht ausschließen und dass beim Übergang von einer Phase zur nächsten der Fahrzustand (Position, Geschwindigkeit, etc.) identisch ist.

Dieses Verfahren beruht auf einer Optimierung der theoretischen straffen Fahrweise. Weil sowohl am Anfang als auch am Ende einer Fahrphase immer die ortsabhängige Momentangeschwindigkeit der straffen Fahrweise erreicht werden muss, ist es zunächst nur für die Offline-Optimierung anzuwenden.

3.3.4.1 Ermittlung potenziell interessanter Fahrphasen

Ausgehend von der straffen Fahrweise werden Phasen mit Fahrmethoden gesucht, die zur Reduzierung des Energieverbrauchs beitragen können. Hierfür kommen hauptsächlich die schon beschriebenen Fahrmethoden ***„Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit“***, ***„Auslauf vor Bremsung“***, ***„Bergfahrt mit Schwung“*** und ***„Restbeschleunigung durch Schwerkraft“*** in Betracht. Da es sich bei den drei letztgenannten Methoden um den Einsatz von Rollphasen handelt, können diese ähnlich behandelt werden.

Zunächst wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeit am Anfang und am Ende der Fahrphase derjenigen der straffen Fahrweise an demselben Ort entspricht.

Rollphasen werden entweder durch die Festlegung des Startpunktes mit anschließender Vorwärtssimulation oder durch Festlegung des Endpunktes mit anschließender Rückwärtssimulation berechnet. Die fehlende zweite Begrenzung wird durch das erneute Berühren der Fahrschaulinie der straffen Fahrweise bei der Rollsimulation festgelegt. Wenn während der

Rollsimulation die vorher festgelegte Mindestgeschwindigkeit unterschritten wird, wird die Simulation abgebrochen und die Rollphase verworfen.

Für das Suchen von potenziellen Rollphasen können zwei Methoden eingesetzt werden:

- Konsequentes Testen aller möglichen Rollphasen durch schrittweise Variation des Startpunktes mit anschließender Vorwärtssimulation über die gesamte Strecke. Wenn die Schrittweite angemessen klein ist, werden bei dieser Methode alle möglichen Rollphasen gefunden. Damit verbunden ist jedoch ein sehr hoher Aufwand.
- Suchen der potenziellen Rollphasen anhand der Streckencharakteristik und der Bremsphasen bei der straffen Fahrweise. Damit wird gezielt nach Phasen mit „Auslauf vor Bremsung“, „Bergfahrt mit Schwung“ und „Restbeschleunigung durch Schwerkraft“ gesucht. Normalerweise wird zunächst nach der längsten Rollphase gesucht, mit der die Randbedingungen eingehalten werden. Danach werden durch das schrittweise Verkleinern des Rollbereiches Varianten ermittelt, bei denen sowohl der Fahrzeitzuschlag als auch die Energieeinsparung geringer wird und die sich gegenseitig ausschließen (Beispiel: Bild 24, Seite 43).

Durch das gezielte Suchen ist der Simulationsaufwand geringer, jedoch werden unter Umständen Rollphasen, die sich über weite Abschnitte erstrecken, nicht gefunden.

Bei der örtlichen Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit sind die Grenzen der Phasen so zu bestimmen, dass dort die Geschwindigkeit bei straffer Fahrweise der reduzierten Höchstgeschwindigkeit entspricht bzw. entsprechend erforderliche Beschleunigungs- oder Brems- oder Rollphasen berücksichtigt werden. Die Kombination von Phasen mit reduzierter Höchstgeschwindigkeit mit Rollphasen ist möglich, jedoch recht komplex. Hierzu müssen spezielle Rollphasen berechnet werden, die nicht auf der straffen Fahrweise, sondern auf der Fahrweise bei reduzierter Geschwindigkeit beruhen.

Eine Fahrphase wird durch die folgenden Informationen charakterisiert:

- Position und Geschwindigkeit am Anfang der Fahrphase,
- Position und Geschwindigkeit am Ende der Fahrphase,
- Fahrmethode und ggf. die Parameter zur Präzisierung der Fahrmethode (z.B. Höchstgeschwindigkeit, Ausrollposition, etc.),
- Ggf. eine Referenz auf die zugrunde liegende Fahrweise, wenn dies nicht die straffe Fahrweise ist,
- Energieverbrauch während der Fahrphase bzw. Energieverbrauchsdifferenz bezüglich der straffen Fahrweise (hier muss sowohl die Traktionsenergie als auch die ggf. zurückgespeiste Energie berücksichtigt werden) und
- Fahrzeit vom Anfang zum Ende der Fahrphase bzw. die Fahrzeitdifferenz bezüglich der straffen Fahrweise.

Bei der Auswahl der zu berücksichtigenden Fahrphasen sollten nur solche berücksichtigt werden, die auch real zu verwirklichen sind, d.h. von der Fahrzeug-, Antriebs- und Bremssteuerung auch sinnvoll umgesetzt werden können. Weiterhin sollten im nicht automatisierten

Fernverkehr die einzelnen Phasen mindestens 5 s andauern (bei 280 km/h entspricht dies ca. 400 m) und eine Geschwindigkeit von 30 km/h sollte nicht unterschritten werden.

Da bei der anschließenden Optimierung der Kombinationen die Anzahl der zu berücksichtigenden Fahrphasen normalerweise überproportional eingeht, sollte diese möglichst klein gehalten werden. Fahrphasen, die sich nur geringfügig von anderen unterscheiden, sollten deshalb nicht berücksichtigt werden.

3.3.4.2 Ermittlung der optimalen Kombination von Fahrphasen

Aus der Menge der berechneten potenziellen Fahrphasen muss diejenige Kombination gefunden werden, die insgesamt den geringsten Energieverbrauch zur Folge hat. Sollen auch Durchfahrtszeiten an Betriebsstellen zwischen den Haltepunkten berücksichtigt werden, hat jedoch normalerweise deren Einhaltung Priorität gegenüber der Energieeinsparung.

Zunächst werden alle Fahrphasen aussortiert, deren zusätzlicher Zeitverbrauch größer ist als die zur Verfügung stehende Reservezeit. Danach werden rekursiv alle Kombinationen von Fahrphasen berechnet. Es ist zu beachten, dass sich viele Fahrphasen gegenseitig ausschließen (z.B. durch Überschneidung oder durch Überschreitung der Zeitreserve), so dass aus Effizienzgründen nur solche Kombinationen getestet werden, die sich nicht ausschließen und bei denen eine Verbesserung der Energieeinsparung bzw. eine bessere Einhaltung der Durchfahrtszeiten zu erwarten ist.

Ist die optimale Kombination von Fahrphasen gefunden, sollte die gesamte Fahrt unter Berücksichtigung der einzelnen Fahrphasen komplett simuliert werden, um Ungenauigkeiten zu beseitigen, die durch die Kombination der verschiedenen Fahrphasen und durch die Übergangsphasen auftreten.

Anhang C enthält ein ausführliches Beispiel zur Suche nach einer optimalen Kombination von Fahrphasen.

3.3.4.3 Erweiterungen zum Einsatz in Online-Systemen

Die Online-Optimierung ist durch drei entscheidende Merkmale gekennzeichnet, die einen Einfluss auf den zu verwendenden Algorithmus haben:

1. **Momentaner Fahrzustand**
   Der momentane Fahrzustand, der durch Position, Zeit, Geschwindigkeit und Fahrstufe charakterisiert ist, entspricht normalerweise nicht exakt dem momentanen Fahrzustand, wie er einer theoretischen Berechnung der Fahrphasen zugrunde gelegt wird. Bei kleinen Abweichungen kann dies vernachlässigt werden, jedoch können schon Abweichungen von 5 km/h zu einem unerwarteten Fahrtverlauf führen. Deshalb muss in diesem Falle entweder eine Übergangsphase ermittelt und realisiert werden, um das Fahrzeug auf den Sollzustand zu bringen, oder die theoretisch ermittelten Fahrphasen müssen dem realen Fahrzustand angepasst werden.

2. **Ortungsfehler und Reaktionszeit**
   Online-Verfahren zur Bestimmung der ESF basieren auf der genauen momentanen Position des Fahrzeuges. Die Bestimmung des Ortes ist häufig ungenau und kann zu ungeplanten Fahrtverläufen führen (→ Abschnitt 3.5). Durch die Berücksichtigung typischer Ungenauigkeiten des verwendeten Ortungssystems schon während der Optimierung können Fahrweisen präferiert werden, bei denen diese Ortungsfehler einen weniger nachteiligen Einfluss auf den Fahrtverlauf haben.

3. **Rechenzeit**
   Die Optimierung der Fahrweise im Fernverkehr kann durch die vielen Kombinationsmöglichkeiten von unterschiedlichen Fahrphasen recht komplex und dadurch rechenzeitaufwändig werden. Die Optimierung sollte regelmäßig, z.B. alle ein bis zwei Minuten, während der ganzen Fahrt durchgeführt werden, um aktuelle Einflüsse zu berücksichtigen. Sie basiert auf dem zur Startzeit der Optimierung bestimmten Fahrzustand, kann jedoch erst nach Beendigung der Optimierung und unter Berücksichtigung einer Vorlauf- und Reaktionszeit auf den Fahrtverlauf Einfluss nehmen. Da sich in dieser Zeit der Fahrzustand unter Umständen unvorhergesehen ändern kann, ist die Fahrempfehlung häufig schon wieder veraltet, bevor sie realisiert werden kann. Aus diesem Grund muss die Rechenzeit zur Bestimmung der optimalen Fahrweise minimiert werden.

   Im Fernverkehr kann davon ausgegangen werden, dass zunächst mit voller Zugkraft beschleunigt wird und die optimierten Fahrphasen erst etwas später auftreten. Dadurch kann für die erste Optimierung mehr Zeit aufgewendet werden als für die späteren Optimierungen. Die erste Optimierung ist jedoch auch die aufwändigste, da die komplette Fahrt simuliert und optimiert werden muss. Je näher sich das Fahrzeug dem Zielpunkt nähert, desto geringer ist der Optimierungsbereich und damit auch der Spielraum zur Optimierung der Fahrweise. Weiterhin kann auf den vorhergehenden Optimierungen aufgebaut werden, wenn sich die Randbedingungen nur geringfügig geändert haben. Damit kann dann gezielt eine Feinoptimierung durchgeführt werden, indem die einzelnen Fahrphasen nur noch geringfügig variiert werden.

   Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Rechenzeit ist die Reduzierung der zu berücksichtigenden potenziellen Fahrphasen. Die Variation von gleichartigen Fahrphasen, die sich nur in der Länge unterscheiden, geht exponentiell in die Rechenzeit ein. Durch die Reduzierung der Varianten, verbunden mit einer späteren Feinoptimierung der einzelnen Fahrphasen, kann die Rechenzeit stark reduziert werden, ohne dass darunter die Energieeinsparung wesentlich leidet.

   Durch eine dynamische Vereinfachung der verwendeten Algorithmen und die Reduktion der untersuchten Kombinationen kann die Rechenzeit der zur Verfügung stehenden Zeit angepasst werden. Eine vereinfacht optimierte und auch umgesetzte Fahrweise ist immer noch deutlich besser, als eine theoretisch optimale Fahrweise, die jedoch nicht oder nur teilweise umgesetzt werden kann.

Bei einer Berücksichtigung dieser Merkmale kann der beschriebene Basisalgorithmus auch in einem Online-System eingesetzt werden.

3.3.5 Güterverkehr

Aus Sicht der ESF unterscheidet sich der Güterverkehr vom Personen-Fernverkehr hauptsächlich durch drei Merkmale:

1. **Fahrzeugeigenschaften**
   Im Güterverkehr werden sehr unterschiedliche Fahrzeuge eingesetzt, die Zugkonfigurationen wechseln täglich und sind nur schwer vorhersehbar. Da die ESF von den fahrdynamischen Parametern, der Fahrzeuglänge sowie der Masse und der Masseverteilung abhängig ist, müssen diese Daten relativ genau bekannt sein. Eine vorherige Eingabe aller relevanten Daten scheidet bei Online-Verfahren aus Aufwandsgründen meist aus, so dass die Eingaben auf einige wenige Parameter reduziert werden müssen. Alle anderen Parameter müssen während der Fahrt vom System selbst ermittelt bzw. erlernt werden. Der Einfluss der Parameter auf die Fahrdynamik und die Verfahren zur Bestimmung der Parameter wurden am Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen der Universität Hannover in [ISB-1998a] und [Kapitzke-2002] ansatzweise untersucht. Noch liegen keine Erfahrungen aus der Praxis vor, so dass die Qualität der ESF im Güterverkehr allenfalls theoretisch bestimmt werden kann.

2. **Fahrplan**
   Eine Grundlage zur Optimierung der Fahrweise ist der Sollfahrplan. Während die Fahrpläne des Personenverkehrs minutengenau geplant werden, werden für den Güterverkehr die benötigten Trassen zwar im Voraus grob geplant, die Durchführung der Fahrt weicht aber von dieser Planung normalerweise deutlich ab. Dies führt dazu, dass ein Advice System keine realistische Grundlage zur Optimierung der Fahrt hat.

3. **Fahrstraßenzuweisung bzw. -belegung**
   Da der Güterverkehr gegenüber dem Personenverkehr häufig eine geringere Priorität hat, werden Güterzüge häufig angehalten, um höherwertigen Verkehr vorbeizulassen. Diese Vorgänge sind von reinen Onboard-Systemen nicht vorhersehbar, d.h. sie können in der Optimierung nicht berücksichtigt werden.

Während das Problem der unbekannten Fahrzeugdaten durch eine rein fahrzeugseitige Messtechnik und intelligente Algorithmen lösbar ist, erfordern die beiden anderen Probleme ein kombiniertes System, bei dem das fahrzeugseitige Advice System von der stationären Betriebsleittechnik unterstützt wird (→ Abschnitt 3.7.3). Da diese Technologie frühestens mit der großflächigen Verbreitung von ETCS und GSM-R zur Verfügung steht, macht die Einführung der ESF im Güterverkehr auf hochbelasteten Strecken zunächst nur wenig Sinn. Andererseits verspricht die ESF gerade im Güterverkehr hohe Einsparungen, wenn Abbrems- und Anfahrvorgänge vermieden oder reduziert werden können.

Im Güterverkehr auf wenig belasteten Strecken, wie er z.B. in den großen Flächenstaaten betrieben wird, oder bei hochwertigem Güterverkehr auf eigenen Güterverkehrsstrecken können auch mit rein fahrzeugseitigen Systemen hohe Einsparungen erzielt werden, wenn die genauen Fahrzeugdaten bekannt sind oder dynamisch ermittelt werden können. Die reinen Optimierungsalgorithmen entsprechen dann weitestgehend denen des Personen-Fernverkehrs.

3.3.6 Nahverkehr

Der Nahverkehr wird durch kurze Stationsabstände, geringe Geschwindigkeiten und relativ hohe Beschleunigungen und Bremsverzögerungen charakterisiert. Durch die kurze Fahrzeit kann häufig nur eine einzelne Fahrstrategie der ESF angewendet werden.

Die Algorithmen des Personen-Fernverkehrs eignen sich prinzipiell auch für den Nahverkehr. Aufgrund der kurzen Fahrzeiten muss jedoch gewährleistet sein, dass die Fahrempfehlung sehr schnell berechnet wird und dass das System schnell auf ungeplante Zustandsänderungen reagiert.

3.3.6.1 Vereinfachung durch Reduktion auf eine einzelne Fahrempfehlung

Die spezifischen Eigenschaften des Nahverkehrs lassen einen einfacheren Berechnungsalgorithmus zu, bei dem nur eine einzelne Fahrempfehlung gegeben wird. Normalerweise ist dies der Auslauf vor Bremsung oder die Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit.

Bei diesem vereinfachten Verfahren wird regelmäßig (z.B. jede Sekunde) überprüft, ob der aktuelle Fahrzustand den Einsatz einer Fahrphase zur Reduzierung des Energieverbrauchs zulässt, ohne dass das Fahrzeug die nächste Station verspätet erreicht oder eine vorher festgelegte minimale Geschwindigkeit unterschreitet. Die Reaktionszeit des Tf und der Antriebssteuerung kann durch eine Latenzzeit berücksichtigt werden, während der von einer gleich bleibenden Beschleunigung ausgegangen wird. Durch die ständige Kontrolle des aktuellen Fahrzustandes, verbunden mit einer kleinen Ungenauigkeit bei der Ermittlung der Fahrzeit zum nächsten Halt, könnte es zu einem ständigen Wechsel der Fahrempfehlung kommen. Dies kann jedoch leicht durch den Einsatz einer Hysterese verhindert werden. Sobald eine energieverbrauchssenkende Fahrempfehlung gegeben wurde, wird eine minimale Verspätung von wenigen Sekunden erlaubt, so dass die Fahrempfehlung erst dann zurückgenommen wird, wenn das Fahrzeug so langsam wird, dass ein Überschreiten dieser erlaubten Verspätung droht.

Für die bei jeder Berechnung zu ermittelnde Rest-Fahrzeit zum nächsten Betriebshalt muss eine komplette Zugfahrtsimulation unter Berücksichtigung des aktuellen Fahrzustandes, der optimierten Fahrstrategie, der Reaktionszeit und der Streckencharakteristik sowie der Fahrzeugdaten durchgeführt werden. Hierfür müssen all diese Daten onboard zur Verfügung stehen.

3.3.6.2 Vereinfachte Onboard-Simulation durch Annahme einer durchschnittlichen Roll- und Bremsverzögerung

Die Berechnung des Rolleinsatzpunktes kann vereinfacht werden, wenn anstatt einer vollständigen Simulation der Fahrt zur nächsten Station nur eine einfache Berechnung der Roll- und der Bremsphase unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Roll- und Bremsverzögerung durchgeführt wird.

Die aktuelle Rollverzögerung ist von der Momentangeschwindigkeit (Laufwiderstand) und vom Ort (Streckenwiderstände) abhängig, wohingegen die Betriebsbremsverzögerung bei normalen Witterungsverhältnissen als konstant angenommen werden kann (Bild 28).

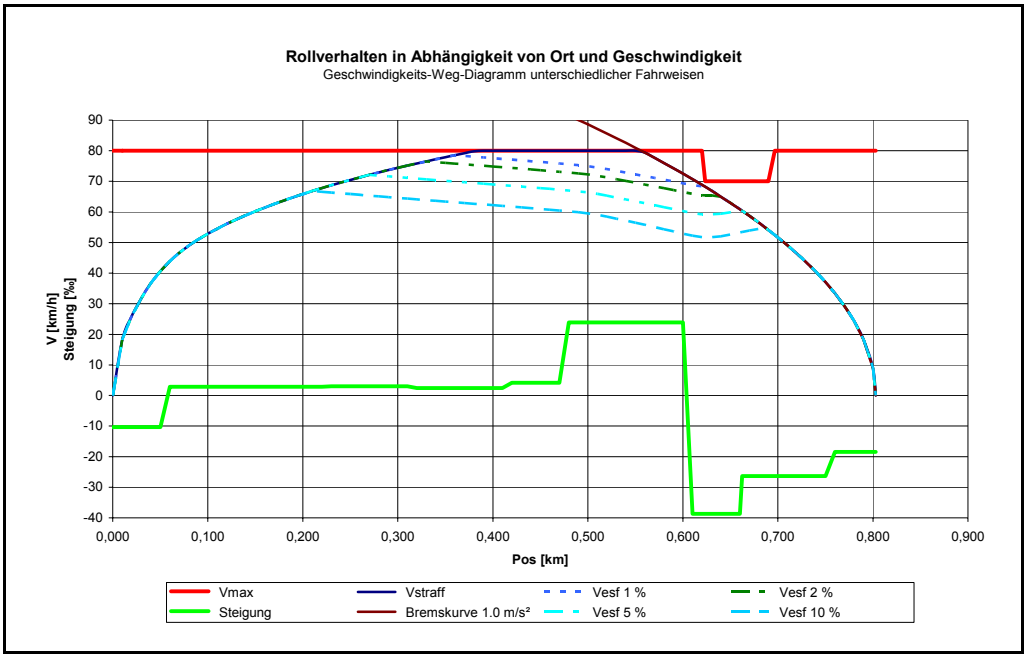


Bild 28: Rollverhalten in Abhängigkeit von Position und Geschwindigkeit

Zur schnellen Bestimmung des optimalen Rolleinsatzpunktes muss von einer konstanten Rollverzögerung a_{roll} (zwischen Rolleinsatzpunkt und Bremseinsatzpunkt) sowie von einer konstanten Bremsverzögerung a_{brems} (zwischen Bremseinsatzpunkt und Stillstand) ausgegangen werden. Da die Größe der durchschnittlichen Rollverzögerung jedoch orts- und geschwindigkeitsabhängig ist, muss diese schnell ermittelbar sein. Pudney hat hierfür ein Verfahren beschrieben, bei dem das orts- und geschwindigkeitsabhängige durchschnittliche Ausrollverfahren mit einer Tripel-Menge beschrieben wird [Pudney-1985] und [Benjamin-1987]. Ein Tripel besteht aus dem Rolleinsatzpunkt (bzw. der Distanz zum Haltepunkt), der Geschwindigkeit am Rolleinsatzpunkt und der durchschnittlichen Rollverzögerung bis zum Einsetzen der Bremsung. Die Tripel-Menge ist fahrzeug- und streckenabhängig, d.h. sie muss für jeden Fahrzeugtyp und jeden Streckenabschnitt ermittelt werden.

Die Tripel-Menge kann durch fahrdynamische Simulationen des Ausrollens bestimmt werden. Hierzu werden Rollphasen für unterschiedliche Orte und Anfangsgeschwindigkeiten simuliert, deren Ende durch das Schneiden der Bremskurve definiert ist. Anhand jeder Simulation können mehrere Tripel ermittelt werden, wenn die durchschnittliche Bremsverzögerung bis zum Bremseinsatzpunkt für mehrere Anfangspunkte auf der Geschwindigkeits-Weg-Linie der simulierten Rollphase ermittelt wird (Bild 29, Bild 30).

Die Bestimmung der durchschnittlichen Ausrollverzögerung basiert auf den fahrdynamischen Zusammenhängen der gleichmäßig beschleunigten Bewegung (→ Anhang A.2.2.2; Gl. 56 bis Gl. 61). Die durchschnittliche Ausrollverzögerung kann wahlweise auf Basis der Zeit (Gl. 57 bis Gl. 58) oder auf Basis der Entfernung (Gl. 59 bis Gl. 61) bestimmt werden, wobei die jeweils andere Größe dann bei der Auswertung fehlerbehaftet ist, da die reale Bewegung nicht genau einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung entspricht. Durch die Mittelwertbildung aus beiden Berechnungsarten kann der Fehler auf Zeit und Entfernung verteilt werden.

Die Ausschnittsvergrößerung verdeutlicht diesen Effekt. Die Fahrschaulinie des realen Ausrollvorgangs weicht aufgrund des starken Neigungswechsels deutlich von der Fahrschaulinie mit durchschnittlicher Ausrollverzögerung ab (Bild 30).

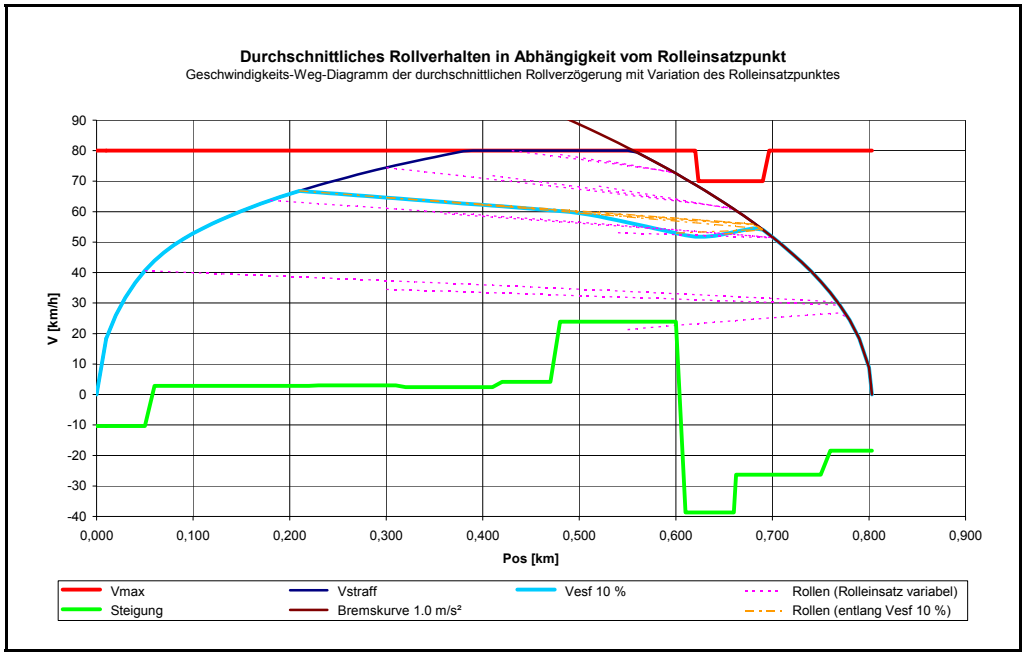


Bild 29: Durchschnittliches Rollverhalten in Abhängigkeit vom Rolleinsatzpunkt

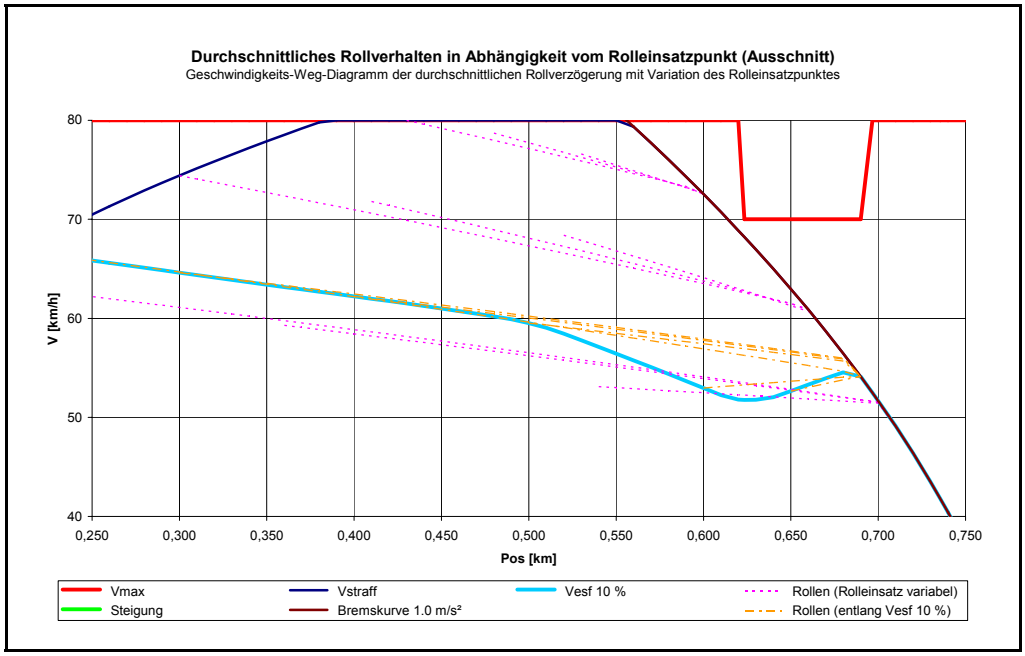


Bild 30: Durchschnittliches Rollverhalten in Abhängigkeit vom Rolleinsatzpunkt (Ausschnitt aus Bild 29)

Ist eine ausreichende Tripel-Anzahl ermittelt, kann daraus in der Online-Optimierung sehr schnell der optimale Rolleinsatzpunkt bestimmt werden. Hierzu werden für jedes Segment einmalig die Koeffizienten einer dreidimensionalen Fläche (die so genannte ***Coasting-Surface***) bestimmt, die eine Beziehung zwischen Ort, Anfangsgeschwindigkeit und durchschnittlicher Rollverzögerung darstellt.

Die Parameter der Fläche werden so ermittelt, dass der quadratische Fehler zu den berechneten Werten der Tripel-Menge minimal ist (Bild 31).

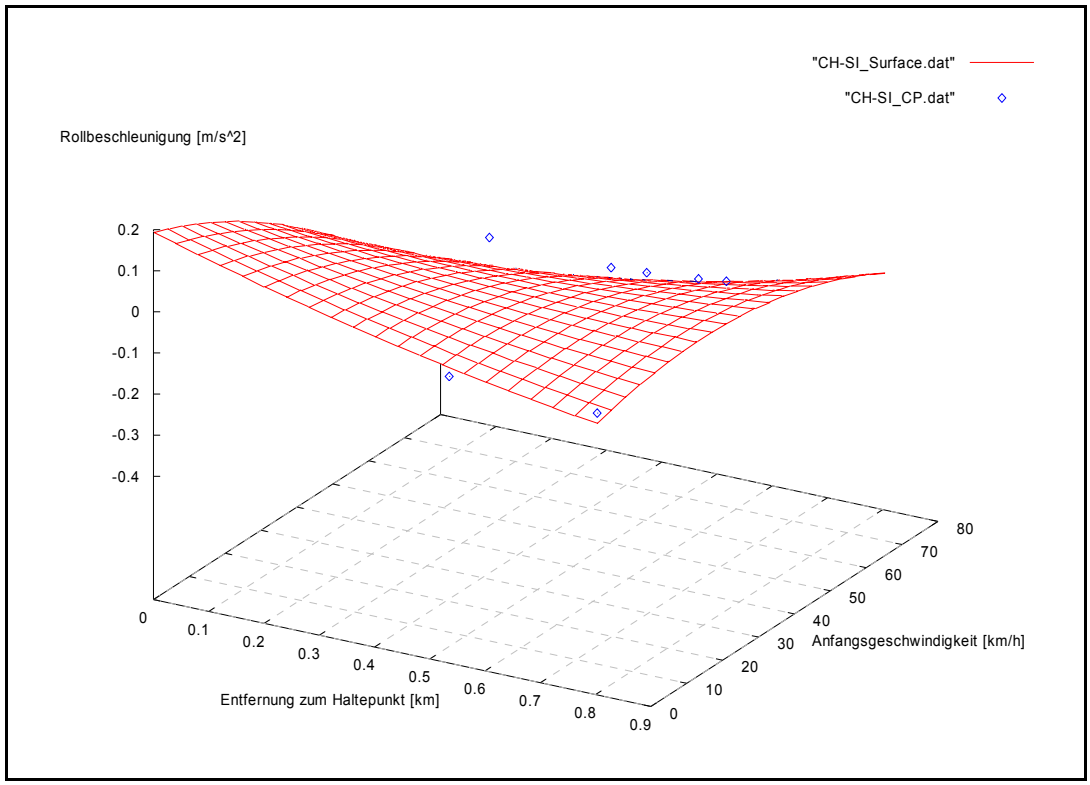


Bild 31: Ausrollbeschleunigung, dargestellt als Coasting-Surface

Anhand der einmal ermittelten Parameter der Coasting-Surface kann zu jedem beliebigen Ort und zu jeder beliebigen Anfangsgeschwindigkeit innerhalb des Gültigkeitsbereiches sehr schnell und einfach die zugehörige durchschnittliche Ausrollverzögerung bis zum Bremseinsatzpunkt gefunden werden.

Das Verfahren hat den Vorteil, dass es sehr schnell ist und dass es nur eine relativ geringe Datenmenge onboard benötigt. Weiterhin können die Tripel zur Beschreibung des streckenspezifischen Ausrollvermögens während des regulären Betriebes durch die ständige Auswertung von Ausrollvorgängen aktualisiert werden. Dadurch wird die Coasting-Surface an die jeweiligen realen Gegebenheiten angepasst und man erhält ein selbstlernendes System. Das Ausrollverhalten ist jedoch auch von der Besetzung des Fahrzeuges (Masse) abhängig, so dass diese berücksichtigt werden muss.

Demgegenüber hat das Verfahren den Nachteil, dass sowohl bei der Bestimmung der durchschnittlichen Rollverzögerung als auch bei der Bestimmung der Coasting-Surface die fahrdynamischen Zusammenhänge deutlich vereinfacht werden und das Ergebnis deshalb fehlerbehaftet ist. Dies ist besonders bei längeren Strecken und bei Strecken mit starken Neigungswechseln nachteilig. Deshalb sollte das Verfahren nur im Nahverkehr eingesetzt und der Fehler durch geeignete Grenzwerte bei der angenommenen Rollverzögerung begrenzt werden.

3.4 Einfluss der Traktion

Prinzipiell lässt sich bei allen Traktionsarten durch die ESF Energie sparen. Die zu verwendenden Algorithmen und die zu erwartende Einsparung können jedoch variieren. In Abhängigkeit von der Traktionsart werden teilweise unterschiedliche Arten der Antriebs- und Fahrzeugsteuerung verwendet (→ Abschnitt 2.1). Für eine möglichst gute Umsetzung der theoretischen ESF auf das reale Fahrzeug ist es wichtig, dass das Advice System die Möglichkeiten und Einschränkungen des Antriebssystems und der Fahrzeugsteuerung kennt und diese bei der Berechnung der Fahrempfehlungen berücksichtigt.

3.4.1 Elektrotraktion ohne Rückspeisefähigkeit

Bei der Elektrotraktion ohne Rückspeisefähigkeit werden die höchsten Einsparungen bei der ESF erwartet. Fast alle Antriebssteuerungen der Elektrotraktion erlauben Ausrollen ohne Zugkraft. In diesem Fall wird keine Traktionsenergie umgesetzt, lediglich Nebenverbraucher und Hilfsbetriebe werden mit Energie versorgt. Da die ESF normalerweise die Bremsphase durch den Einsatz von Rollphasen oder die Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit verkürzt, verringert sich dadurch auch der mechanische Verschleiß bzw. die ggf. in den Bremswiderständen umgesetzte Energie. Dies hat einen positiven Einfluss auf die Lebenszykluskosten.

3.4.2 Elektrotraktion mit Rückspeisefähigkeit

Bei der Elektrotraktion mit Rückspeisefähigkeit wird beim Bremsen der Motor als Generator betrieben. Dabei wird die von ihm gelieferte Energie primär zur Versorgung von Neben- und Hilfsbetrieben verwendet. Wenn der Generator mehr Energie liefert, als innerhalb des Fahrzeuges verbraucht werden kann, wird der Überschuss in die Fahrleitung zurückgespeist. Kann die erzeugte Energie nicht von einem anderen Verbraucher abgenommen werden, wird sie entweder im Fahrzeug oder im Unterwerk über Bremswiderstände in Wärme umgewandelt und damit nutzlos.

Auch bei Elektrotraktion mit regenerativer Rückspeisung können noch relativ hohe Einsparungen erzielt werden. Durch die längere Rollphase wird zwar die Bremsphase und damit auch die zurückgespeiste Energie verringert, jedoch überwiegt dabei die Einsparung durch die Rollphase, so dass der Gesamtenergieverbrauch abnimmt. Es ist zu beachten, dass nicht nur der Wirkungsgrad der regenerativen Bremse berücksichtigt werden muss, sondern auch, dass nur ein Teil der von der regenerativen Bremse erzeugten Energie wirklich genutzt werden kann. Einerseits gibt es Verluste durch den Rücktransport der Energie, andererseits muss auch ein geeigneter Abnehmer im Netz vorhanden sein, der die zurückgespeiste Energie abnimmt. Je nach Bauart der Energieversorgung muss sich dieser im selben Unterwerksabschnitt oder im Bereich der querverbundenen Unterwerke befinden. Je weiter er vom speisenden Fahrzeug entfernt ist, desto größer sind die Verluste. Der Anteil der wirklich vom Netz aufgenommenen Energie liegt je nach Netzbelastung und Unterwerkstyp bei durchschnittlich unter 70 % [Siemens-2000]. Hierbei ist insbesondere die Fähigkeit des Unterwerkes von Bedeutung, in das Mittelspannungsnetz zurückzuspeisen oder über einen Querverbund Energie an Fahrzeuge in anderen Unterwerksabschnitten abzugeben.

Eine zusätzliche Verbesserung der ESF kann erreicht werden, wenn das Advice System Kenntnis über die Bremssteuerung (Rückspeisefähigkeit in Abhängigkeit von der Bremsstellung) und ggf. über die Netzaufnahmekapazität hat. Somit kann der Anteil der generatorischen Bremse zu Lasten der mechanischen Bremse oder einer Schienenbremse vergrößert werden.

3.4.3 Dieselelektrische Traktion

Der Antrieb eines dieselelektrischen Triebfahrzeuges besteht aus einem oder mehreren Dieselmotoren, die jeweils einen Generator antreiben und so elektrische Energie zur Speisung der elektrischen Fahrmotoren erzeugen. Die Antriebssteuerung der dieselelektrischen Traktion ist ähnlich der elektrischen Traktion ohne Rückspeisefähigkeit.

Im Gegensatz zur elektrischen Traktion sind jedoch folgende Merkmale zu berücksichtigen:

- Auch wenn die elektrischen Fahrmotoren antriebslos sind, kann der Dieselmotor normalerweise nicht ausgeschaltet werden, da ein Neustart zu lange dauern würde und die Neben- und Hilfsbetriebe weiterhin versorgt werden müssen.
- Der Dieselmotor verbraucht im Gegensatz zum Elektromotor auch im Leerlauf Kraftstoff, um die Leerlaufdrehzahl zu halten und ggf. die Hilfs- und Nebenbetriebe zu versorgen. Daraus folgt, dass auch während des Rollens Kraftstoff verbraucht wird, zumal er im Leerlauf häufig nicht im optimalen Wirkungsgradbereich läuft.
- Ein Dieselmotor reagiert bei Lastwechsel träger als ein Elektromotor und verbraucht dabei zusätzlichen Kraftstoff, da er beim Übergang zwischen zwei Lastzuständen mit ungünstigen Verbrauchswerten betrieben wird. Bei der dieselelektrischen Traktion ist zu beachten, dass zwischen Dieselmotor und mechanischer Antriebsarbeit elektrische Energie als Zwischenmedium fungiert. Die Antriebssteuerung hat also gute Chancen zur Laststeuerung des Dieselmotors, indem Drehmoment und Drehzahl so gesteuert werden, dass die benötigte Energie bereitsteht und der Dieselmotor trotzdem in einem guten Wirkungsgradbereich betrieben wird.
- Das Wirkungsgradkennlinienfeld eines Dieselmotors ist wesentlich inhomogener als das eines Elektromotors. Dies sollte bei der Optimierung der Fahrweise berücksichtigt werden.

Eine exakte Nachbildung des Antriebssystems der dieselelektrischen Traktion ist demnach wesentlich komplexer als bei der elektrischen Traktion, da sowohl der Dieselantrieb als auch der elektrische Antrieb nachgebildet werden müssen. Die Integration der wesentlichen Einflüsse dieses Systems in die Berechnung der ESF im Advice System würde sicherlich einen positiven Einfluss auf das Ergebnis haben, wäre aber mit einem sehr hohen Aufwand verbunden. Im realen Betrieb hat sich jedoch gezeigt, dass auch Algorithmen, die eigentlich für die elektrische Traktion entworfen wurden, ohne Änderungen für die dieselelektrische Traktion übernommen werden können und dabei dennoch zu ordentlichen Ergebnissen führen [Siegmann-2002].

3.4.4 Dieselhydraulische Traktion

Bei der dieselhydraulischen Traktion wird die vom Dieselmotor abgegebene mechanische Leistung über einen hydraulischen Drehzahl-Drehmoment-Wandler und ein mechanisches Getriebe auf die anzutreibenden Achsen übertragen.

Tfz mit dieselhydraulischer Traktion werden üblicherweise über Fahrstufen gesteuert, die einem bestimmten Leistungsbereich entsprechen. Jeder Fahrstufe sind eine Zugkraft-Geschwindigkeits-Kennlinie und eine Kraftstoffverbrauch-Geschwindigkeits-Kennlinie zugeordnet.

Die für die dieselelektrische Traktion zu berücksichtigenden Merkmale gelten weitestgehend auch für die dieselhydraulische Traktion, nur dass die Problematik der Lastwechsel deutlicher hervortritt.

Auch bei der dieselhydraulischen Traktion ist eine exakte Nachbildung des Antriebssystems und insbesondere des Wandlers sehr komplex. Die ESF bei dieselhydraulischer Traktion sollte zumindest die möglichen Fahrstufen mit ihren spezifischen Zugkraft-Geschwindigkeits-Kennlinien und den entsprechenden Wirkungsgradkennlinien berücksichtigen. Weiterhin sollten Fahrstufenwechselzeiten und die relevanten Vorgänge beim Fahrstufenwechsel beachtet werden. Hierbei ergibt sich dann ein System, das konkrete Fahrstufen vorschlägt. Am Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen der Universität Hannover wurde zu diesem Zweck ein Konzept für ein ESF-System für Dieseltraktion entworfen [ISB-1998c].

Doch selbst ohne eine direkte Berücksichtigung der Besonderheiten einer dieselhydraulischen Traktion können traktionsunabhängige ESF-Systeme zu nennenswerten Energieeinsparungen führen, wie der mehrjährige Betrieb des früheren TEKNIS METROMISER beim australischen Regionalverkehrsbetreiber TransAdelaide zeigte. Damit konnte eine Dieseleinsparung von durchschnittlich 12 - 14 % erreicht werden [Howlett-1995] und [Milroy-2000].

3.5 Fahrzeugortung

Advice Systeme sind auf eine kontinuierliche Ortsbestimmung angewiesen, um jederzeit in Abhängigkeit von Ort und Zeit eine Fahrempfehlung zu berechnen. Grundlage der Ortsbestimmung ist ein digitaler Streckenatlas des Bahnnetzes, auf dem sich das Fahrzeug bewegt. Jeder Ort auf dem Netz muss eindeutig identifizierbar sein. Wie detailliert der Streckenatlas sein muss, hängt von den Anwendungen ab, die auf die Ortung angewiesen sind.

Das Ortungssystem hat die Aufgabe, den Ort des Fahrzeuges auf dem Bahnnetz zu bestimmen. Ausgangsbasis dafür sind bestimmte Ortungskomponenten, z.B. Wegimpulszähler, Radar, GPS und der Streckenatlas. Teilweise müssen auch Geschwindigkeit und Beschleunigung bestimmt werden.

Es wird zwischen makroskopischer und mikroskopischer Ortung unterschieden. Die makroskopische Ortung enthält die Station oder den Streckenabschnitt auf dem sich das Fahrzeug befindet. Dagegen beschreibt die mikroskopische Ortung die exakte Position auf der Strecke. Dies kann durch die Angabe des absoluten Bahnkilometers (→ Abschnitt 3.5.1.1) oder durch den Abstand zu einer Referenzposition (z.B. dem Haltepunkt an der letzten Station) geschehen.

3.5.1 Ortungskomponenten

Ortungskomponenten liefern einzelne Informationen, aus denen das Ortungssystem den absoluten Ort des Fahrzeuges auf dem Bahnnetz bestimmen kann. Man unterscheidet absolute und relative Ortungskomponenten. Absolute Ortungskomponenten liefern eine absolute Position auf dem Bahnnetz oder eine geografische Position, während relative Ortungskomponenten eine Veränderung der Position auf dem Bahnnetz angeben.

Es gibt eine Vielzahl von Ortungskomponenten, von denen die wichtigsten hier kurz vorgestellt werden.

3.5.1.1 Streckenatlas

Basis jedes Ortungssystems für Advice Systeme ist ein Streckenatlas. In ihm werden alle infrastrukturbezogenen Daten verwaltet. Neben den grundlegenden Infrastrukturdaten, die in einem Advice System immer gebraucht werden (z.B. Stationsbezeichnungen, Fahrwege, Entfernungen etc.) werden in dem Streckenatlas auch alle spezifischen Daten der einzelnen Ortungskomponenten gespeichert. Die Zuordnung einzelner Daten zur Lage auf dem Bahnnetz sollte immer über den Bahnkilometer erfolgen.

Der Bahnkilometer ist innerhalb des betrachteten Bahnnetzes eindeutig und besteht aus folgenden Komponenten:

- Streckennummer,
- Gleisnummer und
- Absolute Position [km].

Durch Fehl- und Überlängen kann eine Eindeutigkeit der absoluten Position zunächst nicht sichergestellt werden. Es gibt jedoch die Möglichkeit einer genaueren Spezifikation der Position, indem eine Kombination aus einer eindeutigen Referenzposition und einer Relativposition eingeführt wird. Die Referenzposition besteht aus Kilometer und Hektometer (z.B. 123,4 km). Der Abstand des Ortes von der Referenzposition wird mit der Relativposition angegeben (z.B. 56,78 m). Im Falle einer Überlänge kann diese Relativposition auch mehr als zwei Vorkommastellen haben [Pflug-1997].

Beispiel: 123,4 km + **15**56,78 m = 124,95678 km
auf Basis des ankommenden Kilometers 123,4

Zur Bestimmung des Abstandes zwischen zwei Punkten müssen entweder Kilometersprünge (Fehl- und Überlängen) im Streckenatlas verwaltet werden oder man muss die Länge jeder Kante zusätzlich speichern.

Der Streckenatlas wird üblicherweise auf dem Bordcomputer in Form einer Datenbank gehalten. Wenn diese Datenbank bezüglich der zu speichernden Daten flexibel ist, kann das Ortungssystem leicht um zusätzliche Komponenten erweitert bzw. für unterschiedliche Anwendungen verwendet werden.

3.5.1.2 Wegimpulszähler

Wegimpulszähler (auch ***Wegimpulsgeber*** genannt) zählen mittels optischer Sensoren die auf der Radsatzwelle oder dem Rad aufgebrachten Markierungen und ermitteln dadurch den zurückgelegten Weg und die gefahrene Geschwindigkeit. Teilweise kann auch die Drehrichtung bestimmt werden. Es handelt sich um eine relative Wegbestimmung, da nur die Änderung des Ortes bezüglich einer Referenzposition gemessen werden kann.

Wegimpulszähler sind die am häufigsten eingesetzten Ortungskomponenten bei Schienenfahrzeugen. Es muss zwischen den Messungen am Treibrad und am Laufrad unterschieden werden. Während bei den Messungen am Treibrad der Schlupf zwischen Rad und Schiene eine große Bedeutung hat, ist die Messung an einem nicht angetriebenen und gebremsten Laufrad deutlich genauer. Die zentrale Weg- und Geschwindigkeitsmessung der ICE-1-Triebzüge verwendet einen ungebremsten Laufradsatz in Verbindung mit drei angetriebenen Achsen eines Triebkopfes zur Erzeugung eines 10-Meter-Impulses. Untersuchungen der Universität Hannover [ISB-1995] und [ISB-1998b] haben gezeigt, dass der 10-Meter-Impuls einen mittleren Fehler von 0,15 % aufweist, ferner, dass die Verwendung eines Treibradsatzes anstatt des 10-Meter-Impulses zu einem zusätzlichen mittleren Fehler von 0,5 % (Maximum 1,6 %) führt. Wegimpulszähler müssen bei genau definierten Orten (z.B. beim Stationshalt) zurückgesetzt werden, um einen Bezug zum Bahnnetz herzustellen und um bisher aufgelaufene Messungenauigkeiten zurückzusetzen.

Zur Bestimmung des Weges aus den Wegimpulsen muss der Durchmesser der Räder genau bekannt sein. Da sich der Durchmesser durch die Abnutzung ständig ändert, muss dieser Wert regelmäßig abgeglichen werden, um die Genauigkeit des Systems zu gewährleisten. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass der Sinuslauf das Messergebnis verschlechtert.

3.5.1.3 Linienleiter

Der Linienleiter einer Linienzugbeeinflussung (LZB) dient zum einen zur Kommunikation zwischen Fahrzeug und Zentrale sowie zum anderen zur Ortsbestimmung des Fahrzeuges (→ Abschnitt 1.7.2.2).

Die folgenden Informationen beziehen sich auf das System LZB 80, das bei der DB AG zum Einsatz kommt. Andere Systeme arbeiten ggf. mit anderen Abschnittslängen, die Art der Ortung ist jedoch ähnlich.

Die Ortsbestimmung über den Linienleiter basiert auf drei Komponenten [Murr-1991]:

1. Bereichskennung des Linienleiters:
   Jede LZB-Strecke ist in mehrere Bereiche mit einer maximalen Länge von 12,7 km unterteilt. Beim Überfahren eines Bereichskennungswechsels wird das Triebfahrzeug-

gerät in die Ausgangsstellung gebracht. Im Streckenatlas sind alle Bereichskennungen verzeichnet, so dass eine absolute Ortung vorgenommen werden kann.

2. Abschnittsnummernzählweise:
   Jeder LZB-Bereich ist in bis zu 127 Abschnitte je 100 m unterteilt (Verlegevorschrift: ± 5 m). Nach jedem Abschnitt wird der Linienleiter gekreuzt, so dass das Fahrzeug den Kreuzungspunkt anhand des Phasenwechsels erkennen kann.
3. Radabhängige Wegmessung:
   Innerhalb eines Abschnitts wird der Weg durch einen Wegimpulszähler gemessen.

Mittels dieser Komponenten und eines detaillierten Streckenatlasses kann der absolute Ort des Fahrzeuges recht genau bestimmt werden. Der Ausfall einzelner Speiseabschnitte der LZB kann durch Redundanzen und intelligente Logik ohne Störung überbrückt werden, so dass die Zuverlässigkeit sehr hoch ist.

Die Ortung durch Linienleiter kann als eigenständiges Ortungssystem verwendet werden, wenn das gesamte Bahnnetz mit einem Linienleiter ausgerüstet ist und ein Streckenatlas mit allen LZB-relevanten Informationen bereitsteht. Da dies jedoch häufig nicht der Fall ist, kann die LZB-Ortung als Komponente eines übergeordneten Ortungssystems fungieren. Durch die LZB-Bereichskennung und den Streckenatlas kann das System den absoluten Ort auf dem Bahnnetz bestimmen.

Da das LZB-Fahrzeuggerät sicherheitskritische Aufgaben hat, ist es signaltechnisch sicher auszuführen. Beim Abgriff der Ortungsinformationen aus dem LZB-Fahrzeuggerät ist darauf zu achten, dass keine sicherheitsrelevanten Komponenten beeinträchtigt werden bzw. dass ein entsprechender Sicherheitsnachweis zu führen ist.

3.5.1.4 Ortungsbalisen

Balisen sind passive, punktförmige Übertragungsmedien, die im Gleisbett verlegt sind und in der Regel keine Stromversorgung besitzen. Ein mit einer entsprechenden Unterboden-Antenne ausgerüstetes Fahrzeug regt beim Überfahren die Balise durch ein niederfrequentes Magnetfeld an. Dadurch wird sie mit Energie versorgt, um ein Datentelegramm zu senden [SFWBB-2002].

Zur Ortung dienen hauptsächlich die sog. Markierungsbalisen, die außer ihrer eindeutigen Kennung keinerlei Nutzinformationen senden. Neben dieser Balisenart gibt es auch noch die aktiven Informationsbalisen, die anstelle der Kennung eine Nutzinformation senden, z.B. den momentanen Signalbegriff des nächsten Signals. Im Rahmen von ETCS und FFB wurde die EURO-Balise mitsamt den beiden Telegrammarten standardisiert (→ Abschnitt 1.7.3).

Wurde eine Markierungsbalise überfahren, kann die aktuelle Position über den Streckenatlas ermittelt werden. Es handelt sich um eine punktförmige absolute Position auf dem Bahnnetz, die sehr gut zum Abgleich von relativen Ortungsinformationen, wie z.B. von einem Wegimpulszähler, verwendet werden kann. Beim Abgleich ist der seit dem Überfahren der Balise zurückgelegte geschwindigkeitsabhängige Weg zu berücksichtigen.

3.5.1.5 Satellitenortung

Die Satellitenortung basiert auf der Entfernungsmessung des fahrzeugseitigen Empfängers zu mehreren Satelliten, deren Position exakt bekannt ist. Die Entfernung wird durch die Signallaufzeit vom Satelliten zum Empfänger bestimmt (typischer Wert: 0,06 s). Für eine exakte Standortbestimmung werden die Signale von vier Satelliten benötigt, die in einem möglichst günstigen Winkel zueinander stehen sollten [SFWBB-2002] und [Röbke-Doerr-2003].

Für die Satellitenortung existieren unterschiedliche Systeme. Das amerikanische ***NAVSTAR GPS*** (Navigation System with Timing and Ranging Global Positioning System) wurde vom US-Verteidigungsministerium vorrangig für militärische Zwecke entwickelt und aufgebaut, kann jedoch weltweit gebührenfrei von zivilen Nutzern verwendet werden. Die zunächst für zivile Nutzung eingeführte künstliche Verschlechterung des Signals (Selective Availability – SA) wurde im Mai 2000 abgeschaltet, eine Wiedereinschaltung in Krisenzeiten behält sich das US-Verteidigungsministerium jedoch vor.

Das russische Gegenstück zu GPS ist ***GLONASS*** (Global Navigation Satellite System), das technisch dem GPS sehr ähnlich ist, jedoch keine SA besitzt. Es wird vom russischen Verteidigungsministerium betrieben. Eine zivile Verwendung ist möglich, diese wird aber wesentlich seltener als beim amerikanischen GPS genutzt.

Als rein ziviles System wird derzeit in der Europäischen Union ***Galileo*** entwickelt. Es soll ab 2008 nutzbar sein.

Seit Abschaltung der SA ist die Ortsbestimmung von GPS für die meisten Bahnanwendungen hinreichend genau, wenn mindestens vier günstig gelegene Satelliten empfangen werden. Bei normalen Empfangsbedingungen liegen 95 % der über 24 Stunden ermittelten Positionen eines stationären Empfängers in einem Kreis mit etwa 12 m Durchmesser. Die Genauigkeit kann noch weiter verbessert werden, wenn Differential-GPS (DGPS) verwendet wird. Es ermöglicht die Korrektur von Messfehlern durch die Verwendung von Daten exakt vermessener Referenzstationen.

Bei der Nutzung der Satellitenortung im Bahnbereich ergeben sich zwei Probleme. Zunächst gilt es, die vom Empfänger gelieferten geografischen Koordinaten in Bahnkoordinaten umzuwandeln. Durch die Verwendung eines Streckenatlasses mit geografischen Koordinaten und geeigneten Algorithmen lässt sich dieses Problem lösen. Wesentlich schwerwiegender sind die unzureichende Verfügbarkeit der Satellitenortung im Einschnitt und in Tunneln sowie die durch Mehrfachausbreitung hervorgerufene Signalverschlechterung in schwierigem Gelände oder in bebauten Gebieten. Auch wenn durch die zusätzliche Verwendung eines Wegimpulszählers der kurzzeitige Ausfall der Satellitenortung im Tunnel kompensiert werden kann, ist die Verwendung der Satellitenortung bei Bahnsystemen mit einem hohen Tunnelanteil oder in überwiegend schwierigem Gelände häufig nicht sinnvoll. In der Kombination mit anderen Ortungskomponenten kann die Satellitenortung durch die Möglichkeit der absoluten Ortung jedoch eine deutliche Qualitätssteigerung des Gesamtortungssystems bewirken.

3.5.1.6 Weitere Ortungskomponenten

Neben den bisher vorgestellten Komponenten können die folgenden Systeme zur weiteren Verbesserung der Ortsbestimmung dienen:

- Doppler-Radar:
  Moderne Tfz (u.a. BR 101) sind mit einem Radarsystem zur Weg- und Geschwindigkeitsmessung ausgestattet. Mit Hilfe des Radars können diese Messungen ohne streckenseitige Komponenten und unabhängig vom Schlupf durchgeführt werden. Häufig dienen sie zur Schlupfregelung des Antriebs, können jedoch auch als Ersatz oder in Ergänzung der Wegimpulszählung zur Ortsbestimmung eingesetzt werden. Sie liefern analog zu Wegimpulszählern ein relatives Ortungssignal.

- Kreiselstabilisierte Plattform:
  Durch eine kreiselstabilisierte Plattform und geeignete Beschleunigungsaufnehmer können Beschleunigungen in allen drei Dimensionen recht genau ermittelt werden. Aus der Längsbeschleunigung kann man Geschwindigkeit und Weg berechnen. Unter Berücksichtigung von Quer- und Höhenbeschleunigung und mit Hilfe eines detaillierten Streckenatlasses kann das Ortungssignal sogar regelmäßig an definierten absoluten Positionen automatisch kalibriert werden, wenn zumindest der Startort und der Fahrweg bekannt sind.

- Ortung über GSM bzw. UMTS:
  Dicht bevölkerte Gebiete sind heutzutage gut mit GSM- bzw. in Zukunft mit UMTS-Netzen versorgt. Nicht zuletzt durch die Einführung von GSM-R wird bald eine Versorgung aller relevanten Strecken des deutschen Bahnnetzes gewährleistet sein. Durch Zellen-Ortung und Feldstärke-Messung bzw. geometrischer Ortung kann eine Genauigkeit von 270 - 380 m (GSM) bzw. 19 - 26 m (UMTS) erreicht werden [SFWBB-2002] und [Krempl-2003]. Unter Verwendung eines geeigneten Streckenatlasses können diese Informationen zur Initialortung am Anfang der Fahrt bzw. bei Streckenabzweigen verwendet werden.

- Türfreigabe:
  Bei modernen Fahrzeugen des Personenverkehrs wird die Türfreigabe am Bahnsteig zentral vom Tf oder vom Zugbegleiter gesteuert. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Türen nur freigegeben werden, wenn sich das Tfz am definierten Haltepunkt an einem Bahnsteig mit Verkehrshalt befindet. Somit kann das Türfreigabesignal zur Synchronisation einer relativen Ortungskomponente (z.B. Wegimpulszähler) verwendet werden, wenn die Türfreigabe innerhalb eines definierten Fangbereiches um den vorgegebenen Haltepunkt stattfindet.

3.5.1.7 Verfügbarkeit und Fehlerarten verschiedener Ortungskomponenten

Die Verfügbarkeit und die jeweils typischen Fehlerarten der wichtigsten Ortungskomponenten wurden in [SFWBB-2001b] ermittelt (Tabelle 11).

Ortungssystem	Verfügbarkeit	Fehlerart	Bemerkung
Radsensor am Treibrad	Ca. 99,5 %[1]		Es können unterschiedliche Arten von Fehlern auftreten:
- Beschleunigung		rel. Fehler + absolut	wg. Schlupf beim Anfahren ev. wg. ungenauer Halteposition, wenn die Halte für das Zurücksetzen verwendet werden
- Fahren		absolut vorlaufend + rel. Fehler	Fehler während der Beschleunigung wird „übernommen“ + rel. Fahler abh. von Schlupf, Radabnutzung etc.
- Bremsen		rel. Fehler	wg. blockierender Räder – wirkt Fehlern der vorhergehenden Fahrspielphasen entgegen
10-m-Impuls (ICE-1)	Ca. 99,5 %[2]	rel. Fehler	Zentrale Weg- und Geschwindigkeits-messung im ICE-1: relativer Fehler durch nicht exakt kalibrierte Laufraddurch-messer
LZB	ca. 20 %[3]	absolut < 100 m	nur mit entsprechender Fahrzeug- und Streckenausrüstung
GPS	ca. 85 %[4]	absolut	nicht in Tunnel und Einschnitten
Standard GPS		ca. 50 m	abhängig von den Satellitenpositionen
Differential GPS		< 10 m	abhängig von der Genauigkeit des DGPS-Korrektursignals

Tabelle 11: Vergleich der Ortungssysteme [SFWBB-2001b]

3.5.2 Ortungsfehler / Anforderungen an die Ortung

Bei allen Verfahren zur Bestimmung des Ortes treten gewisse Fehler oder Ungenauigkeiten auf, so dass das Advice System von einem ungenauen Ortungssignal ausgehen muss. Zunächst muss zwischen makroskopischen und mikroskopischen Fehlern unterschieden werden.

---

[1] Abschätzung der Verfügbarkeit auf 99,5 %. Nicht verfügbar durch Gerätefehler etc.

[2] Abschätzung der Verfügbarkeit auf 99,5 %. Nicht verfügbar durch Gerätefehler etc.

[3] Lt. tel. Auskunft DB Netz vom 20.09.2001 sind ca. 1700 Streckenkilometer (zweigleisig) mit LZB ausgestattet. Daraus ergibt sich ein Gleisanteil von ca. 5,2 %. Da aber auf diesen Strecken verhältnismäßig weitaus mehr Zugkilometer gefahren werden als auf nicht ausgerüsteten Strecken, wurde eine System-Verfügbarkeit von ca. 20 % angenommen.

[4] Lt. Geschäftsbericht DB Netz 2000: 442,3 km Tunnel (vermutlich ca. 800 km Gleislänge) bei 64821 km Gesamtgleislänge, d.h. ca. 1,2 % Gleisanteil; weitere Beeinträchtigungen durch Einschnitte und sonstige Störungen des Empfangs. Weiterhin ist zu beachten, dass es nach Ausfahrt aus dem Tunnel einige Sekunden dauert, bis wieder ein GPS-Signal empfangen wird. Bei Untersuchungen auf der mit vielen Tunneln versehenen ICE-Strecke Hamburg - Stuttgart wurde eine Verfügbarkeit von 78,4 % ermittelt [ISB-1998b] Für die folgenden Untersuchungen wurde eine Systemverfügbarkeit von ca. 85 % angenommen.

3.5.2.1 Makroskopische Ortungsfehler

Ein makroskopischer Ortungsfehler (Bild 32) liegt vor, wenn das Ortungssystem von einem vollkommen falschen Ort auf dem Bahnnetz ausgeht, d.h. von einer falschen Strecke, von einem falschen Streckenabschnitt oder von einer falschen Fahrtrichtung. Makroskopische Fehler können durch den Einsatz von absoluten Ortungskomponenten wie z.B. Ortungsbaken oder GPS weitestgehend vermieden werden. Stehen keine absoluten Ortungskomponenten zur Verfügung, können makroskopische Ortungsfehler anhand von fahrdynamischen Plausibilitätskontrollen entdeckt und teilweise sogar korrigiert werden. Hierzu ist jedoch ein detaillierter und vor allem fehlerfreier Onboard-Streckenatlas nötig. Ansonsten muss der Tf manuell eingreifen und den makroskopischen Ort über das Terminal eingeben.

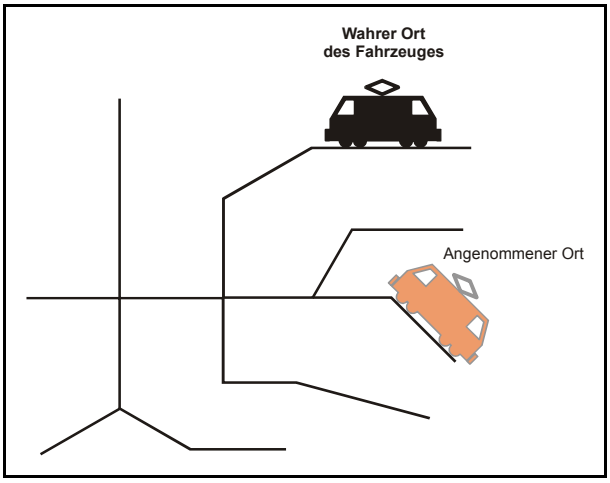


Bild 32: Makroskopische Ortungsfehler

3.5.2.2 Mikroskopische Ortungsfehler

Bei einem mikroskopischen Ortungsfehler (Bild 33) handelt es sich um eine ungenaue Ortsbestimmung innerhalb eines zuverlässig erkannten Streckenabschnittes, z.B. durch die ausschließliche Verwendung eines schlupfbehafteten Wegimpulszählers. Man unterscheidet hierbei vorlaufende und nachlaufende Ortungssignale.

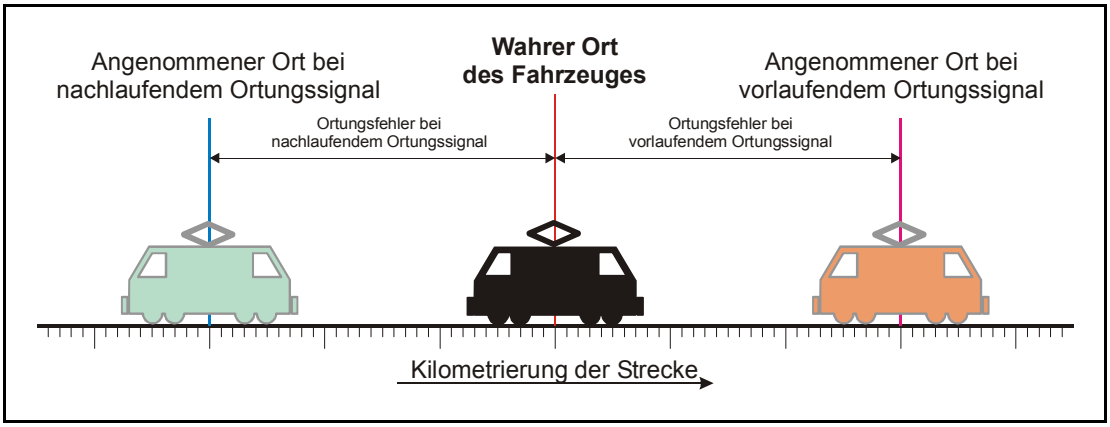


Bild 33: Mikroskopische Ortungsfehler

1. **Fall: Vorlaufendes Ortungssignal**
   Das vom Ortungssystem gelieferte Signal ist vorlaufend, d.h. das Fahrzeug befindet sich in Wirklichkeit hinter der vom Ortungssystem gelieferten Position. Folgende zwei Effekte treten dadurch auf:

   - Das Advice System berechnet eine zu große Fahrzeitreserve, d.h. es werden bezüglich der wirklichen Fahrzeitreserve zu große Ausrollphasen vorgeschlagen. Dieser Effekt alleine führt immer zu einer Verspätung. Der Energieverbrauch kann abnehmen.
   - Das Advice System signalisiert dem Tf zu früh die Ausrollphase, d.h. Anfang und Ende der Ausrollphase verschieben sich nach vorne, was wiederum unerwünschte Auswirkungen auf Fahrzeit und Energieverbrauch haben kann.

   Bei einem vorlaufenden Ortungssignal besteht grundsätzlich immer die Gefahr einer Verspätung. Eine zusätzliche Energieeinsparung ist jedoch nicht gewährleistet.

2. **Fall: Nachlaufendes Ortungssignal**
   Das vom Ortungssystem gelieferte Signal ist nachlaufend, d.h. das Fahrzeug befindet sich in Wirklichkeit vor der vom Ortungssystem gelieferten Position. Auch hierbei überlagern sich zwei Effekte:

   - Das Advice System berechnet eine zu geringe Fahrzeitreserve, d.h. es werden zu kleine Ausrollphasen vorgeschlagen, das Fahrzeug kommt ggf. zu früh an der Zielstation an und das Energie-Einsparpotenzial kann nicht vollständig genutzt werden.
   - Das Advice System signalisiert dem Tf die Ausrollphase zu spät, d.h. Anfang und Ende der Ausrollphase verschieben sich nach hinten. Da die Geschwindigkeit am Anfang und Ende der Ausrollphase üblicherweise gleich den Geschwindigkeiten bei der straffen Fahrweise sind, wird das Ende der Ausrollphase also nicht durch das Advice System sondern durch Erreichen der momentan zulässigen Streckenhöchstgeschwindigkeit und der Bremskurve vorgegeben.

In Abhängigkeit vom Ortungssystem können auch innerhalb einer Fahrt beliebige Kombinationen des ersten und zweiten Falles eintreten. Anhang D enthält zur Demonstration der Einflüsse ein einfaches Beispiel mit verschiedenen Ortungsfehlern.

3.5.2.3 Untersuchungen zu mikroskopischen Ortungsfehlern

Der Einfluss des mikroskopischen Ortungsfehlers auf die energiesparsame Fahrweise im Fernverkehr konnte in umfangreichen Simulationen bestimmt werden [SFWBB-2001b]. Es wurde für unterschiedliche Ortungsfehler die Effizienz der energiesparsamen Fahrweise ermittelt. Unter der Effizienz wird hierbei die Minimierung des Energieverbrauchs, die Minimierung der Verspätungsgefahr und die Verfügbarkeit verstanden.

Bei dieser Untersuchung wurde folgendermaßen vorgegangen:

1. Simulation von Fahrten auf insgesamt 20 Teilabschnitten der ICE-Linie Hamburg Hbf - Basel Bad Bf und zurück mit unterschiedlichen Ortungsfehlern
   Es wurden folgende Ortungsfehler untersucht:
   - Absoluter Ortungsfehler (vorlaufend und nachlaufend mit je 10 m, 20 m, 30 m, 75 m, 100 m, 200 m, 300 m, 500 m, 750 m und 1000 m Abweichung);
   - Relativer Ortungsfehler (vorlaufend und nachlaufend mit je 1 %, 2 %, 5 % und 10 % Abweichung);
   - Ortungsfehler entsprechend eines im Forschungsprojekt ESF I-A gemessenen typischen Ortungsfehlers von Wegimpulszählern am Treibrad [ISB-1998b]. Der gemessene Ortungsfehler wurde entsprechend der zu untersuchenden Strecke normiert und in der Höhe so skaliert, dass er einem vorgegebenen maximalen Ortungsfehler (vorlaufend mit 10 m, 20 m, 30 m, 75 m, 100 m, 200 m, 300 m, 500 m, 750 m und 1000 m Abweichung) entsprach. Zur Korrektur um den durchschnittlichen Ortungsfehler wurden weiterhin Simulationen mit einer Kompensation von 50 %, 100 % und 150 % des maximalen Ortungsfehlers durchgeführt.
2. Berechnung der Energieverbrauchs-Effizienz und der Pünktlichkeits-Effizienz anhand der Ergebnisse der Simulationen sowie der sich daraus ergebenden Gesamt-Effizienz (→ Abschnitt 5.4).
3. Bewertung unterschiedlicher Ortungssysteme anhand der jeweils typischen Ortungsfehler unter Verwendung der vorher ermittelten Gesamt-Effizienz.

Aus dieser Untersuchung ergibt sich:

- Die durchgeführten Beispielsimulationen zeigen, dass zwischen Ortungsfehler und Energieeinsparung bzw. Verspätung im jeweiligen konkreten Fall kein direkter Zusammenhang besteht. Die teilweise willkürlich erscheinenden Werte für Energieeinsparung und Verspätung in Abhängigkeit vom Ortungsfehler lassen sich durch die Überlagerung der beschriebenen Effekte bei vorlaufendem und nachlaufendem Ortungssignal erklären. Einen Einfluss hat hierbei auch die Streckentopografie. Eine Aussage, welche Parameter der Streckentopografie zu welchen Auswirkungen führt, ist jedoch nicht möglich. Weiterhin ist zu beachten, dass das untersuchte ESF-Optimierungsverfahren Ausrollphasen nur in bestimmten diskreten (vorher durch die Schrittweite vorzugebenden) Abständen untersucht. Durch die Größe der Schrittweite wird jedoch auch der Bedarf an Rechenzeit bestimmt, so dass man hier einen Kompromiss eingehen muss.
- Vorlaufende Ortungssignale haben einen negativen Einfluss auf die Pünktlichkeit. Sie sind deshalb möglichst zu vermeiden, z.B. durch Berücksichtigung eines Offsets.
- Nachlaufende Ortungssignale haben einen negativen Einfluss auf den Energieverbrauch.

- Wegmessfehler können um den für jede Strecke statistisch zu ermittelnden durchschnittlichen Wegmessfehler korrigiert werden. Dadurch ergibt sich im Mittel ein geringerer absoluter Fehler.
- Kompensationsfaktoren sind so zu wählen, dass die üblicherweise auftretenden maximalen vorlaufenden Ortungsfehler vollständig ausgeglichen werden.
- Um innerhalb des möglichen ESF-Optimums zu bleiben, sollte ein Wegmessfehler von 100 m nicht überschritten werden. Bei größeren Wegmessfehlern sind zumindest vorlaufende Ortungsfehler durch einen Offset zu verhindern.

Zur Bewertung oder zum Vergleich von Ortungssystemen oder Ortungskomponenten wurde ein Schema ermittelt, mit dem die Gesamteffizienz jedes Systems oder jeder Komponente bestimmt werden kann [SFWBB-2001b]. Zunächst müssen die Nutzanteile der verschiedenen Ortungssysteme auf dem zu untersuchenden Netz festgestellt werden. Für jedes der verwendeten Ortungssysteme muss dann ein typischer Ortungsfehler ermittelt bzw. abgeschätzt werden. Bei einer Kombination von Ortungsfehlern eines Ortungssystems müssen die Anteile der einzelnen Ortungsfehler einzeln bestimmt werden. Danach lässt sich die Effizienz der einzelnen Ortungsfehler anhand der durchgeführten Simulationsuntersuchungen oder anhand anderer Untersuchungen berechnen. Anschließend werden die Effizienzen der einzelnen Ortungsfehler zur Effizienz des gesamten Ortungssystems zusammen addiert, wobei die jeweiligen Nutzungsanteile zu gewichten sind. Das bedeutet, dass zur Berechnung der Gesamteffizienz ein gewichteter Mittelwert der Effizienzen bestimmt wird.

Diese Vorgehensweise wird beispielhaft anhand von vier Ortungssystemen kurz erläutert:

a) Radsensor mit gemessenem (unkompensierten) Fehler,
b) 10-Meter-Impuls,
c) Streckenabschnitt mit teilweiser LZB-Ausrüstung und
d) Ortung mittels Differential GPS.

Die hier genannten Zahlen sind nur zur Demonstration des Verfahrens zu verstehen. Wenn ein konkretes Ortungssystem bewertet werden soll, sind die Parameter anhand der Spezifikation des Ortungssystems und des zu untersuchenden Netzes zu verwenden.

Zunächst werden die Parameter der einzelnen Systeme zusammengefasst (Tabelle 12). Die verwendeten Ortungsfehler und Streckenanteile sind dabei zur Veranschaulichung getroffene Annahmen. Diese müssen dann für den konkreten Untersuchungsfall bestimmt werden. Für die Effizienzen werden die Durchschnittswerte verwendet, die bei den durchgeführten Simulationsuntersuchungen für den jeweiligen Ortungsfehler ermittelt wurden. Dabei wurde bei Fehlern, die sowohl vor- als auch nachlaufen können, der geringere von beiden Effizienzwerten verwendet.

Beispiel	a)	b)	c)	d)
Hauptortungssystem	Radsensor	10-m-Impuls	LZB	DGPS
Ortungsfehler	gemessen 100 m	relativ 1 %	absolut 20 m	absolut 10 m
Effizienz[1]	86,1 %	73,2 %	93,6 %	96,4 %
2. Ortungsfehler	relativ 1 %			
Effizienz	73,2 %			
Nutzungsanteil	99,5 %	99,5 %	20 %	85 %
Ersatzortungssystem	kein	kein	10-m-Impuls	10-m-Impuls
Ortungsfehler			relativ 1 %	relativ 1 %
Effizienz[1]			73,2 %	73,2 %
Nutzungsanteil			79,6 %	14,9 %
Gesamteffizienz	**62,7 %**	**72,8 %**	**77,0 %**	**92,9 %**

Tabelle 12: Beispielhafte Berechnung der Effizienzwerte verschiedener Ortungssysteme
Alle hier genannten Werte beziehen sich auf die in [SFWBB-2001b] getroffenen Annahmen und müssen bei der Bewertung eines realen Systems neu bestimmt werden!

Im Beispiel a), dem Radsensor, überlagern sich zwei Ortungsfehler. Dies ist zum einen der gemessene Verlauf der Abweichung gegenüber dem 10-Meter-Impuls und zum anderen der Fehler dieses Impulses selber. Zur Bestimmung der Gesamteffizienz müssen hier die beiden Effizienzwerte miteinander multipliziert werden.

Zur Abschätzung der Effizienz für den 10-Meter-Impuls wurden die Werte für einen relativen Fehler von 1 % benutzt, da dieser dem gemessenen mittleren Fehler von 0,15 % am nächsten kommt.

In den Beispielen c) und d) muss wegen der fehlenden Verfügbarkeit des Hauptortungssystems für einige Teilstrecken ein Ersatzortungssystem verwendet werden. Für die vorliegenden Beispiele wird dabei vom 10-Meter-Impuls ausgegangen. Zur Bestimmung der Gesamteffizienzen muss in diesen Fällen jeweils die Summe der Effizienzen der Ortungsfehler multipliziert mit den jeweiligen Nutzungsanteilen gebildet werden.

[1] Die Effizienz wurde anhand des angenommenen Ortungsfehlers aus den Ergebnissen von [SFWBB-2001b] extrahiert. Es handelt sich um einen Mittelwert aus mehreren Simulationen für diese Fehlerart.

3.6 Technische Voraussetzungen

3.6.1 Fahrzeugortung

Die Fahrzeugortung ist für ein Advice Systeme eine zentrale Komponente. Die in Bahnanwendungen in Frage kommenden Ortungskomponenten und die bei der Ortung typischen Fehlerarten wurden dargelegt (→ Abschnitt 3.5).

Anhand des Anwendungsprofils (Fahrzeuge, Infrastruktur, betriebliche Eigenschaften und Fahrplan) sowie der gewünschten Qualität der ESF können die Anforderungen an die Genauigkeit und die Verfügbarkeit des Ortungssystems durch umfangreiche Simulationen ermittelt werden. Für den typischen Personen-Fernverkehr wurde eine Genauigkeitsanforderung von ±100 m ermittelt [SFWBB-2001b]. Im Nahverkehr werden üblicherweise etwas höhere Anforderungen gestellt, die dort jedoch auch einfacher zu erfüllen sind.

Das Ortungssystem muss an das Advice System so angebunden sein, dass das Advice System jederzeit und ohne große Verzögerungen den genauen Ort des Tfz anfragen kann.

3.6.2 Datenversorgung

Rechnergestützte Verfahren zur energiesparsamen Fahrweise sind auf eine Versorgung mit aktuellen Daten über Strecke, Fahrzeug und Fahrplan angewiesen (→ Abschnitt 3.3). In Abhängigkeit vom Einsatz im Nah- oder Fernverkehr müssen die Daten unterschiedlich detailliert sein. Im Fernverkehr sind z.B. genaue Angaben über den Streckenverlauf (Höchstgeschwindigkeiten, Neigungen, Krümmungen und Informationen über Tunnel) sehr wichtig, da dort onboard fahrdynamische Simulationen zur Bestimmung der optimalen Fahrweise durchgeführt werden müssen. In ESF-Systemen für den Nahverkehr sind diese detaillierten Informationen onboard nicht nötig, da aufgrund der kurzen Stationsabstände nur eine einzelne Ausrollphase in Frage kommt. Zur Bestimmung dieser Ausrollphase kann unter Verwendung eines selbstlernenden Algorithmus auf einfachere fahrdynamische Berechnungen zurückgegriffen werden, bei denen neben dem exakten Stationsabstand nur einige Kennwerte zum streckenspezifischen Ausrollverhalten nötig sind.

Anhand von Art und Häufigkeit der nötigen Aktualisierung dieser Daten lassen sich fünf grundsätzliche Datenarten unterscheiden:

- (Quasi) statische Daten:
  Daten, die sich fast nie ändern, wie z.B. grundlegende Daten zum Fahrzeugpark, Infrastrukturdaten, konstante Konfigurationsdaten und die Software des Bordcomputers. Bei diesen Daten ist eine automatische Verteilung nicht unbedingt nötig.
- Periodenabhängige Daten:
  Daten, die sich in jeder Fahrplanperiode ändern, z.B. Laufwege, Fahrplandaten, Zugkonfigurationen. Diese Daten müssen üblicherweise zweimal pro Jahr zu einem bestimmten Zeitpunkt geändert werden. Insbesondere bei einem großen Fahrzeugpark sollten diese Daten automatisch oder mit minimalem manuellem Aufwand an die Bordrechner verteilt werden können.

- Tagesaktuelle Daten:
  Einige der periodenabhängigen Daten müssen täglich aktualisiert werden können, z.B. wenn es aufgrund von Baumaßnahmen Langsamfahrstellen gibt oder Sonderfahrpläne gelten. Hier muss ein Datenversorgungskonzept existieren, das es erlaubt, die Daten ohne großen manuellen Aufwand zumindest einmal pro Tag zu aktualisieren.

- Aktuelle betriebliche Daten:
  Aktuelle betriebliche Vorkommnisse und die Signalstellungen auf den folgenden Streckenabschnitten können von den Betriebszentralen häufig vorhergesagt werden. Durch die Integration dieser Daten kann die Fahrweise dieser Situation angepasst werden. Hierzu ist jedoch eine kontinuierliche Kommunikation mit der Betriebszentrale nötig.

- Aufgezeichnete Daten:
  Bordcomputer werden häufig zur Aufzeichnung von statistischen Daten, Fahrtverläufen oder fahrdynamischen Daten verwendet. Wenn dies regelmäßig geschehen soll, muss ein Verfahren zum automatischen Entladen der Daten auf einen stationären Datenträger existieren.

Neben den hier dargestellten Daten, bei denen eine Datenversorgung oder eine Kommunikation mit ortsfesten Systemen nötig oder sinnvoll ist, existieren auch noch die dynamischen Daten, die sich im Fahrtverlauf ändern (z.B. Fahrzeugauslastung und Fahrdynamik) und die überwiegend selbst bestimmt oder von anderen Onboard-Systemen bereitgestellt werden. Sie werden höchstens kurzfristig innerhalb des Bordcomputers gespeichert. Die Kommunikation dieser Daten mit stationären Systemen ist üblicherweise nicht nötig.

Zur Übertragung dieser Daten kommen die folgenden prinzipiellen Übertragungsverfahren in Frage:

- Manuelle Datenversorgung:
  Jeweils zum Fahrplanwechsel oder bei gravierenden Änderungen werden alle Daten und/oder Programme manuell auf das Fahrzeuggerät übertragen und auf einem internen Datenspeicher (z.B. Festplatte, CD-ROM oder Flash-Card) gespeichert.

  Diese Art der Versorgung hat den Vorteil, dass eine sehr große Menge an Daten schnell und ohne großen technischen Aufwand transferiert werden kann. Es können jedoch keine tagesaktuellen Daten bereitgestellt werden und die Versorgung eines großen Fuhrparks ist nur über einen längeren Zeitraum möglich. Dies hat zur Folge, dass mit der Datenversorgung schon deutlich vor dem Gültigkeitsbeginn angefangen werden muss, d.h. man muss in der Regel zwei komplette Datensätze (den aktuellen und den nächsten) vorhalten.

- Automatisierte Datenversorgung über örtlich begrenzte Funk-Netzwerke:
  Die ***Wireless Local Area Network*** Technologie (WLAN) bietet die Möglichkeit, örtlich begrenzt Daten mit einer sehr hohen Bandbreite über ein günstiges selbst betriebenes Funknetz zwischen Basisstationen (Access Points) und Fahrzeugen (Clients) zu transferieren (Bild 34). Sobald sich ein Fahrzeug im Bereich eines Funknetzes befindet, verbindet es sich mit dem lokalen Server und überprüft, ob es neue Daten für ihn gibt. Wenn dies der Fall ist, werden die Daten übertragen und die fahrzeugseitigen Daten aktualisiert. Der lokale Server hält einen kompletten Datensatz für alle Fahrzeuge im Netz parat und synchronisiert sich regelmäßig mit dem zentralen Server. Anhand eines Synchronisationsprotokolls kann jederzeit festgestellt werden, welches Fahrzeug mit welchen Daten versorgt ist. Fahrzeuge, die sich nicht innerhalb eines Funknetzes befinden oder die sich zu schnell durch ein Funknetz bewegen, können mittels WLAN nicht erreicht werden, d.h. diese Technologie ist nicht dazu geeignet, jederzeit Daten zu übertragen. Innerhalb eines Datenversorgungsbereiches (z.B. eines größeren Bahnhofs oder einer Betriebswerkstatt) werden üblicherweise mehrere Access Points verwendet, da der Funkbereich jedes Access Points begrenzt ist. Innerhalb eines Bereiches können (langsam) fahrende Fahrzeuge auch den Access Point wechseln, ohne dass die logische Verbindung zum Server unterbrochen wird.

- Just-in-Time-Datenversorgung:
  Die Daten werden genau dann auf das Fahrzeuggerät gebracht, wenn sie gebraucht werden. Hierzu wird ein analoges oder digitales Datenfunksystem (z.B. GSM-R) benötigt, das hoch verfügbar ist und eine hohe Bandbreite aufweist, um alle Fahrzeuge kontinuierlich mit Daten zu versorgen. Neben einem Funksystem kommt prinzipiell noch die Datenversorgung über die LZB in Frage. Diese ist jedoch nur auf wenigen Strecken verfügbar und es können außerdem nur relativ wenige Daten übertragen werden. Deshalb wird sie im Folgenden nicht näher betrachtet.

  Es werden nur solche Daten auf das Fahrzeug transferiert, die für die aktuelle bzw. die folgende Fahrt benötigt werden. Alle Daten werden zentral verwaltet und können innerhalb kürzester Zeit aktualisiert werden, d.h. Laufwegs- oder Fahrplanänderungen sowie La-Stellen können sehr kurzfristig zum Fahrzeuggerät übertragen werden. Wenn jedoch die Kommunikation zwischen Zentrale und Fahrzeug ausfällt, fällt für diesen Zeitraum auch ESF aus, sofern die Daten nicht bereits vorher transferiert wurden.

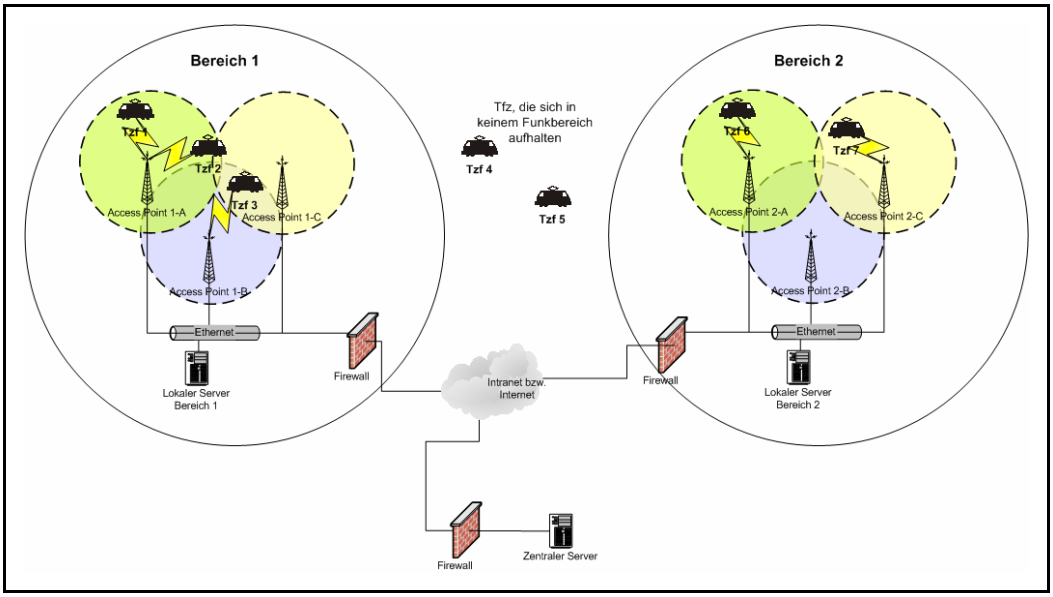


Bild 34: Automatisierte Datenversorgung über örtlich begrenzte Funk-Netzwerke

Diese Datenübertragungsverfahren eignen sich unterschiedlich gut für die verschiedenen Datenarten (Tabelle 13).

Datenart	Daten-menge[1]	Häufigkeit der Daten-versorgung[2]	Eignung der Datenversorgung für die Datenart: Manuelle Daten-versorgung	Automat. Daten-versorgung über WLAN	Just-in-Time-Daten-versorgung
(Quasi) statische Daten	+	-	++	+	-
Periodenabhängige Daten	++	O	+	++	O
Tagesaktuelle Daten	-	+	--	+	+
Aktuelle betriebliche Daten	O	++	--	-	++
Aufgezeichnete Daten	+	O	-	++	O
Kosten[3]					
Investitionen			+	O	O / --[4]
Laufender Betrieb			--	++	-- / O

Tabelle 13: Eignung der Datenübertragungsverfahren für die unterschiedlichen Datenarten

[1] Datenmenge: „++“ = hohe Datenmenge; „--“ = geringe Datenmenge

[2] Häufigkeit der Datenversorgung: „++“ = häufig; „--“ = selten

[3] Kostenbewertung: „++“ = geringe Kosten; „--“ = hohe Kosten

[4] Just-in-Time-Datenversorgung: Erster Wert: vorhandenes Funknetz; Zweiter Wert: eigenes Funknetz

Es zeigt sich, dass keine der Datenversorgungsarten für alle Anwendungsfälle gut geeignet ist. Lediglich die automatisierte Datenversorgung über ein WLAN fällt überwiegend positiv auf. Wenn auf die Übertragung aktueller betrieblicher Daten verzichtet werden kann, ist diese Art der Datenversorgung für alle Aufgaben geeignet.

Eine optimale Datenversorgungs-Lösung sollte auf einer kombinierten Datenversorgung basieren. In diesem Fall werden die Grunddatenversorgung und die Softwareverteilung bei der Einführung des Systems und bei großen Änderungen manuell durchgeführt, während die periodenabhängigen und die tagesaktuellen Daten sowie Software-Updates per WLAN durchgeführt werden. Weiterhin kann WLAN für die Übertragung aufgezeichneter Daten zur stationären Auswertung verwendet werden. Für die Bereitstellung aktueller betrieblicher Daten können sinnvollerweise nur ein Funksystem bzw. spezielle LZB-Telegramme verwendet werden.

Die konkreten Datenversorgungskonzepte der vorhandenen ESF-Systeme werden später vorgestellt (→ Abschnitt 4.7).

3.6.3 Bordcomputer und Synergieeffekte

Zur automatischen Berechnung der energiesparsamen Fahrweise wird ein Bordcomputer benötigt. Dieser kann unabhängig von anderen Bordcomputern oder Informationssystemen eingesetzt werden. Es bietet sich jedoch eine Verknüpfung mit anderen Systemen an, da damit Hard- und Softwarekosten gesenkt werden können und sich einheitliche Datenversorgungskonzepte realisieren lassen.

Da viele Bordcomputersysteme auf eine Ortung angewiesen sind, sollte ein einheitliches Ortungssystem mit einer einheitlichen Datenversorgung geschaffen werden. Auch Fahrplandaten werden von mehreren Systemen benötigt.

Die Integration der ESF in einen vorhandenen (älteren) Bordcomputer wird häufig an den Anforderungen scheitern, die ESF an die Hardware stellt. Jedoch bietet sich bei Neuentwicklungen ein gemeinsamer Bordcomputer an (→ Abschnitt 4.4).

Im Folgenden werden einige der im deutschsprachigen Raum verbreiteten Onboard-Systeme vorgestellt, die für eine Integration von ESF in Frage kommen.

3.6.3.1 EBuLa

Der „Elektronische Buchfahrplan und La“ (EBuLa) ist ein weitestgehend realisiertes Projekt der DB AG zum Ersatz der gedruckten Fahrplanunterlagen des Tf durch ein Onboard-System mit Displayanzeige [HuberK-2000]. EBuLa integriert den Buchfahrplan der aktuellen Fahrplanperiode und die tagesaktuellen Langsamfahrstellen (La) in ein gemeinsames System. Dabei wird der Periodenfahrplan auf einer CD-ROM abgelegt, während die tagesaktuellen Änderungen mittels einer Flash-Karte vor Fahrtantritt durch den Tf manuell integriert werden. Die Änderungen werden hierfür von der EBuLa-Zentrale an ca. 650 teils unbesetzte Datenstationen im ganzen Bundesgebiet automatisch verteilt. Der Tf aktualisiert seine persönliche Flash-Karte beim Dienstantritt an einer dieser Datenstationen und setzt sie beim Fahrtantritt in das EBuLa-Bordgerät ein.

Da in EBuLa die Streckenhöchstgeschwindigkeiten, die Fahrpläne und die tagesaktuellen La-Stellen schon verwaltet werden und alle Strecken-Triebfahrzeuge der DB AG mit EBuLa-Geräten ausgestattet sind, drängt sich die Integration eines Advice Systems für ESF in EBuLa geradezu auf. Demzufolge baut das ESF-System der DB AG (→ Abschnitt 4.7.1) auf EBuLa auf und erweitert dieses System lediglich um den ESF-Prozess und um ESF-relevante Daten.

Bei Ausfall des EBuLa-Gerätes während der Fahrt muss der Tf den Zug unverzüglich anhalten und von der Betriebsleitung einen mündlichen Fahrauftrag per Ersatz-Fahrplan zum nächsten Bahnhof anfordern. Dieser Ersatzfahrplan wird auch nach Einführung von EBuLa gedruckt im Fahrzeug vorliegen, ist jedoch nicht auf einen bestimmten Zug bezogen. Am nächsten geeigneten Bahnhof ist zu entscheiden, ob das Bordgerät oder das Tfz zu wechseln ist oder ob dem Tf ein Papierausdruck übergeben wird. Der Ausdruck kann an personalbedienten EBuLa-Datenstationen erfolgen und ggf. per Fax an den entsprechenden Bahnhof geschickt werden.

Während man bei der Entwicklung von EBuLa und ESF zunächst davon ausging, dass beide Systeme in keiner Weise sicherheitsrelevant sind und dementsprechend das System weder signaltechnisch sicher noch redundant auslegte, wurden seitens des EBA als zuständige Aufsichtsbehörde Zweifel daran laut. Als problematisch wurde der Ausfall von EBuLa angesehen, da dem Tf dann keine schriftlichen Informationen über die Streckenhöchstgeschwindigkeiten und die La-Stellen vorliegen. Inzwischen hat das EBA jedoch EBuLa im Zusammenhang mit der oben beschriebenen Rückfallebene zugelassen.

Bis zum Winterfahrplan 2002/2003 wurde EBuLa primär auf Zügen des Nahverkehrs eingesetzt, da die komplexen Fahrpläne des Fernverkehrs noch nicht vollständig in EBuLa integriert wurden. Für den Sommerfahrplan 2003 wurde angekündigt, dass voraussichtlich ca. 50 % der ICE-1 und ICE-2 Zugfahrten mit EBuLa und ESF durchgeführt werden [Sonntag-2003].

3.6.3.2 Anwendungsmanager der DB AG

Im Zuge der Realisierung des Projektes EBuLa wurden 1998 - 1999 alle Streckenlokomotiven und Steuerwagen der DB AG mit einem Bordcomputer mit integriertem Display ausgerüstet. Neben den Platzproblemen, die sich vor allem beim Einbau in ältere Fahrzeuge zeigten, wurde auch schnell klar, dass EBuLa nicht die einzige Anwendung sein wird, die in Zukunft einen Bordcomputer benötigt. Da aber nicht für jede Anwendung ein eigener Bordcomputer sowie ein eigenes Display im Führerstand installiert werden kann und man schnell Synergien zwischen unterschiedlichen Anwendungen herausfand (z.B. Ortung, Datenversorgung, Darstellung von Informationen, etc.), entschied man sich, einen Anwendungsmanager zu entwickeln, der gemeinsame Dienste und Funktionalitäten für unterschiedliche Anwendungen auf einem Bordcomputer und einem Display zur Verfügung stellen soll [HuberT-2000].

Als erste Anwendungen sollten EBuLa und ESF in den Anwendungsmanager integriert werden, da EBuLa und ESF schon vorher miteinander verknüpft waren. Andere Anwendungen wie der digitale Zugfunk (GSM-R), das Traktionsenergie Mess- und Abrechnungssystem (TEMA), die Zugbusdiagnose und die Zugtaufe sollten folgen.

Da sich beim Anwendungsmanager verschiedene Anwendungen ein Display teilen, ist der Nachweis, dass sicherheitsrelevante Informationen nicht von anderen (evtl. auch sicherheitsrelevanten) Informationen verdeckt werden, noch nicht erbracht worden. Weiterhin zeigte sich, dass die derzeit eingesetzten Bordcomputer für den Anwendungsmanager und mehrere komplexe Anwendungen nicht leistungsfähig genug sind, so dass das Projekt Anwendungsmanager zurzeit nicht intensiv weiterverfolgt wird [Sonntag-2003]. Deshalb werden die Anwendungen EBuLa und ESF zunächst ohne den Anwendungsmanager betrieben.

3.6.3.3 IBIS

Im Nahverkehr existiert das vom Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) standardisierte und im deutschsprachigen Raum sehr verbreitete ***Integrierte Bordinformationssystem (IBIS)***, das als zentrale Komponente fahrzeugseitig sowohl zur Kommunikation mit der Betriebsleitzentrale als auch zur Fahrgastinformation dient [VÖV-1984]. In diesem System werden viele Informationen und Komponenten verwendet, die für ein Advice System nötig sind. So werden z.B. zur Ansteuerung der Fahrgastinformationen und für den Fahrplanvergleich Informationen über Laufweg und Fahrplan benötigt (Bild 35).

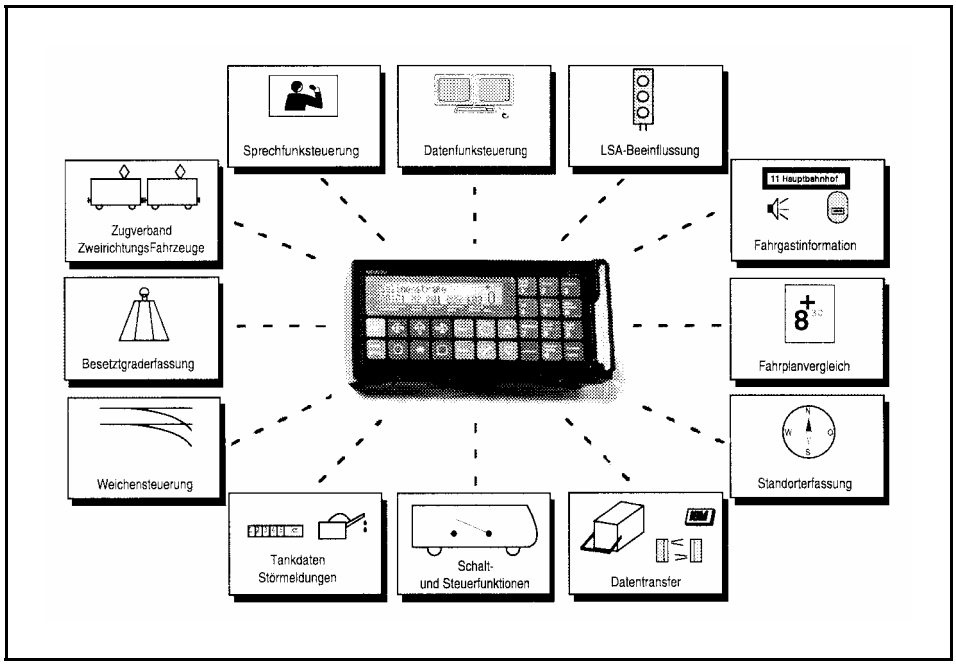


Bild 35: IBIS2-Umgebung im Fahrzeug [HPW-1995]

Das IBIS-Zentralgerät ist über den ***Schnellen Peripheriebus*** und den ***VDV Wagenbus*** mit den anderen Komponenten verbunden (Bild 36). Die Daten werden unter Verwendung der vom VDV definierten Wagenbustelegramme versendet, wobei das zentrale Steuergerät (Master) für das Versenden der Telegramme zuständig ist und die angeschlossenen Geräte (Slaves) ausschließlich auf diese Telegramme antworten dürfen.

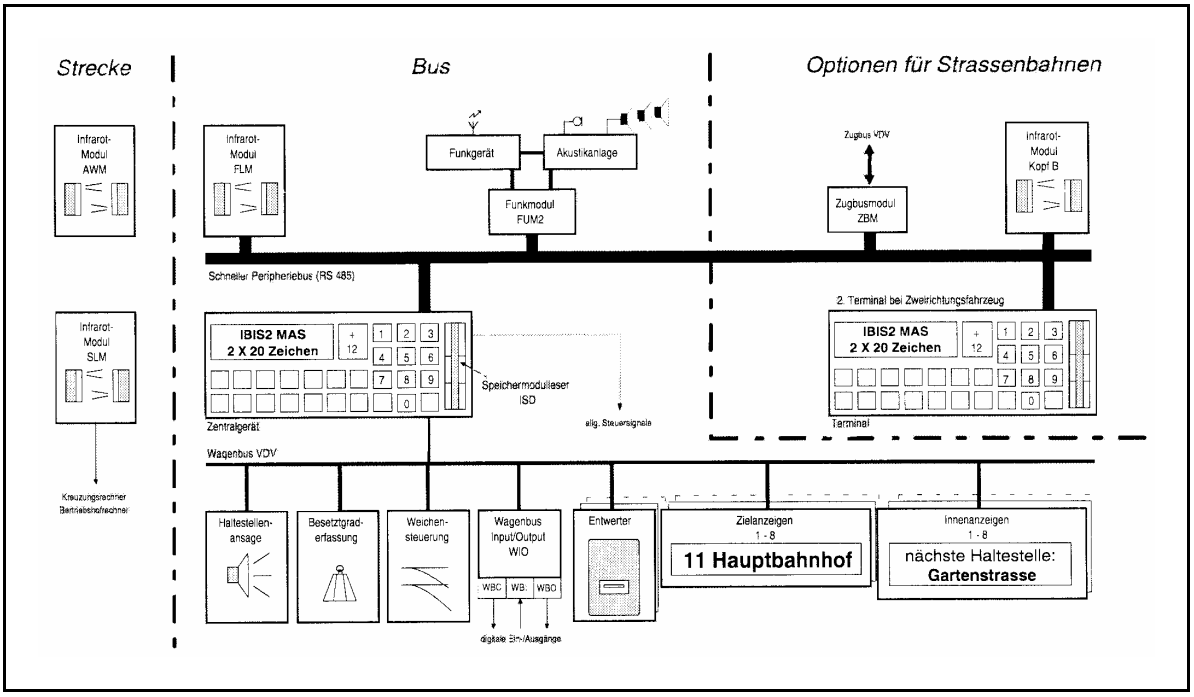


Bild 36: IBIS2-Blockschaltbild [HPW-1995]

Modernste IBIS-Bordcomputer basieren auf sehr leistungsfähigen Hardwarekomponenten und einem universellen Betriebssystem, so dass hier eine Integration eines Advice Systems gut möglich ist. Aber auch ältere IBIS-Systeme können als Datenlieferant eines eigenständigen Advice Systems wertvolle Dienste leisten, indem das Advice System am IBIS-Wagenbus mithört und daraus grundlegende Informationen wie Linie, Kurs, Station etc. empfängt. Dadurch kann unter Umständen auf ein eigenständiges Terminal für das Advice System verzichtet werden.

Die später vorgestellte ESF-Lösung Siemens METROMISER™ baut auf der Hardware eines modernen IBIS-Systems auf (→ Abschnitt 4.7.3).

3.7 Betriebliche Voraussetzungen

3.7.1 Fahrzeitreserve

Grundlage der energiesparsamen Fahrweise ist die Nutzung einer Fahrzeitreserve. Weil die Einhaltung des Fahrplans stets gegenüber dem Energieverbrauch Vorrang hat, kann nicht energiesparsam gefahren werden, wenn keine Fahrzeitreserve vorhanden ist. Dies kann darin begründet sein, dass keine Reserve im Fahrplan vorgesehen, oder die Verspätung größer als die Fahrzeitreserve ist.

Die Buchfahrpläne von Stadtschnellbahnsystemen werden üblicherweise so gestaltet, dass zunächst durchschnittliche Fahr- und Haltezeiten berücksichtigt werden und dann geeignete Zeitzuschläge erfolgen, die zum Ausgleich von Verspätungen und Fahrzeitverlängerungen infolge von Baumaßnahmen oder Störungen genutzt werden können.

Weiterhin wurde beobachtet, dass die Fahrzeitzuschläge im Fahrplan häufig so verteilt werden, dass am Anfang der Strecke nur geringe und am Ende der Strecke dafür größere

Fahrzeitreserven vorgesehen sind. Dadurch ist gewährleistet, dass am Anfang der Fahrt keine Zeit vergeudet wird, die später evtl. noch gebraucht wird.

3.7.2 Pünktlichkeit

Die Pünktlichkeit ist die wichtigste betriebliche Voraussetzung der ESF, da bei der Optimierung der Fahrweise die Soll-Ankunftszeit die entscheidende Randbedingung ist.

Für den Kunden ist die Pünktlichkeit ein entscheidender Qualitätsfaktor. Er erwartet, dass sowohl Abfahrt als auch Ankunft um maximal ein bis zwei Minuten verspätet sind. Eine verfrühte Abfahrt ist nicht zulässig, eine verfrühte Ankunft wird zwar gerne gesehen, trägt aber trotzdem nicht zur Steigerung der Zufriedenheit bei. Der Kunde misst die Pünktlichkeit anhand des veröffentlichten Fahrplans, der normalerweise minutengenau ist.

Der Betreiber bewertet die Pünktlichkeit zunächst anhand der betrieblichen Auswirkungen und Störungen, die ein unpünktlicher Zug hervorruft. Weiterhin ist jedoch auch die Kundenzufriedenheit wichtig, so dass auch für ihn die erstgenannten Kriterien gelten. Für den Betreiber kann jedoch schon eine Abweichung vom Sollfahrplan von weniger als 30 s Auswirkungen auf andere Züge haben, so dass betriebliche Fahrpläne häufig auf die Zehntelminute oder gar auf die Sekunde genau sind.

Für ein ESF-System bedeutet dies letztendlich, dass die Fahrt, zumindest im Nahverkehr, sekundengenau optimiert werden muss. Da es bei Stadtschnellbahnsystemen durch längere Fahrgastwechselzeiten oder durch ungeplante Halte z.B. an Straßenkreuzungen leicht zu geringen Verspätungen kommen kann, ist eine sekundengenaue Pünktlichkeit prinzipiell nur schwer einzuhalten. Um dennoch möglichst energiesparsam zu fahren besteht die Möglichkeit, die Sollankunftszeit an der nächsten Station nicht stur aus dem Buchfahrplan zu übernehmen, sondern stattdessen unter Berücksichtigung der aktuellen Verspätung, der Mindestfahrzeit (straffe Fahrweise) und eines minimalen Puffers (z.B. 3 s) eine angepasste Sollankunftszeit zu ermitteln und die Fahrweise so zu wählen, dass diese Zeit erreicht wird. In der Cost-Time-Curve (→ Bild 27, Seite 46) erkennt man, dass gerade dieser kurze Fahrzeitzuschlag zu einer entscheidenden Energiereduzierung führen kann.

3.7.3 Zugfolge

Rein fahrzeugseitige Systeme zur Optimierung der Fahrweise berücksichtigen die Zugfolge und die damit verbundenen Restriktionen auf die Fahrt allenfalls durch eine zusätzliche pauschale oder segmentabhängige Fahrzeitreserve, die zum Ausgleich von Fahrzeitverlusten dient, die durch Halt bzw. Langsamfahrt zeigende Signale hervorgerufen werden. Geschwindigkeitsrestriktionen, die dem System nicht rechtzeitig bekannt sind, führen zu einem ungünstigen Fahrtverlauf, der zu erhöhtem Energieverbrauch und/oder zu einer Verspätung führt.

Erstes Ziel muss die Vermeidung von Restriktionen durch die Zugfolge sein. Der Soll-Fahrplan muss dahingehend optimiert werden, dass Streckenabschnitte oder Knoten nicht schon planmäßig überlastet sind. Es müssen genügend Reserven vorhanden sein, um Verspätungen schnell auszugleichen und die Verspätungsübertragung auf andere Zugfahrten zu mini-

mieren. Hierzu werden die klassischen Methoden der Fahrplanerstellung und -optimierung verwendet, u.a. [Pachl-2002], [SFWBB-2001a], [Hauptmann-2000] und [Kaminsky-2001].

Sind aufgrund der Auslastung und der Streckenkapazität Restriktionen durch die Zugfolge in höherem Maße zu erwarten, kann deren Auswirkung auf die Fahrweise und damit den Energieverbrauch und die Pünktlichkeit minimiert werden, wenn moderne Betriebsleittechnik eingesetzt wird, die die Restriktionen zuverlässig vorhergesagt und diese dem Fahrzeugsystem übermittelt (→ Abschnitt 1.7).

Im Rahmen des Konzepts „Bahn 2000“ der Schweizer Bundesbahnen wurden am IVT der ETH Zürich[1] Untersuchungen zur Einfädelung der Hauptstrecke aus Solothurn auf den Neubauabschnitt Mattstetten – Rothrist (Strecke Bern – Olten, Bild 37) durchgeführt [Hürlimann-2002].

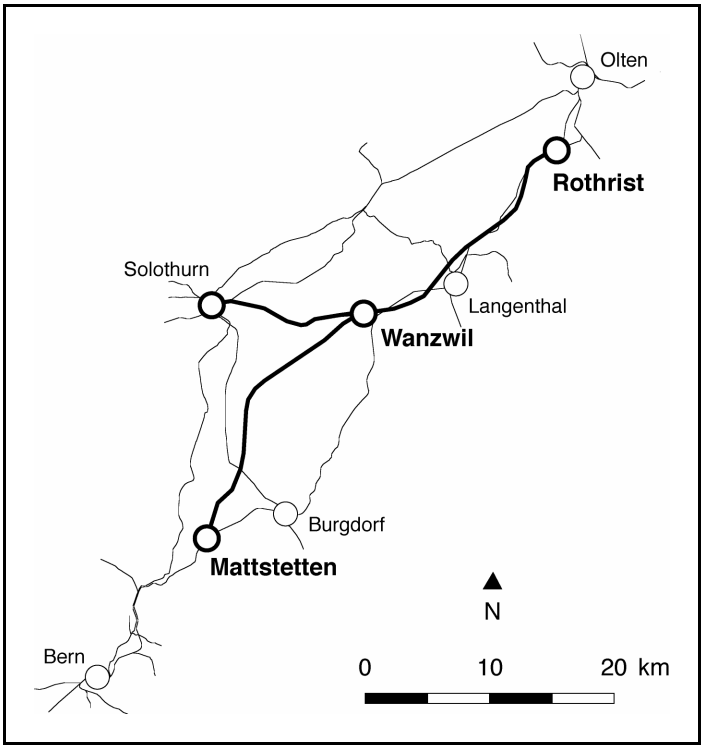


Bild 37: Zukünftiges Eisenbahnnetz im Raum Bern – Olten [Hürlimann-2002]

Durch den geplanten integralen Taktfahrplan müssen an der Einfädelung Wanzwil die Züge aus Solothurn zeitnah in den Verkehr aus Mattstetten in Richtung Rothrist eingefädelt werden. Bei klassischer Betriebsführung kommt es hierbei leicht zu Konflikten. Auf Basis der geplanten Leit- und Sicherungstechnik (ETCS Level 2) wurde ein vorausschauendes Optimierungsmodul simuliert, das es ermöglicht, den Konflikt im Voraus zu bestimmen und für alle beteiligten Züge eine Soll-Fahrweise zu berechnen (Bild 38). Hiermit kann sowohl die Leistungsfähigkeit des Knotens erhöht werden, da die Züge mit der maximalen

[1] Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

Geschwindigkeit den Knoten durchfahren, als auch die Fahrt aller beteiligten Züge harmonisiert werden (Bild 39, Bild 40).

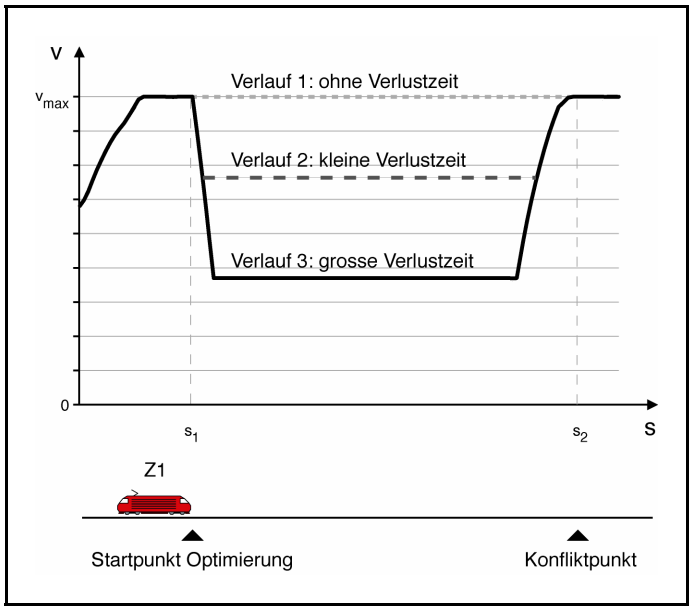


Bild 38: Auswirkung der Optimierung auf einen einzelnen Zug [Hürlimann-2002]

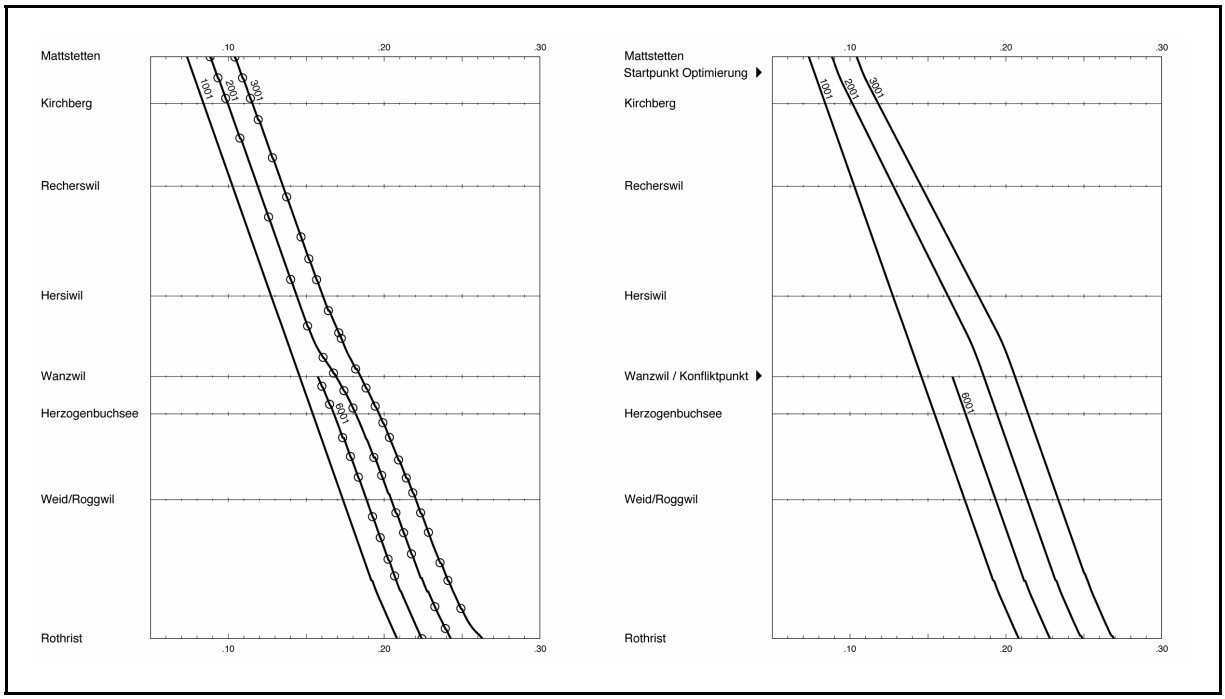


Bild 39: Weg-Zeit- Linien der Strecke Mattstetten - Rothrist ohne und mit Optimierung [Hürlimann-2002]

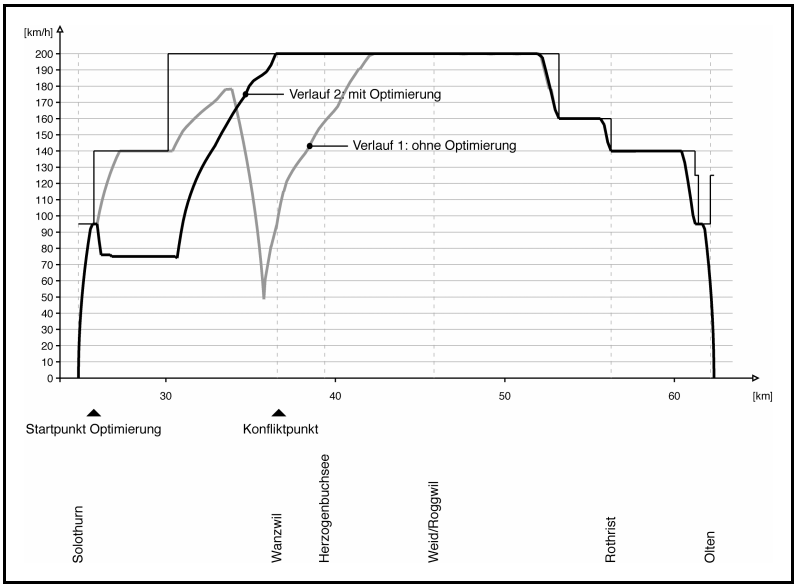


Bild 40: Geschwindigkeits-Weg-Linien der Strecke Solothurn - Olten ohne und mit Optimierung [Hürlimann-2002]

Dieses Beispiel zeigt, wie durch moderne Betriebsleittechnik, intelligente Onboard-Assistenzsysteme und leistungsfähige Kommunikationssysteme der Bahnbetrieb optimiert werden kann.

3.8 Optimierung von Fahrplänen für die ESF

Bei der klassischen Fahrplangestaltung werden Regel- und Bauzuschläge pauschal oder anhand von Erfahrungen auf die einzelnen Segmente der Linie verteilt. Da der Zeitzuschlag jedoch auch einen Einfluss auf die mögliche Fahrweise und damit auf den Energieverbrauch hat (Cost-Time-Curve; → Abschnitt 3.2) sollte dieses Verhalten in der Fahrplangestaltung als zusätzlicher Faktor berücksichtigt werden.

Die Cost-Time-Curves unterschiedlicher Segmente einer Linie weisen einen unterschiedlichen Verlauf auf (Bild 41). Daraus ergibt sich, dass der Gesamtenergiebedarf für das Befahren der gesamten Linie von der Verteilung der Fahrzeitzuschläge auf die einzelnen Segmente abhängt, d.h. dass der Gesamtenergiebedarf durch eine geschickte Verteilung minimiert werden kann. Dies setzt jedoch voraus, dass die ESF auch konsequent eingesetzt wird, denn nur wenn der Fahrzeitzuschlag auch genutzt wird, macht sich die Fahrplanoptimierung auch beim Energieverbrauch bemerkbar.

Der Algorithmus zur Optimierung des Fahrplans basiert darauf, dass die gesamte zur Verfügung stehende Fahrzeitreserve so verteilt wird, dass die Steigungen aller Cost-Time-Curves an der jeweiligen Fahrzeit weitestgehend gleich sind (Bild 42).

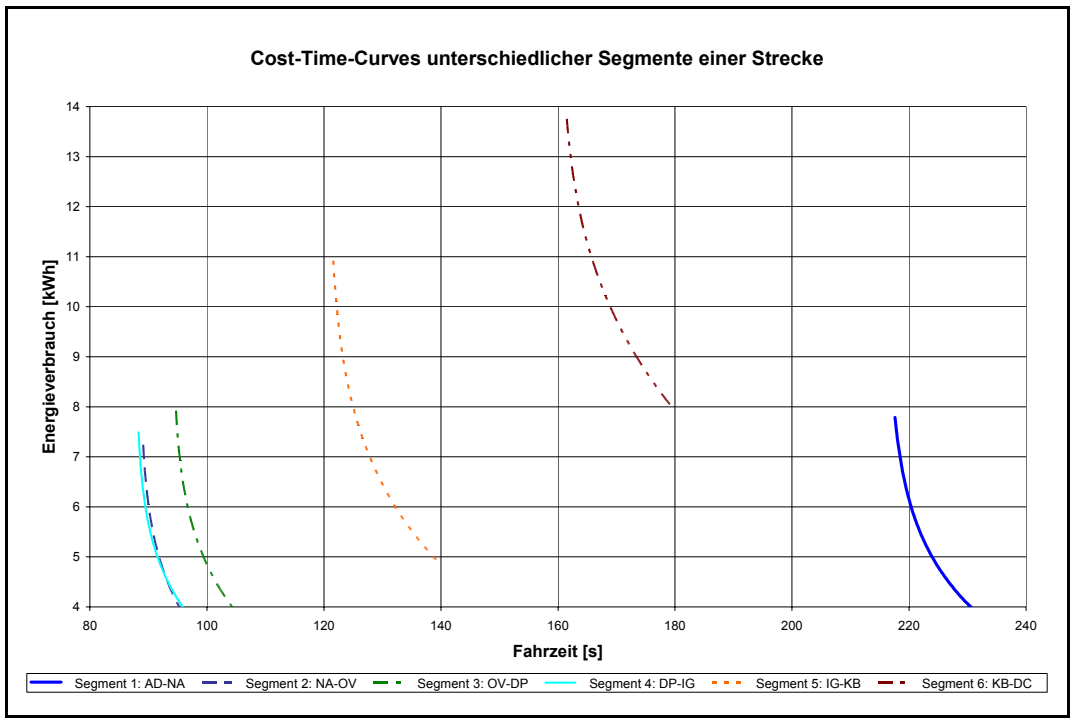


Bild 41: Cost-Time-Curves unterschiedlicher Segmente einer Strecke

Durch eine manuelle Fixierung oder durch eine Einschränkung des Optimierungsbereiches können die Ankunfts- und Abfahrtszeiten besonderer Stationen (z.B. Umsteigebahnhöfe) von der Optimierung ausgeschlossen werden.

Während die Optimierung des Fahrplans in der Theorie häufig zu einer zusätzlichen Energieeinsparung von einigen Prozenten führt, ist dies in der Praxis häufig nicht zu beobachten. Die Gründe hierfür sind folgende:

- Grundlage der Fahrplanoptimierung ist die ESF. Wird diese nicht oder nur teilweise realisiert, kann durch die Fahrplanoptimierung auch keine Energie eingespart werden.
- Die statische Fahrplanoptimierung basiert auf der sekundengenauen Zuordnung von Fahrzeitreserven auf die einzelnen Segmente einer Linie.
  Im Nahverkehr geht es hier um wenige Sekunden pro Segment, d.h. nur in einem idealen, störungsfreien Betrieb könnten diese Fahrplanreserven auch genauso genutzt werden, wie sie theoretisch ermittelt wurden. Schon eine kleine Abweichung vom Sollfahrplan macht also die sekundengenaue Feinverteilung der Fahrzeitzuschläge zunichte. Durch eine Echtzeit-Optimierung, die idealerweise stationär bei der Betriebsleittechnik angesiedelt ist, könnte eine Fahrplanoptimierung zu einer messbaren Verringerung des Energiebedarfs führen.
  Im Fernverkehr dagegen, wo die Fahrzeitzuschläge teilweise mehrere Minuten betragen, kann auch eine statische Fahrplanoptimierung zu einer messbaren Reduzierung des Energieverbrauchs führen.

Definitionen:

n	Anzahl der Segmente
i,j	Segmentindizes
$t_{Plan,i}$	Fahrplanmäßige Fahrzeit (ohne Verkehrshaltezeiten) für Segment i [s]
$t_{Plan,ges}$	Fahrplanmäßige Fahrzeit (ohne Verkehrshaltezeiten) für die gesamte Strecke [s]
$t_{FP,ges}$	Fahrplanmäßige Fahr- und Haltezeit für die gesamte Strecke [s]
$t_{Rein,i}$	Reine Fahrzeit (Straffe Fahrweise) für Segment i [s]
$t_{Rein,ges}$	Reine Fahrzeit (Straffe Fahrweise) für die gesamte Strecke [s]
$t_{Halt,ges}$	Summe aller Haltezeiten [s]
$t_{Reserve,ges}$	Summe aller Fahrzeitreserven [s]
dt_{act}	aktuelle Schrittweite des Fahrzeitzuschlages [s]
dt_{min}	minimale Schrittweite des Fahrzeitzuschlages [s]

$t_{Plan,ges} = t_{FP,ges} - t_{Halt,ges}$

$t_{Reserve,ges} = t_{Plan,ges} - t_{Rein,ges}$

$dt_{act} = t_{Reserve,ges} / n$

for $(i = 1; (i <= n); ++i)$

- $t_{Plan,i} = t_{Rein,i} + dt_{act}$

while $(dt_{act} > dt_{min})$

- do
  - suche das Segment i, bei dem der Fahrzeitzuwachs um dt_{act} die größte Energieverbrauchsreduzierung bewirkt
  - suche das Segment j, bei dem eine Fahrzeitverkürzung um dt_{act} zulässig ist und bei dem diese zu der geringsten Energieverbrauchssteigerung führt
  - $t_{Plan,i} = t_{Plan,i} + dt_{act}$
  - $t_{Plan,j} = t_{Plan,j} - dt_{act}$
- while (Energieverbrauch der aktuellen Kombination <= Energieverbrauch der bisher besten Kombination)
- $t_{Plan,i} = t_{Plan,i} - dt_{act}$
- $t_{Plan,j} = t_{Plan,j} + dt_{act}$
- $dt_{act} = dt_{act} / 2$

Bild 42: Algorithmus zur Optimierung des Fahrplans hinsichtlich des Energieverbrauchs

Insgesamt bietet die Fahrplanoptimierung also einen interessanten Ansatz zur Reduzierung des Energieverbrauchs, hat aber nur eine beschränkte Bedeutung, wenn die strikte Umsetzung der ESF nicht gewährleistet ist oder die Fahrzeitzuschläge pro Segment nur wenige Sekunden betragen.

3.9 Andere Ziele zur Optimierung der Fahrweise

Die ESF hat eine besondere Bedeutung bei der Optimierung von Fahrweisen. Die konsequente Nutzung der ESF hat einen direkten Einfluss auf die Kosten der Zugfahrt. Sie wird deshalb schon seit vielen Jahrzehnten durch die Schulung der Tf ansatzweise realisiert. Inzwischen sind auch erste rechnergestützte Systeme am Markt. Dennoch ist die ESF nur eine von mehreren Strategien zur Optimierung der Fahrweise.

Die weiteren Motive zur Optimierung der Fahrweise sind (→ Abschnitt 1.3) :

- Erhöhung der Pünktlichkeit,
- Reduzierung des Verschleißes,
- Erhöhung der Strecken- oder Knotenleistungsfähigkeit,
- Reduzierung der Lärmabstrahlung an empfindlichen Stellen und
- Reduzierung der Belastung des Triebfahrzeugführers.

Allen Motiven ist gemeinsam, dass sie im Verhältnis zur straffen Fahrweise durch eine örtliche oder zeitliche Reduzierung der Geschwindigkeit oder der Beschleunigung bzw. Verzögerung realisiert werden. Weiterhin handelt es sich immer um eine dynamische Anpassung, d.h. unter Berücksichtigung spezifischer Randbedingungen und des momentanen Fahrzustands wird entschieden, welche Fahrweise am günstigsten ist.

Als besonders interessantes Beispiel wird das Optimierungsziel „Reduzierung der Lärmabstrahlung an empfindlichen Stellen“ näher erläutert.

3.9.1 Optimierung der Schallemission vorbeifahrender Züge an lärmempfindlichen Orten durch dynamische Optimierung der Fahrweise

Anwohner von Schienenverkehrswegen sind durch den von vorbeifahrenden Zügen hervorgerufenen Schienenverkehrslärm stark beeinträchtigt. Deshalb hat der Gesetzgeber im Bundesimmissionsschutzgesetz und den dazugehörigen Verordnungen (BImSchV) Richtlinien und Grenzwerte festgelegt, die vom Betreiber einzuhalten sind. Die Messung und Bewertung der Schallimmission hat nach der Richtlinie „Schall 03“ der DB AG zu erfolgen [Schall03-1990]. Da das menschliche Gehör auf Frequenzen im Bereich von 1000 – 2000 Hz besonders empfindlich reagiert, wird meist die frequenzabhängige A-Bewertung durchgeführt.

Die Lärmimmission im Umfeld von Bahnanlagen kann durch eine Verringerung der Lärmemission oder durch schallschluckende Maßnahmen (z.B. durch stationäre Schallschutzwände oder fahrzeugseitige Schallschutzschürzen) reduziert werden. Neben der konstruktiven Optimierung der schallabstrahlenden Elemente kann die Lärmemission auch durch eine fahrdynamische Optimierung reduziert werden, da diese unter anderem von der Geschwindigkeit (Roll- und aerodynamisches Geräusch), dem Antriebszustand (Motor- und Lüftergeräusche und dem Bremszustand (Bremsquietschen, u.a. abhängig von der Bremsart) abhängig ist.

Durch die situationsabhängige Verlagerung von Beschleunigungs- oder Bremsphasen außerhalb des empfindlichen Bereiches bzw. durch eine örtliche, in ihrer Höhe jedoch variable Geschwindigkeitsreduzierung kann die Lärmemission örtlich reduziert werden. Insbesondere ihre Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bietet einen Ansatz zur Optimierung, da die

Lärmemission stark überproportional mit der Geschwindigkeit ansteigt (Bild 43). Dieser allgemeine Zusammenhang vernachlässigt spezielle Einflüsse konkreter Fahrzeuge, wie z.B. Eigenresonanzen, die gelegentlich im unteren Geschwindigkeitsbereich vorzufinden sind. Relevante Einflüsse konkreter Fahrzeuge müssen untersucht und berücksichtigt werden, wenn eine lärmoptimierte Fahrweise realisiert werden soll und die Einhaltung von spezifizierten Grenzwerten gefordert ist.

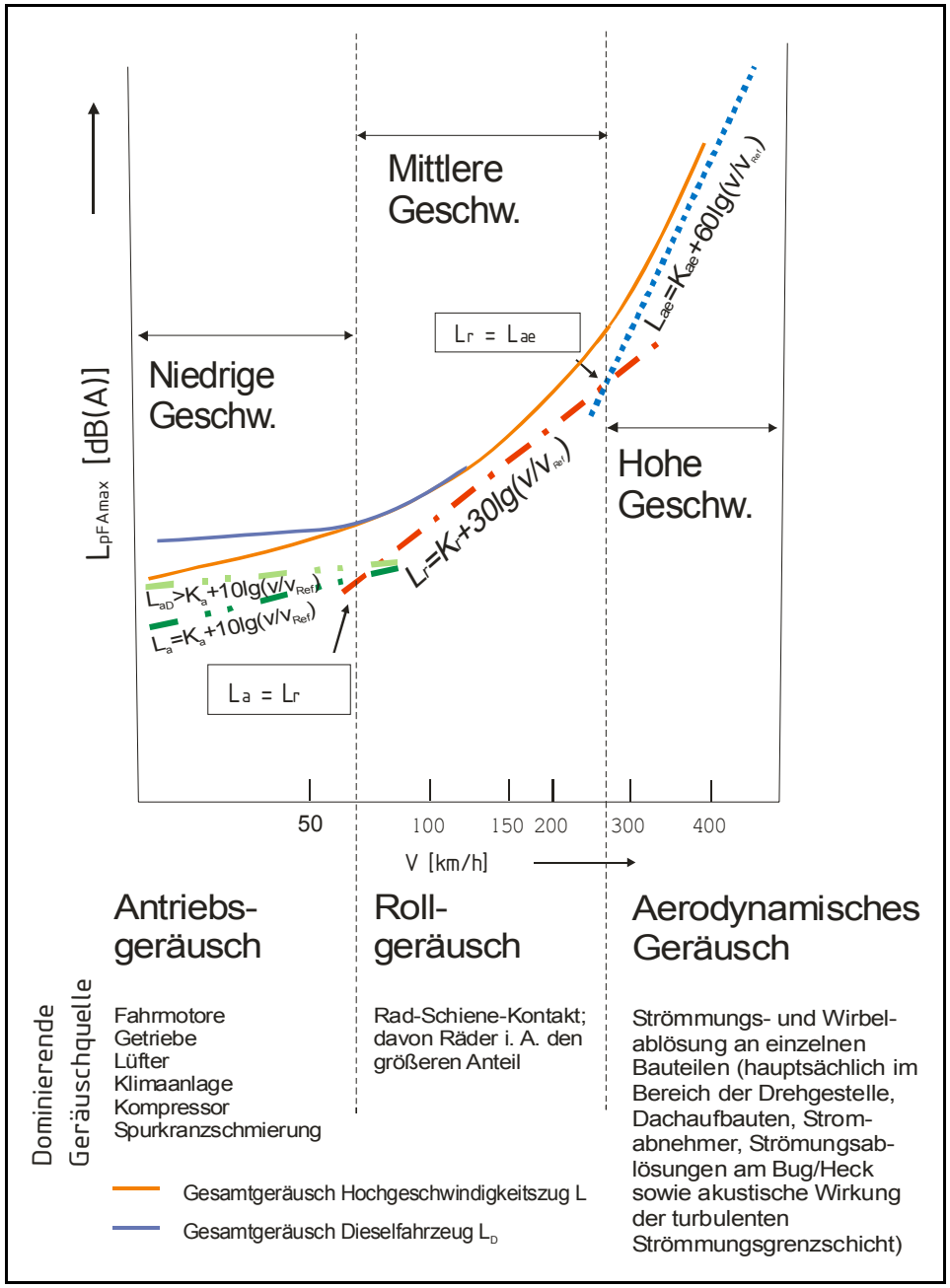


Bild 43: Geräuschverhalten von Schienenfahrzeugen und deren Komponenten als Funktion der Geschwindigkeit [Hecht-2001]

Basis für die Bewertung ist sowohl der Vorbeifahrpegel, der dem mittleren Schallpegel während der Vorbeifahrt entspricht, als auch der Stundenpegel, bei dem der Vorbeifahrpegel anhand der Einwirkungsdauer auf eine mittlere Lärmbelastung pro Stunde umgerechnet wird. Bewertet wird normalerweise der Durchschnittswert aller Zugfahrten pro Tag, d.h. auch die

Reduzierung des Lärmpegels einzelner Zugfahrten hat bereits einen positiven Einfluss auf die durchschnittliche Gesamtbelastung.

Der mittlere Lärmpegel L_{eq} pro Zeiteinheit T_{eq} (normalerweise 3600 s) wird laut Schall 03 als Integral über die einzelnen Vorbeifahrpegel $L_{pAF}(t)$ berechnet (Gl. 7).

$$L_{eq} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{T_{eq}} \cdot \int_{t_1}^{t_1+T_{eq}} 10^{0,1 \cdot L_{pAF}(t)} dt \right) \qquad \text{Gl. 7}$$

Durch den exponentiellen Einfluss des Vorbeifahrpegels $L_{pAF}(t)$ haben einzelne hohe Pegel einen maßgeblichen Einfluss, während niedrige Pegel in der Mittelwertbildung fast unberücksichtigt bleiben. Daher ist es wichtig, die lautesten Vorbeifahrpegel zu reduzieren, während die leiseren Fahrten kaum einen Einfluss haben.

Die Algorithmen der lärmarmen Fahrweise entsprechen weitestgehend denen der ESF. Im ersten Schritt werden potenziell interessante Fahrweisen simuliert und anhand der akustischen Zusammenhänge die jeweilig zu erwartende Lärmemission berechnet. Dabei sind jedoch nur diese Streckenabschnitte zu berücksichtigen, für die bestimmte Grenzwerte einzuhalten sind. Gegebenenfalls werden für unterschiedliche Abschnitte auch unterschiedliche Prioritäten vergeben bzw. durch restriktive Vorgaben bestimmte Fahrweisen gar nicht erlaubt. Im zweiten Schritt wird dann wie bei der ESF nach einer Kombination gesucht, die insgesamt zu der besten Fahrweise führt.

3.9.2 Übertragung des Know-hows aus der ESF auf andere Optimierungsziele

Das grundsätzliche Vorgehen bei der Bestimmung und Umsetzung der Fahrweise ist unabhängig vom Optimierungsziel. Die Randbedingungen ergeben sich immer aus den Fahrzeug-, Infrastruktur- und Fahrplandaten sowie aus der Streckenbelegung. Obwohl sich die Zielfunktion ändert, bleibt als Stellgröße nur die zeit- bzw. ortsabhängige Variation der Fahr- und Bremsstufe. Daraus ergibt sich, dass lediglich die Bewertung der einzelnen zu untersuchenden Fahrweisen angepasst werden muss, während der Rest des Algorithmus weitestgehend unabhängig vom Optimierungsziel ist. Im Gegensatz zur ESF kann die Bewertung der Fahrweisen jedoch bei anderen Optimierungszielen schwieriger sein.

Auch die Verfahren zur Umsetzung der theoretisch bestimmten Fahrweise in die Praxis und die damit verbundenen Probleme sind jenen der ESF sehr ähnlich.

Sollen mehrere Zielgrößen gleichzeitig optimiert werden, z.B. eine ESF, bei der zusätzlich an einigen Abschnitten die Lärmemission minimiert wird, müssen die einzelnen Ziele anhand eines Punktesystems bewertet werden. Ggf. müssen Ausschlusskriterien definiert werden. Die Zielfunktion ist somit das Erreichen einer möglichst hohen Punktzahl.

Bei der ESF ist stets die Pünktlichkeit vorrangiges Ziel. Dieses Ziel kann nur durch statische Zuschläge im Verspätungsfall zugunsten anderer Ziele aufgeweicht werden. Wird jedoch auch die Pünktlichkeit in das Bewertungssystem eingeordnet und dort mit einer hohen Priorität sowie einem Minimumkriterium versehen, kann auch sie gleichwertig in die Optimierung integriert werden.

4 Advice Systeme

4.1 Aufgaben eines Advice Systems

Primäre Aufgabe eines computergestützten Advice Systems ist die Online-Berechnung einer Fahrempfehlung zur Optimierung des Fahrtverlaufes und deren Umsetzung unter Berücksichtigung aller relevanten Parameter. Diese primäre Aufgabe lässt sich in drei wesentliche Komponenten aufteilen:

- Zustandsermittlung:
  - Ermittlung des aktuellen Fahrzustandes (Position, Geschwindigkeit).
  - Ermittlung der aktuellen Fahrplanlage (Vergleich von Soll- und Ist-Zustand von Position und ggf. Geschwindigkeit in Anhängigkeit von der Uhrzeit).
  - Ggf. Verarbeitung von Informationen aus der Zugbeeinflussung oder der Betriebsleittechnik.
  - Ggf. Aufzeichnung von fahrdynamischen Daten der aktuellen Fahrt.
- Berechnung der Fahrempfehlung:
  - Grobplanung der Fahrt bis zum nächsten planmäßigen Halt.
  - Berechnung der Fahrempfehlung für die aktuelle und ggf. die nächste Fahrtphase, so dass eine Fahrt entsprechend der Grobplanung realisiert werden kann. Hierbei sollen die möglichen Fahr- und Bremsstufen, die Art des Zugsteuerungsprozesses sowie die Reaktions- und Prozesszeiten berücksichtigt werden.
- Kommunikation der Fahrempfehlung an den Zugsteuerungs-Prozess:
  - Anzeige der Fahrempfehlung an den Tf bzw. Vorgabe einer Fahr- bzw. Bremsstufe an die ATO.
  - Ggf. Überwachung der Reaktion auf die Fahrempfehlung und weitere Signalisierung.

Zur Erfüllung der primären Aufgabe müssen üblicherweise auch die folgenden sekundären Aufgaben erfüllt werden:

- Datenhaltung (Daten, die aktuell zur Berechnung benötigt werden):
  - Streckendaten (u.a. Haltepunkte, Geschwindigkeitsprofil, ggf. Steigungs- und Krümmungsprofil).
  - Fahrzeugdaten (u.a. Antriebs- und Bremsdaten, Massen, Länge, Laufwiderstandsparameter).
  - Fahrplan (u.a. Laufweg, Ankunfts- und Abfahrtszeiten, ggf. Durchfahrtszeiten).
  - Tagesaktuelle Daten (z.B. Langsamfahrstellen, Sonderfahrpläne, etc.).
  - Aktuelle betriebliche Daten des momentanen Vorschaubereichs, sofern vorhanden (z.B. Signalstellungen, Windrichtung und -geschwindigkeit).

- Datenmanagement:
  - Ermittlung der für die aktuelle Fahrt benötigten Daten.
  - Persistenz[1] der o. g. Daten (z.B. in einer Datenbank).
  - Aktualisierung der o. g. Daten (z.B. beim Fahrplanwechsel oder bei tagesaktuellen Daten).
  - Ggf. Handling und Aktualisierung von fahrdynamischen Daten, die durch Fahrtaufzeichnungen gewonnen werden.
- Kommunikation mit dem Tf:
  - Bereitstellung eines User-Interfaces zur Eingabe von Fahrtnummer bzw. Linie/Kurs oder Ähnlichem zur eindeutigen Identifikation des Laufweges, des Fahrplans etc.
  - Anzeige der Fahrempfehlung und ggf. weiterer Informationen, z.B. Fahrplanlage, Systemstatus etc.

Neben diesen festen Aufgaben haben Advice Systeme häufig auch noch optionale Komponenten, die die schon vorhandenen Komponenten nutzen und/oder erweitern, um zusätzlichen Nutzen aus dem Advice System zu ziehen. Hierzu gehören z.B. die Aufzeichnung von Fahrten und die statistische Auswertung.

Die Art des Zugsteuerungsprozesses kann entscheidend für ein Advice System sein, so dass zunächst deren Einfluss auf das Advice System untersucht werden muss.

4.2 Advice Systeme zur Unterstützung eines Triebfahrzeugführers

Wenn ein Tf die Zugsteuerung übernimmt, ist dieser voll für die Fahrweise verantwortlich. Er kann dabei durch eine Automatische Fahr- und Bremssteuerung (AFB) und/oder durch ein Advice System unterstützt werden. Bei den meisten Bahnen wird der Tf durch ein Zugbeeinflussungssystem sowie durch eine Sicherheitsfahrschaltung (Sifa) überwacht. Ein Sonderfall der Zugsteuerung durch den Tf stellen Systeme mit LZB und AFB dar, bei denen das Tfz automatisch gefahren werden kann, die Gesamtverantwortung jedoch beim Tf liegt (z.B. auf den Hochgeschwindigkeitsstrecken der DB AG und bei einigen modernen U-Bahnen).

Besonderheiten bei Advice Systemen mit Zugsteuerung durch den Tf sind:

- Der Tf ist voll für die Fahrt verantwortlich. Er darf sich nicht blind auf die vom Advice System gegebene Fahrempfehlung verlassen.
- Das Advice System dient nur der Unterstützung des Tf. Es sollte nicht direkt in die Fahrzeugsteuerung eingreifen, damit die Verantwortlichkeit des Tf nicht abgeschwächt wird. In sicherheitskritischen Situationen wird dieser durch die Zugbeeinflussung überwacht.

---

[1] „Persistenz“: lateinischer Ausdruck für Langlebigkeit; wird in der EDV für die dauerhafte Speicherung von Daten verwendet.

- Der Tf darf durch das Advice System nicht von seinen Aufgaben abgelenkt werden.
- Die Kommunikation zwischen Tf und Advice System muss so einfach wie möglich sein. Eingaben durch den Tf müssen minimiert werden und sollten nur während eines Haltes erforderlich sein. Fahrempfehlungen des Advice Systems an den Tf müssen auf einen Blick erkennbar sein. Bei Bedarf können sie durch ein kurzes akustisches Signal angekündigt werden.
- Die vom Advice System gegebene Fahrempfehlung muss möglichst einfach und klar sein. Sie muss vom Tf umsetzbar sein, d.h. es dürfen nur Fahrempfehlungen gegeben werden, die die Antriebs- und Bremssteuerung auch vorsieht.
- Die Fahrempfehlung darf einer von der Sicherungstechnik vorgegebenen Restriktion nicht widersprechen, d.h. es darf in Unkenntnis eines Signalbegriffs niemals ein Fahrbefehl erteilt werden, sondern allenfalls eine Fahrempfehlung, die lauten könnte „Fahre entsprechend den Vorschriften so zügig wie möglich“.
- Der Bremsbeginn muss vom Tf entsprechend der aktuellen Situation (u.a. Bremshundertstel, Neigung, Witterungsbedingungen etc.) bestimmt werden und sollte nicht vom Advice System vorgeschlagen werden.
- Durch die Verarbeitung des Zustandes von Streckensignalen im Advice System können widersprüchliche Fahrempfehlungen vermieden oder zumindest stark reduziert werden. Hierzu ist jedoch die Übertragung der Signalinformationen z.B. durch eine LZB oder durch ETCS sowie die Anbindung des Advice Systems an das Zugbeeinflussungssystem nötig.
- Wenn ein Advice System temporär nicht verfügbar ist (z.B. bei fehlerhaften Konfigurationsdaten oder bei einer nicht geplanten Sonderfahrt) oder eine Fehlfunktion vorliegt, kann dies durch den Tf erkannt werden. Er ignoriert dann die Fahrempfehlung des Advice Systems und steuert das Tfz entsprechend seiner Erfahrung ohne Unterstützung. Um die Akzeptanz des Systems nicht zu gefährden sind Fehlfunktionen aber dennoch zu minimieren.
- Das Advice System sollte den Tf dahingehend schulen, auch ohne Unterstützung durch diese Systemunterstützung eine gute Fahrweise zu praktizieren, ohne ihn jedoch zu bevormunden. Es ist darauf zu achten, dass die vom Tf schon erworbenen Kenntnisse von Strecke, Fahrplan und Fahrdynamik durch die Verwendung des Advice Systems nicht verloren gehen.
- Die Akzeptanz des Systems beim Tf (siehe unten) ist entscheidend für den Erfolg des Systems. Ein System, das vom Tf nicht akzeptiert wird, wird auch nicht genutzt und kann keinen wirtschaftlichen Erfolg haben.

Ausgehend von diesen Forderungen ergeben sich nur eingeschränkte Möglichkeiten von Fahrempfehlungen. Zunächst ist die Kommunikation der Fahrempfehlung and den Tf zu berücksichtigen. Während der Fahrt können nur sehr einfache Empfehlungen gegeben werden, z.B. per Leuchtmelder. Folgende Fahrempfehlungen bieten sich an:

- Zügige Fahrt entsprechend den Vorschriften und der Betriebslage,
- Halten der aktuellen Geschwindigkeit, wenn die Betriebslage dies erlaubt,
- Ausrollen, wenn die Betriebslage dies erlaubt und
- Annäherung an einen Punkt mit einer Geschwindigkeits-Restriktion (d.h. üblicherweise Anfang einer Zielbremsung).

Einfache Advice Systeme beschränken sich auf eine einzelne Fahrempfehlung, z.B. das Ausrollen. Wenn diese Empfehlung gegeben wird und die Betriebslage dies zulässt, soll der Tf die Zugkraft auf Null setzen, ansonsten entsprechend der Betriebslage den Zug so zügig wie möglich bewegen.

Die zweite Einschränkung für Fahrempfehlungen ergibt sich aus der Umsetzung durch den Tf. Es macht keinen Sinn, dem Tf eine theoretisch ermittelte Sollgeschwindigkeit von z.B. 87,58 km/h vorzugeben, die er ohnehin nicht exakt einhalten kann. Stattdessen kann ein Geschwindigkeitsbereich vorgegeben werden oder eine Empfehlung, die momentane Geschwindigkeit zu halten. Weiterhin ist zu beachten, dass die Fahrempfehlung über einen gewissen Zeitraum Bestand haben sollte. Es kann dem Tf nicht zugemutet werden, ständig neue Fahrempfehlungen wahrzunehmen und umzusetzen. Die zulässige minimale Gültigkeitszeit für eine Fahrempfehlung ist abhängig vom Einsatzgebiet. Während im Fernverkehr eine minimale Gültigkeitszeit von z.B. 15 - 30 s plausibel erscheint, können im Nahverkehr Zeiten von unter 5 s sinnvoll sein.

4.3 Advice Systeme zur Unterstützung einer ATO

Üblicherweise unterstützen ATO-Systeme standardmäßig keine externen Advice Systeme, sondern sie beinhalten eine vereinfachte Basisfunktionalität eines Advice Systems (→ Abschnitt 2.6). Die von einem externen Advice Systems berechnete Fahrweise ist im Vergleich zu der von heutigen ATO-Systemen praktizierten Fahrweise jedoch meist deutlich besser, so dass die Integration eines externen Advice Systems wirtschaftlich sein kann.

Die Steuerung eines Tfz durch eine ATO führt zu anderen Anforderungen an ein Advice System. Eine ATO ist prinzipiell signaltechnisch sicher ausgelegt, d.h. ihr obliegt die Verantwortung für die Fahrt. Wenn sich dennoch ein Tf im Führerstand befindet, hat er üblicherweise nur noch eine überwachende Funktion.

Die folgenden Punkte sind bei einem Advice System für ein ATO gesteuertes Tfz zu beachten:

- Das Advice System und die Anbindung des Advice Systems an die ATO sind so zu gestalten, dass das Advice System keinen Einfluss auf die signaltechnische Sicherheit der ATO nehmen darf.
- Bei der Auswertung der vom Advice System berechneten Fahrempfehlung in der ATO muss sichergestellt werden, dass eine von der ATO berechnete restriktivere Fahr- und Bremsstellung niemals von einer weniger restriktiven Fahrempfehlung des Advice Systems übergangen wird.
- An das Advice System sind weitaus höhere Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Fahrempfehlung zu stellen als bei einem von einem Tf gesteuerten System. Da im Fall einer Gerätestörung oder einer falschen Berechnung kein Tf eingreifen kann, kann es zu betrieblichen Störungen oder sogar zum Stillstand des Betriebes kommen. Das Advice System darf im Zweifelsfall keine Fahrempfehlung geben und muss der ATO die Zugsteuerung überlassen.
- Die vom Advice System berechneten Fahrempfehlungen können feinfühliger sein und häufiger wechseln. Es sind jedoch auch hier nur die Fahr- und Bremsstufen zu berücksichtigen, die von der Antriebs- und Bremssteuerung vorgesehen sind. Bei der Häufigkeit des Wechsels der Fahrempfehlung ist die Reaktionszeit der Antriebs- und Bremssteuerung zu berücksichtigen, so dass auch hier die Vorgabe einer minimalen Gültigkeitszeit sinnvoll ist.
- Da in der ATO ohnehin der Zustand von Streckensignalen verarbeitet werden muss, sind diese Informationen nach Möglichkeit auch im Advice System zu berücksichtigen, um widersprüchliche Fahrempfehlungen zu vermeiden und eine optimale Fahrweise zu empfehlen. Hierbei ist jedoch wieder zu gewährleisten, dass der Abgriff dieser Informationen aus der ATO keine sicherheitsrelevanten Einflüsse hat.

Die Integration eines Advice Systems in eine ATO kann in Abhängigkeit vom Typ der ATO sehr aufwändig sein. Sie wird in den meisten Fällen mit einer Änderung an der vorhandenen ATO verbunden sein, d.h. zumindest für die ATO kann ein neuer Sicherheitsnachweis nötig werden. In Abhängigkeit von der gewählten Schnittstelle zwischen ATO und Advice System kann ein Sicherheitsnachweis auch für das Advice System oder für Teile des Advice Systems erforderlich werden (→ Abschnitt 4.4.3).

4.4 Aufbau eines Advice Systems

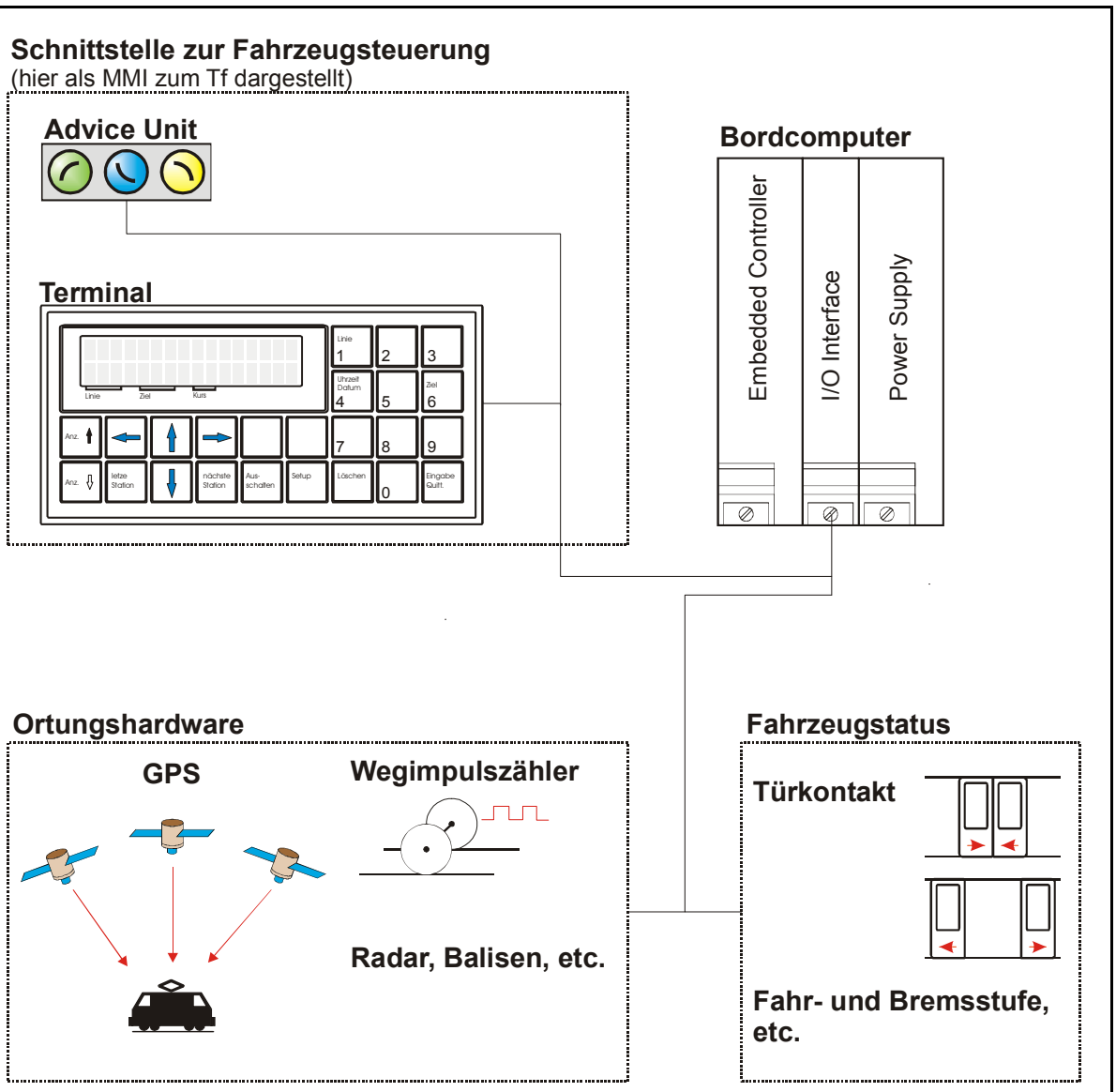
Advice Systeme bestehen üblicherweise aus mehreren Hard- und Softwarekomponenten, deren typische Eigenschaften an dieser Stelle kurz vorgestellt werden. Auch wenn bei konkreten Systemen von dieser Grundeinteilung im Einzelnen abgewichen werden kann, erlaubt sie doch, die wesentlichen Komponenten zu beschreiben.

Im Folgenden wird von einem rechnergestützten Advice System ausgegangen, dessen zentrale Komponente ein Bordcomputer ist. Trotz der komplexen Aufgaben eines Advice Systems muss es sich nicht um ein eigenständiges System handeln. Es ist möglich, dass sich verschiedene logische Systeme eine physikalische Hardware teilen, wenn folgende Besonderheiten beachtet werden:

- Der Bordcomputer muss so leistungsfähig sein, dass alle Anwendungen gleichzeitig (quasiparallel) ausgeführt werden können (Multitaskingfähigkeit) und sich nicht gegenseitig behindern. Auch wenn alle Anwendungen entsprechend ihrer Spezifikationen voll ausgelastet sind, muss das Gesamtsystem noch reagieren und stabil laufen. Je nach Anwendung kann eine Echtzeitfähigkeit gefordert sein, d.h. eine Garantie, dass das System innerhalb einer fest definierten Zeit auf ein Ereignis reagiert.
- Die Anwendungen können sich Hard- und Software-Komponenten sowie Daten teilen, so dass sowohl der Entwicklungsaufwand als auch die Wartung vereinfacht wird.
- Anwendungen, die sich einen gemeinsamen Bordcomputer teilen, sollten sich auf dem gleichen Sicherheitslevel befinden. Das Gesamtsystem muss immer dem Level der Anwendung mit den höchsten Sicherheitsanforderungen genügen. Wenn sich z.B. ein Advice System mit einer Automatic Train Protection einen Bordcomputer teilen soll, müssen auch das Advice System oder zumindest Teile davon signaltechnisch sicher ausgeführt werden. Dies ist jedoch mit einem erheblich größeren Aufwand verbunden, so dass davon abzuraten ist (→ Abschnitt 4.4.3).

4.4.1 Hardwarekomponenten

Rechnergestützte Advice Systeme bestehen aus dem eigentlichen Bordcomputer, ggf. einem Terminal zur Eingabe der grundlegenden Daten, einem System zur Anzeige der Fahrempfehlung bzw. zur Kommunikation mit der ATO sowie aus Hardware-Schnittstellen zur Fahrzeugsteuerung und zu Ortungsaufnehmern (Bild 44).



Legende

MMI:	Mensch-Maschine-Interface zur Kommunikation mit dem Tf.
Advice Unit:	Einheit zur Anzeige der Fahrempfehlung an den Tf. Diese kann auch in das Terminal integriert werden.
Terminal:	Display und Tastatur zur Eingabe von grundlegenden Daten. Auf ein eigenständiges Terminal kann verzichtet werden, wenn alle nötigen Informationen über ein vorhandenes System abgefragt werden können.
Embedded Controller:	Hauptplatine des Bordcomputers.
I/O Interface	Hardware-Interfaces zur Kommunikation mit der Ortungshardware, der Fahrzeugsteuerung, der Advice Unit und dem Terminal.
Power Supply:	Stromversorgung.

Bild 44: Hardware-Komponenten eines typischen Advice Systems[1]

[1] Die verwendeten Symbole orientieren sich an dem später vorgestellten System „Siemens METROMISER™“

Der Bordcomputer ist das Herzstück eines Advice Systems. Er dient zur Berechnung der Fahrempfehlung, zur Datenhaltung und zur Kommunikation mit den externen Komponenten.

Bordcomputer aktueller Advice Systeme basieren auf frei programmierbaren Mikroprozessoren unter Verwendung eines (standardisierten) Betriebssystems und sind ähnlich eines PC-Systems aufgebaut. Teilweise handelt es sich sogar um Industrie PCs, die mit einem Standardbetriebssystem (z.B. Windows®, Linux oder QNX) betrieben werden. Die Verwendung eines PC-Systems und eines Standardbetriebssystems kann die Entwicklung eines Advice Systems deutlich erleichtern.

Bordcomputer bestehen häufig aus den folgenden logischen oder physikalischen Komponenten:

- Embedded Controller: Hauptplatine des Bordcomputers, bestehend u.a. aus Prozessor (CPU), Hauptspeicher (RAM), ggf. nichtflüchtigem Speicher (z.B. S-RAM oder Flash RAM) und Bussystem (z.B. PCI, PCMCIA, CAN, etc.) zur Anbindung externer Komponenten.
- I/O Interface: Schnittstellenkarte zur Kommunikation mit externen Geräten (z.B. über RS-232, Wagenbus oder Ethernet) und Hardware Ein- und Ausgängen (z.B. Wegimpulszähler, Türkontakt etc.). Das I/O Interface ist über das Bussystem mit dem Embedded Controller verbunden und wird von diesem gesteuert.
- Power Supply: Stromversorgung zur zuverlässigen Versorgung des Bordcomputers mit Strom. Da Bordcomputer hohe Anforderungen an die Qualität und die Stabilität der Stromversorgung stellen, ist die Power Supply häufig mit einem System zur Überbrückung von kurzzeitigen Stromausfällen oder von Stromschwankungen ausgestattet (z.B. Akku, Kondensator, etc.).

Advice Systeme benötigen zur Berechnung einer Fahrempfehlung den momentanen Ort und die momentane Geschwindigkeit (→ Abschnitt 3.5). Zur Ermittlung dieser Größen können unterschiedliche Systeme verwendet werden, z.B. Wegimpulszähler, Radarsysteme oder ein satellitengestütztes Navigationssystem (z.B. GPS). Der Bordcomputer muss über eine geeignete Schnittstelle die Ortungsinformationen abfragen können. Üblicherweise liefern die externen Systeme nur Rohdaten (z.B. Anzahl der Wegimpulse oder geografische Koordinaten), die dann von einer Software-Logik innerhalb des Bordcomputers ausgewertet werden.

Weiterhin werden häufig Informationen zum momentanen Fahrzeugstatus (z.B. Türfreigabe, Fahr- und Bremsstufe, etc.) benötigt. Diese Informationen können entweder über digitale Eingänge diskret abgefragt oder über einen Fahrzeugbus als Telegramm an den Bordrechner übertragen werden.

Der Bordcomputer benötigt eine Schnittstelle zur Fahrzeugsteuerung. Im Falle eines ATO-Systems ist dies die Schnittstelle zur ATO, über die die Fahrempfehlung gegeben wird. Die vom Advice System benötigten Informationen über Zugnummer, Fahrweg, etc. können entweder von der ATO oder von einem weiteren System über den Zugbus empfangen werden.

Bei einem Tf-geführten System muss die Fahrempfehlung dem Tf über Leuchtmelder oder über ein Display gegeben werden. Weiterhin kann ein Terminal mit Display und Tastatur nötig sein, über das der Tf vor Fahrtantritt die Fahrt auswählt. Auf das Terminal kann verzichtet werden, wenn das Tfz mit einem weiteren Informationssystem ausgestattet ist, das diese Informationen verarbeitet. Ferner muss es über eine Schnittstelle (z.B. einen standardisierten Wagenbus) mit dem Advice System verbunden sein. Für Wartungs- und Konfigurationsarbeiten kann unter Umständen eine zusätzliche Schnittstelle über ein temporär zu verbindendes externes Terminal oder eine Netzwerkverbindung nötig sein. Der Bordcomputer muss diese Schnittstellen hardwareseitig unterstützen.

4.4.2 Softwarekomponenten

Bei den für ein Advice System nötigen Softwarekomponenten ist es im Gegensatz zu den Hardwarekomponenten weitaus schwieriger, typische Module zu identifizieren, die bei allen Advice Systemen vorhanden sein müssen. Dies liegt darin begründet, dass es viele verschiedene Möglichkeiten des Software-Designs gibt, die den grundlegenden Anforderungen an ein Advice System gerecht werden. Schränkt man jedoch das Grundkonzept auf die heute üblichen mikroprozessorbasierten Bordcomputer mit universellem Betriebssystem und universeller Entwicklungsumgebung ein, so können auch hier typische Komponenten identifiziert werden (Bild 45).

Folgende Softwarekomponenten treten üblicherweise auf:

- Hardware Abstraction Layer (HAL):
  Diese Schnittstelle zwischen Betriebssystem und Hardware dient zur Ansteuerung der Hardware durch das Betriebssystem oder durch die Anwendung. Dadurch werden Betriebssystem und Anwendung unabhängiger von der eingesetzten Hardware. Sie verwenden nur noch die vom HAL definierten logischen Funktionalitäten. Somit können einzelne Hardwarekomponenten gegen andere Typen mit ähnlichem Funktionsumfang ausgetauscht oder durch eine Simulation ersetzt werden, ohne dass dies mit Änderungen bei den Anwendungen verbunden ist.

- Betriebssystem:
  Das Betriebssystem bietet grundlegende Funktionalitäten zur Prozessverwaltung (u.a. Multitasking und ggf. Echtzeitunterstützung), zum Dateihandling, zur Netzwerkunterstützung (z.B. TCP/IP), zur Hardwareansteuerung (über den HAL) und zum Starten des Systems (→ Abschnitt 4.4.2.1).

- Entwicklungs-Framework:
  Ein Framework bezeichnet eine oder mehrere Bibliotheken zur Erfüllung anwendungsunabhängiger Aufgaben. In einem Advice System können unterschiedliche Frameworks zur Anwendung kommen, die ggf. aufeinander aufbauen können (→ Abschnitt 4.4.2.2).

- Anwendungen und Dienste:
  Die Anwendungen und Dienste bilden die eigentliche Funktionalität des Bordcomputers (→ Abschnitt 4.4.2.3).

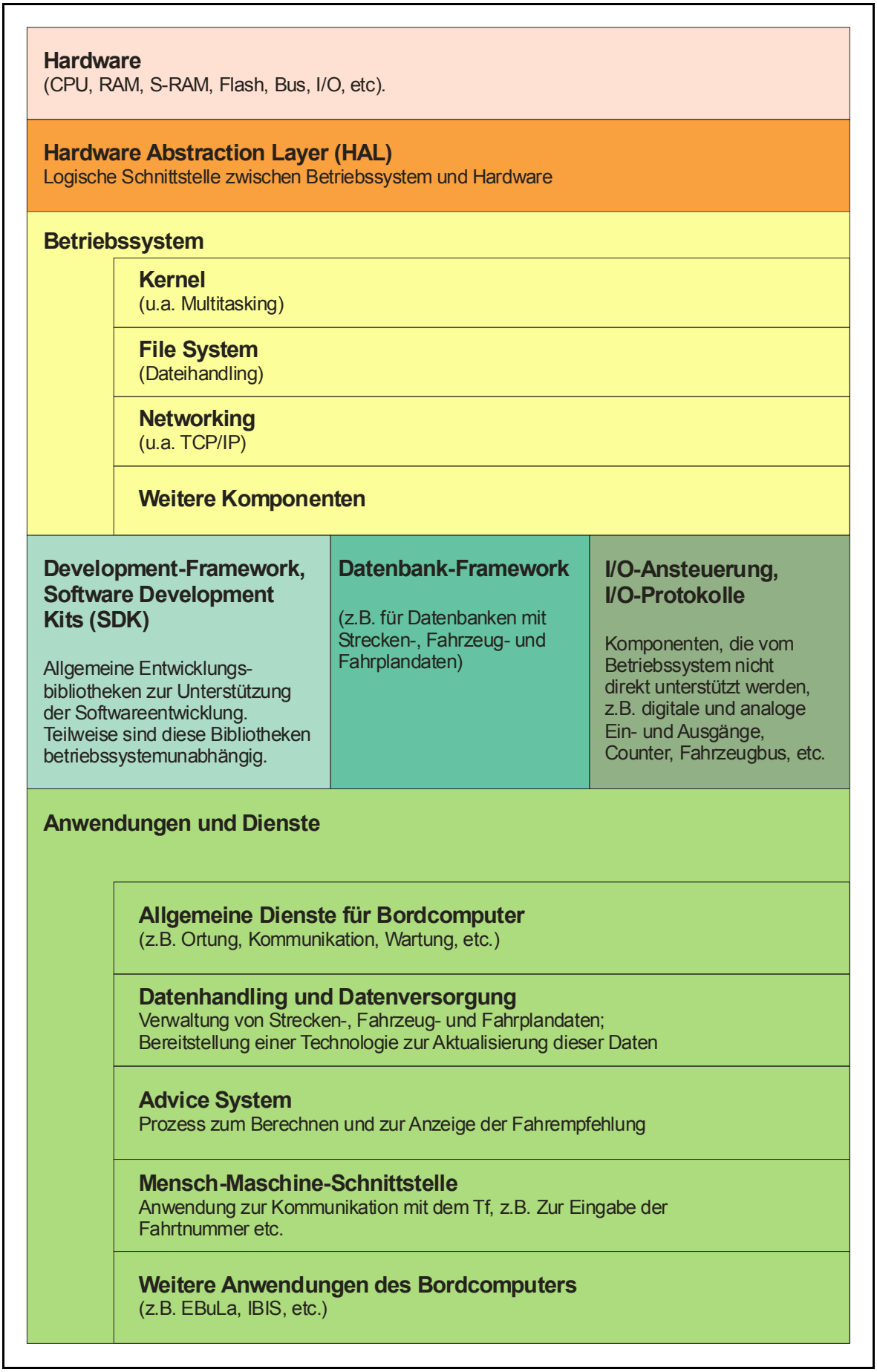


Bild 45: Typische Softwarekomponenten eines Advice Systems

4.4.2.1 Betriebssystem

Das Betriebssystem ist die Grundlage aller Anwendungen eines Bordcomputers. Im Betriebssystem-Kernel befinden sich die zentralen Komponenten wie die Speicherverwaltung, die Multitaskingfähigkeit, ggf. die Echtzeitfähigkeit, die Prozesskommunikation und einige Komponenten des HAL. Das File System dient zur persistenten Speicherung von Daten auf einem Datenträger (z.B. Flash-Speicher, S-RAM oder Festplatte). Moderne Betriebssysteme besitzen grundlegende Netzwerkfunktionalitäten. Üblicherweise werden zumindest Ethernet, Wireless LAN oder Bluetooth Netzwerkverbindungen und das Protokoll TCP/IP mit einigen grundlegenden Diensten unterstützt.

Die für die Anwendungen und Dienste nötigen Funktionalitäten des Betriebssystems werden über ein Application Programming Interface (API) bereitgestellt.

4.4.2.2 Entwicklungs-Framework

Ein Entwicklungs-Framework beinhaltet eine oder mehrere Bibliotheken mit Funktionalitäten, mit denen die Entwicklung von Anwendungen dadurch vereinfacht wird, dass Basisfunktionalitäten anwendungsunabhängig bereitgestellt werden. Entwicklungs-Frameworks können (müssen aber nicht) betriebssystem- und/oder sprachunabhängig sein. Sie können aufeinander aufbauen, indem eine spezielle Bibliothek einer allgemeinen Bibliothek nachgeschaltet wird. Da zunehmend objektorientierte Sprachen eingesetzt werden, kapseln Entwicklungs-Frameworks ihre Funktionalitäten häufig in Klassen, die von den Anwendungen dann als Instanz oder als statisches Objekt verwendet werden können.

Bei einem Advice System haben drei Arten von Frameworks eine Bedeutung:

- Allgemeines Framework:
  Bibliothek zur Kapselung von Basisfunktionalitäten des Betriebssystems (z.B. Speicherverwaltung, Prozessverwaltung, Dateiverwaltung, Netzwerkprotokolle), der Entwicklungsumgebung (z.B. für Zeichenketten, Felder) oder der Mensch-Maschine-Schnittstelle (z.B. Display, Tastatur).

- Datenbank-Framework:
  Bibliothek zur Kapselung des Zugriffs auf eine Datenbank. Datenbanken können in einem Advice System z.B. zur Verwaltung von Infrastruktur-, Fahrzeug- oder Fahrplandaten verwendet werden.

- Framework zur Ansteuerung von Hardware-Komponenten und zur Kommunikation mit anderen Komponenten:
  Bibliothek zur Kapselung von Funktionalitäten, die zur Ansteuerung von digitalen oder analogen Ein- und Ausgängen bzw. zur Kommunikation mit externen Systemen über einen Fahrzeugbus dienen.

4.4.2.3 Anwendungen und Dienste

Eine Anwendung ist definiert als ein eigenständiges Programm, das zur Erfüllung seiner Aufgabe gestartet und nach Beendigung dieser Aufgabe auch wieder beendet wird. Sie kann von externen Diensten oder Bibliotheken abhängig sein. Anwendungen sind häufig interaktiv

und kommunizieren mit dem Benutzer. Demgegenüber ist ein Dienst ein Prozess, der in der Regel beim Hochfahren des Systems automatisch gestartet wird. Er erledigt seine Aufgabe im Hintergrund oder beantwortet Anfragen von verschiedenen Anwendungen. Anwendungen und Prozesse können in mehrere sog. Threads unterteilt werden, die quasiparallel ablaufen. Im Gegensatz zu einem eigenständigen Prozess laufen Threads jedoch im gleichen Speicherkontext ab, d.h. sie können gemeinsam auf Daten zugreifen und sehr schnell miteinander kommunizieren. Zur Synchronisation von Threads stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, die den gleichzeitigen Zugriff auf gemeinsam genutzte Daten regeln.

Der Übergang zwischen Anwendungen und Diensten kann fließend sein, wenn z.B. ein Dienst auch mit dem Benutzer kommuniziert oder wenn eine Anwendung eine Funktionalität für eine andere Anwendung bereitstellt.

Neben der Hauptaufgabe eines Advice Systems - der Berechnung und Anzeige von Fahrempfehlungen - gibt es einige andere Aufgaben, die zwar von einem Advice System benötigt werden, jedoch unabhängig vom Advice System sind und eigenständig bzw. von anderen Anwendungen des Bordcomputers genutzt werden können. Diese sekundären Aufgaben sollten aus Gründen der Flexibilität und der Übersichtlichkeit unabhängig von der Hauptanwendung als eigenständiger Prozess mit einer definierten Schnittstelle entworfen werden.

4.4.2.4 Ortung

Advice Systeme sind auf eine kontinuierliche Ortsbestimmung angewiesen, um jederzeit in Abhängigkeit von Ort und Zeit eine Fahrempfehlung zu berechnen (→ Abschnitt 3.5).

Das Ortungssystem sollte als anwendungsunabhängige Softwarekomponente in einem eigenständigen Prozess des Bordcomputers implementiert werden.

Da die Qualität der Ortsbestimmung in Abhängigkeit von Art und Qualität der Signale der Initialsensoren und von der Qualität des Streckenatlasses abhängig ist, sollte das Ortungssystem nicht nur das Ergebnis der Berechnung liefern, sondern auch einen situationsabhängigen Qualitätsfaktor bzw. eine Fehlerabschätzung. Die Anwendungen können diese Angaben dann in ihre Berechnungen einfließen lassen. Weiterhin ist der genaue Zeitpunkt der jeweiligen Ortsbestimmung zu dokumentieren, da sich im Hochgeschwindigkeitsverkehr bei 300 km/h der Ort innerhalb von 1 Sekunde schon um über 80 m ändert.

4.4.2.5 Datenhandling und Datenaufbereitung

Die Qualität einer Fahrempfehlung ist hauptsächlich von den Strecken-, Fahrzeug- und Fahrplandaten abhängig (→ Anhang E). Diese Daten müssen zuverlässig, aktuell und schnell dem Advice System zur Verfügung stehen (→ Abschnitt 3.6.2). Das interne Datenhandling ist für das Zusammenfügen und Bereitstellen der für die aktuelle Fahrempfehlung notwendigen Daten zuständig. Hierzu müssen alle für die aktuelle Fahrt relevanten quasistatischen, periodenabhängigen, tagesaktuellen und aktuellen betrieblichen Daten aus den unterschiedlichen Datenquellen vereint werden. Während die Quelldaten normalerweise aus einer Datenbank oder aus persistenten Dateien stammen, stehen die vereinten Daten den Anwendungen und Diensten programmintern zur Verfügung, z.B. als Objektinstanzen im Hauptspeicher.

Basis für die Datenvereinigung ist die eindeutige Fahrtnummer, der exakt ein Fahrplan und damit auch eine Fahrtroute zugeordnet sind. Bei vielen Verkehrsunternehmen wird anstatt einer eindeutigen Fahrtnummer eine Kombination aus Linien-, Kurs- und Zielnummer verwendet, die ggf. durch eine Abfahrtszeit konkretisiert wird. Wichtig ist dabei lediglich, dass anhand einer eindeutigen Vorschrift die Fahrtroute und der Fahrplan mit allen relevanten Abfahrts- und Ankunftszeiten ermittelt werden kann.

Bei der Verarbeitung von tagesaktuellen oder aktuellen betriebliche Daten muss durch einen eindeutigen Verweis geklärt werden, welche periodenabhängigen Daten dadurch ersetzt oder verändert werden. Bei allen periodenabhängigen oder tagesaktuellen Daten ist der jeweilige Gültigkeitszeitraum anzugeben und auszuwerten.

Wenn nicht alle für eine Fahrt nötigen Daten verfügbar sind, kann versucht werden, Ersatzdaten aus ähnlichen Fahrten zu generieren. Dies muss jedoch protokolliert und ggf. dem Tf angezeigt werden. Ist die Qualität der Ersatzdaten nicht auf dem erforderlichen Niveau, muss die Fahrtoptimierung für den betreffenden Abschnitt deaktiviert und dies dem Tf angezeigt werden.

Nachdem die Daten für die aktuelle Fahrt generiert wurden, stehen sie dem Modul zur Optimierung der Fahrweise zur Verfügung. Sofern sich während der Fahrt relevante Daten ändern (z.B. durch die Integration von aktuellen betrieblichen Daten) muss dies dem Optimierungsmodul angezeigt werden, um die Datenkonsistenz zwischen den Modulen Datenhandling und Optimierung zu gewährleisten. Da diese beiden Module häufig in unterschiedlichen Threads oder Prozessen angeordnet sind, muss gewährleistet sein, dass jeder Thread seine eigene Datenkopie hält oder dass durch einen geeigneten Synchronisationsmechanismus gemeinsame Daten geschützt werden.

4.4.2.6 Datenversorgung und Datenformate

Die Datenversorgung ist eng mit dem Datenhandling verknüpft. Seine Hauptaufgabe ist jedoch die Speisung der Datenbank bzw. der persistenten Dateien mit neuen Datensätzen. Der Weg der Daten auf das Advice System ist variabel (→ Abschnitt 3.6.2). Es muss jedoch gewährleistet sein, dass nur dann direkt von einer externen Anwendung bzw. von einem externen System auf die Datenbank bzw. auf die Datendateien zugegriffen wird, wenn die eigentliche Anwendung nicht läuft. Dies ist z.B. bei der Grunddatenversorgung oder bei Start des Systems der Fall. Werden periodenabhängige, tagesaktuelle oder aktuelle betriebliche Daten zur Laufzeit aktualisiert, darf dies nur durch eine definierte Schnittstelle des Datenversorgungsmoduls geschehen, die wiederum in engem Kontakt zum Datenhandling stehen muss.

Da der Speicherplatz auf dem Bordcomputer normalerweise begrenzt ist, werden die Daten onboard häufig in einer Datenbank oder in binären Dateien gespeichert. Dies hat zur Folge, dass das jeweilige Datenformat schon bei kleinen Änderungen der Datenstruktur geändert werden muss. Dies stellt normalerweise jedoch kein großes Problem dar, da zu diesem Zeitpunkt auch die entsprechenden Software-Änderungen durchgeführt werden. Gleichzeitig

mit der Übertragung der neuen Software auf den Bordcomputer muss die erweiterte Datenbank mit allen Daten neu gefüllt werden.

Anders ist es bei der regelmäßigen Versorgung mit periodenabhängigen oder tagesaktuellen Daten. Hierfür muss ein transparentes, erweiterungsfähiges, vom Kommunikationsweg unabhängiges und leicht verständliches Datenformat gewählt werden. Die Gründe hierfür sind:

- Das Datenformat soll unabhängig vom Kommunikationsweg sein, so dass mehrere Kommunikationswege möglich sind, ohne dass die Daten anders verarbeitet werden müssen.
- Die externen Daten können von unterschiedlichen Systemen bereitgestellt werden, d.h. sie müssen in einem dokumentierten und erweiterbaren Format vorliegen.
- Es muss damit gerechnet werden, dass in einer Übergangsphase unterschiedliche Softwarestände auf den Fahrzeugen installiert sind. Ggf. werden bei unterschiedlichen Softwareständen auch unterschiedliche Daten benötigt.

Diese Forderungen werden durch die Verwendung der ***eXtensible Markup Language (XML)*** erfüllt. Hierbei handelt es sich um ein vollständig erweiterbares, leicht zu erlernendes und reich ausgestattetes Universalformat. XML wurde vom ***World Wide Web Consortium (W3C)*** in ihrer Empfehlung vom 10.02.1998 in der Version 1.0 beschrieben und ist damit zum weltweit akzeptierten Standard für ein datenorientiertes Dateiformat geworden [W3C-1998]. Durch die Verwendung eines Schemas kann der Inhalt und das Format der XML-Datei beschrieben werden. Das W3C hat hierfür die ***XML Schema Definition Language (XSD)*** standardisiert, die wiederum selbst auf XML aufbaut.

Basierend auf XML wurden schon verschiedene Datenformate für Bahnanwendungen entwickelt und eingesetzt. Seit 2001 bemüht sich die ***RailML.org - Initiative*** um die Standardisierung von Daten des Bahnbetriebs [RailML-2003]. Hierfür werden für die Bereiche ***Fahrplan***, ***Infrastruktur*** und ***rollendes Material*** XSD-Schemen entwickelt, mit denen bahnspezifische Daten standardisiert zwischen Anwendungen ausgetauscht werden können.

Selbst wenn die von RailML standardisierten Datenformate nicht alle Daten berücksichtigen, die für ein Advice System nötig sind, bilden sie dennoch eine gute Basis für eine spezifische Erweiterung.

Nachteil aller XML-Formate ist der Speicherbedarf von XML-Dateien, da es sich um ASCII[1]- oder Unicode[2]-Dateien handelt. Weiterhin beinhaltet eine XML-Datei nicht nur den eigentlichen Inhalt, sondern zu jedem Datum ein Tag[3], das beschreibt, um welches Datum es

---

[1] ASCII: American Standard Code for Information Interchange: 8-Bit Zeichensatz, der vom American National Standard Institut (ANSI) standardisiert ist. Es existiert ein Basissatz von 128 Zeichen, der mit verschiedenen Erweiterungen ergänzt wird. Diese bestehen aus weiteren 128 Zeichen, überwiegend mit nationalen Besonderheiten, wie z.B. Umlaute.

[2] Unicode: Internationaler Zeichensatz mit einer Kombination von ein bis vier 8-Bit-Werten. Am bekanntesten sind die Codierungen UTF-8 und UTF-16LE. Bei der letztgenannten Codierung werden alle Zeichen mit 16 Bit dargestellt. Damit können u.a. alle lateinischen und griechischen Schriftzeichen dargestellt werden.

[3] „Tag“: englischer Ausdruck für ein Identifizierungszeichen

sich handelt. XML-Dateien können jedoch sehr gut komprimiert werden, häufig sogar auf unter 10 % ihres ursprünglichen Umfangs. Durch die Verwendung eines standardisierten Verfahrens wird der Datei- und Kommunikationsumfang deutlich reduziert und man hat immer noch den Vorteil eines XML-Formates.

4.4.2.7 Kommunikation

Advice Systeme müssen mit einer Vielzahl von externen Anwendungen oder Systemen kommunizieren:

- Ansteuerung von digitalen oder analogen Hardware-Ein- und Ausgängen (z.B. Wegimpulszähler, Türkontakt, etc.),
- Fahrzeugbus (z.B. IBIS-Wagenbus),
- Terminal zur Ausgabe von Statusmeldungen und zur Eingabe von Fahrtinformationen,
- Netzwerk (z.B. zur Datenversorgung, Diagnose, etc.) und
- Diagnose-Schnittstellen (z.B. Debug-Ausgabe).

Für die meisten Kommunikationsaufgaben gibt es mehrere mögliche Kommunikationswege. Diese sind je nach Aufgabe unterschiedlich gut geeignet (Tabelle 14). Obwohl bei der Systementwicklung die jeweils besten Kommunikationswege leicht identifiziert werden können, sollten dennoch auch alternative Wege berücksichtigt werden.

Durch die Unterstützung alternativer Kommunikationswege ergeben sich folgende Vorteile:

- Das System wird flexibler und ist schnell an andere Umgebungen anzupassen.
- Die erste Testphase beim Kunden wird vereinfacht, indem z.B. Hardware-I/Os, die nicht verfügbar sind, durch eine Simulation ersetzt werden.
- Durch die klare Trennung von Aufgabe und Kommunikationsweg wird die Softwarewartung vereinfacht.
- Die Entwicklung und der Test des Systems werden vereinfacht, indem man einzelne Module durch eine Simulation ersetzt.

Zur Unterstützung alternativer Kommunikationswege müssen die Kommunikations-Aufgaben, die zugehörigen Daten, die Protokolle und der eigentliche Kommunikationsweg streng voneinander getrennt in einem mehrschichtigen System modelliert werden. Somit ist gewährleistet, dass bei einer notwendigen Änderung auf einer Schicht die anderen Schichten nicht betroffen sind.

Kommunikationsweg	Eigenschaften	Eignung für[1]				
		Wegimpulszähler Türkontakt, etc.	Terminal-ansteuerung	Datenversorgung	Diagnose	Debuggen
Hardware-I/O	• Schnell • Teilweise interruptfähig • Nicht standardisiert	++	--	--	o	--
Serielle Schnittstelle (RS-232)	• Relativ schnell • Interruptfähig • Standardisiert • Variables Protokoll • Nutzung für unterschiedliche Zwecke • Preiswert	+	++	o	++	++
Wagenbus (z.B. IBIS)	• Standardisiertes Protokoll • Häufig langsam • Häufig geringe Aktualisierungsrate • Teilweise teuer	o	o	- / ++[2]	o	--
Kabelgebundenes Netwerk (Ethernet 10/100MBit)	• Sehr schnell • Standardisiert • Gegenseite benötigt entsprechende Schnittstelle • Protokolle: HTTP, FTP, SOAP • Eigene Protokolle möglich	-	+	+	++	++
Wireless LAN (IEEE 802.11b)	Wie Kabelgebundenes Netzwerk, jedoch • Drahtlos • Etwas langsamer (max. 11 MBit/s) • Teure Infrastruktur • Reichweite: ca. 30 - 150 m	--	-	++	++	++
Bluetooth	Wie Wireless LAN, jedoch • Langsamer (max. 768 KBit/s) • Viele Protokolle vordefiniert (z.B. serielle Schnittstelle) • Preiswert • Geringe Reichweite (max. 10 m)	-	-	o	+	O
GSM / GSM-R / UMTS	• Langsam • Standardisiert • Gegenseite benötigt entsprechende Schnittstelle • Benötigt Infrastruktur • Hohe Betriebskosten bei Mietnetz bzw. sehr hohe Investitionen bei eigenem Netz • Hohe Reichweite	--	--	+	o	-

Tabelle 14: Vergleich von Kommunikationswegen

[1] Eignung: „++“ = sehr gut geeignet; „--“ = gar nicht geeignet

[2] Für die Versorgung mit statischen oder periodenabhängigen Daten nicht gut geeignet; für tagesaktuelle oder aktuelle betriebliche Daten sehr gut geeignet.

4.4.2.8 Wartung

Die Software und die Daten von Advice Systemen müssen gewartet und gepflegt werden. Hierfür müssen Software-Schnittstellen definiert werden. Die Wartungsaufgaben können hinsichtlich der Durchführungsart (manuell, automatisch), des Anwendertyps und des typischen Zeitpunktes der Wartung eingeteilt werden (Tabelle 15). Anhand dieser Kriterien müssen die Schnittstellen und Kommunikationswege definiert werden.

	Art der Wartung[1]		Typischer Anwender[2]				Häufigkeit der Wartung zum Zeitpunkt[3]			
Wartungsaufgabe	Automatisch	Manuell	Entwickler	IT-Abteilung	Projekteure	Tf	Entwicklung	Testbetrieb	Inbetriebnahme	Betrieb
Softwareaktualisierung	+	++	++	+	-	--	++	++	+	o
Datenaktualisierung	++	+	+	+	++	o	-	+	++	+
Protokollierung von Fahrten	o	++	+	o	+	--	+	++	+	-
Funktionstest aller Komponenten	+	++	++	+	-	o	++	++	+	o
Netzwerkeinstellungen[4]	o	++	+	++	-	--	o	o	o	-
Überwachung des Systems von einer Zentrale	+	o	+	++	o	--	-	o	+	++
Debuggen und Test von neuen oder fehlerhaften Anwendungen	--	+	++	+	-	--	++	++	o	--

Tabelle 15: Typische Wartungsarbeiten

Für die Software- und Datenaktualisierung sowie die regelmäßige Protokollierung von Fahrten wurden die möglichen Kommunikationswege sowie deren spezifische Eigenschaften eingehend untersucht (→ Abschnitt 3.6.2 und 4.4.2.5 bis 4.4.2.7).

Alle anderen Wartungsaufgaben können dem Bereich Diagnose und Test zugeordnet werden. Ihnen ist gemeinsam, dass sie zum eigentlichen Betrieb nicht nötig sind, jedoch für die Stabilität des Systems dringend benötigt werden. Gerade hier ist es sehr wichtig, mehrere Schnittstellen und Kommunikationswege vorzusehen.

---

[1] Bedeutung der automatischen bzw. der manuellen Durchführung: „++“ = sehr wichtig; „--“ = unwichtig

[2] Bedeutung für die Anwendergruppe: „++“ = sehr wichtig; „--“ = unwichtig

[3] Häufigkeit der Wartung: „++“ = sehr häufig; „--“ = sehr selten

[4] Nur wenn das System über eine konfigurierbare Netzwerkschnittstelle verfügt

4.4.3 Sicherheitsnachweis

Ein Advice System zur Unterstützung eines Tf ist zunächst nicht sicherheitskritisch, da die Verantwortung für die Fahrweise alleine beim Tf liegt. Wenn dem Advice System jedoch weitere Aufgaben zugeordnet werden bzw. es Teil einer sicherheitsrelevanten Gesamtlösung ist, kann ein Sicherheitsnachweis erforderlich werden. Dies ist der Fall, wenn eines der folgenden Kriterien vorliegt:

- Das Advice System ist Teil einer ATO:
  Ist das Advice System eine Komponente der ATO (→ Abschnitt 4.3), ist auch das Advice System voll in den Sicherheitsnachweis der ATO einzubeziehen.
- Das Advice System kommuniziert mit einer ATO:
  Wenn das Advice System eine ATO unterstützt, jedoch nicht Teil der ATO ist, hängt die Art des Sicherheitsnachweises von der genauen Aufgabenverteilung ab. Ist die ATO unabhängig vom Advice System voll funktionsfähig und beschränkt sich die Einflussnahme des Advice Systems auf die ATO auf eine Fahrempfehlung, die von der ATO bzw. der übergeordneten ATP signaltechnisch sicher überprüft wird, kann der Sicherheitsnachweis auf die physikalische Kommunikationsebene beschränkt werden.
- Das Advice System kommuniziert mit anderen sicherheitsrelevanten Systemen:
  Nutzt ein Advice System Informationen aus anderen sicherheitsrelevanten Systemen, z.B. der ATP, muss nachgewiesen werden, dass das Advice System über das physikalische Kommunikationsmedium keinen Einfluss auf das andere System haben kann. Nutzt ein sicherheitsrelevantes externes System Informationen des Advice Systems, so ist der Nachweis auch für das ganze Advice System und das logische Kommunikationsprotokoll zu führen.
- Das Advice System greift direkt in die Fahrzeugsteuerung ein:
  Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, dass das Advice System eine Rollphase erzwingt, indem die Zugkraft vom Advice System auf Null gesetzt wird und der Tf nur noch rollen oder bremsen kann. Hierbei müsste die signaltechnische Sicherheit nur nachgewiesen werden, wenn Fahr- und Bremsteuerung nicht unabhängig voneinander sind. Dennoch kann ein Sicherheitsnachweis gefordert werden, da der Tf nicht mehr voll für die Fahrt verantwortlich ist. Weiterhin ist zu beachten, dass das System sehr zuverlässig sein muss, da im Falle einer Fehlfunktion das Fahrzeug stillsteht bzw. das Advice System überbrückt werden muss.
- Der Fahrplan des Advice Systems ersetzt den gedruckten Buchfahrplan:
  Dem Buchfahrplan werden teilweise sicherheitsrelevante Aufgaben zugesprochen, die in diesem Fall vom Advice System erfüllt werden müssen. Wird der gedruckte Buchfahrplan durch ein elektronisches System ersetzt (z.B. EBuLa: → Abschnitt 3.6.3.1), muss gewährleistet sein, dass dem Tf immer alle Informationen aus dem Geschwindigkeitsheft und zumindest ein gültiger Ersatzfahrplan zur Verfügung stehen. Dies kann entweder durch einen Sicherheitsnachweis des Advice Systems oder

durch ein geeignetes Ersatzsystem erfolgen, z.B. durch gedruckte Ersatzfahrpläne oder durch Geschwindigkeitsrestriktionen.

Ist der Nachweise der signaltechnischen Sicherheit für das Advice System oder Teile davon nötig, hat dies schon beim Design der Anwendung einen entscheidenden Einfluss. Davon sind die folgenden Bereiche betroffen:

- Grundsätzliches Design:
  Der Sicherheitsnachweis jeder Komponente ist sehr aufwändig. Daraus folgt, dass ein sehr schlankes Design gefordert ist, das nur die absolut notwendigen Komponenten und Daten enthält. Somit gehen alle Komfortfunktionen verloren und es kann nur ein sehr einfacher Algorithmus verwendet werden, der mit möglichst wenigen Daten auskommt.

- Hardware:
  Sicherheitsrelevante Systeme verwenden normalerweise Rechnerarchitekturen mit zwei oder drei Bordcomputern, die mit denselben Informationen versorgt werden und die unabhängig voneinander dieselbe Aufgabe erledigen. Teilweise werden hierfür auch unterschiedliche Algorithmen verwendet, um systematische Fehler weitestgehend auszuschließen. Nur wenn zwei Bordcomputer zum gleichen Ergebnis kommen (2v2: zwei von zwei bzw. 2v3: zwei von drei) wird das Ergebnis ausgeführt, ansonsten wird versucht, das System in einen sicheren Zustand, zumeist den Stillstand, zu bringen.
  Die nötige Hardware eines signaltechnischen Systems ist im Verhältnis zu einem Standard-Industrie-PC viel aufwändiger und damit um ein Vielfaches teurer.

- Software:
  Jede Softwarekomponente ist von unabhängigen Gutachtern zu überprüfen und zuzulassen. Somit ist für jeden Softwarestand, der im Regelbetrieb eingesetzt wird, eine Zulassung erforderlich, die aufwändig, langwierig und teuer ist. Eine regelmäßige Softwarewartung, bei der schnell auf neue Anforderungen reagiert werden kann, ist damit fast auszuschließen.
  Die Wahl des Betriebssystems und der Entwicklungsumgebung ist stark eingeschränkt. Die Verwendung von Microsoft Windows® oder Standarddistributionen von Linux ist fast ausgeschlossen, da hier der Sicherheitsnachweis wirtschaftlich nicht zu führen ist. Da der Sicherheitsnachweis bei objektorientierter Programmierung (z.B. C++) schwerer zu führen ist, werden in sicherheitsrelevanten Systemen häufig prozedurale Programmiersprachen (z.B. C, PASCAL) eingesetzt.

Insgesamt ist die Entwicklung eines Advice Systems mit erforderlichem Sicherheitsnachweis also wesentlich aufwändiger und um ein vielfaches teurer als bei einem System, das ohne Sicherheitsnachweise auskommt. Weiterhin schränkt der Sicherheitsnachweis den Funktionsumfang sowie die Auswahl der Hardware und der Entwicklungsumgebung deutlich ein.

4.5 Erwartungen an ein Advice System

Die Erwartungen an ein Advice System sind stark vom Blickpunkt abhängig. Es sind folgende Personengruppen zu betrachten:

- Triebfahrzeugführer,
- Betreiber (EVU) und
- (Kunden des Bahnsystems).

Jede dieser Personengruppen hat unterschiedliche Ziele und Erwartungen an das Bahnsystem, deren Erfüllung durch die Einführung eines Advice Systems beeinflusst werden kann.

Zunächst müssen die Erwartungen, die im Zusammenhang mit einem Advice System stehen, geklärt werden (Bild 46). Dabei fällt auf, dass der Kunde in keinerlei direkter Beziehung zum Advice System steht, er jedoch durch seine Erwartung an das EVU und ggf. an den Tf erst die Einführung eines Advice Systems notwendig machen kann (Tabelle 16).

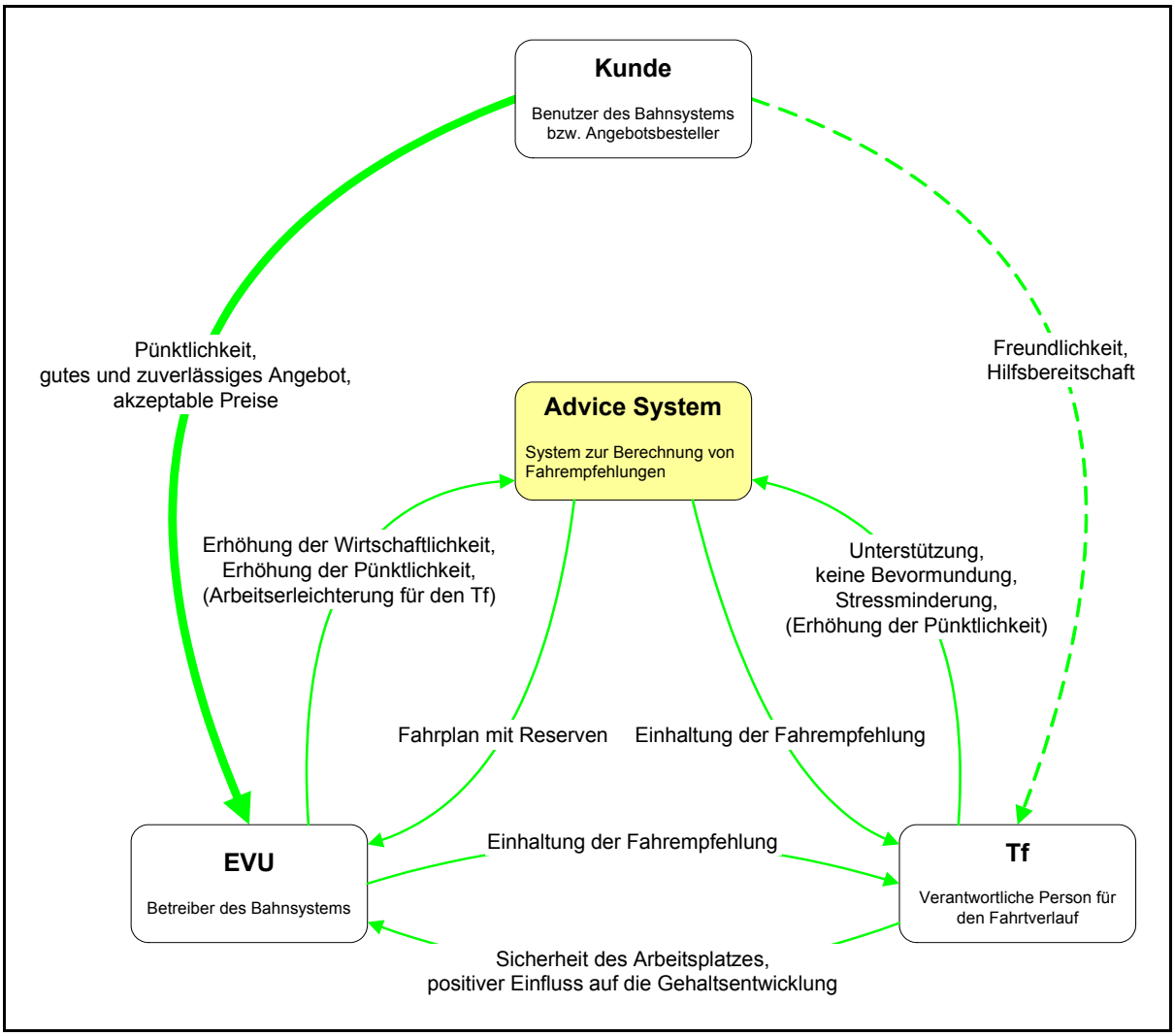


Bild 46: Erwartungen im Zusammenhang mit einem Advice System

Das EVU, der Tf und das Advice System sind durch vielfältige Erwartungen miteinander verknüpft. Letztendlich können diese Erwartungen nur erfüllt werden, wenn alle Voraussetzungen für die Einführung eines Advice Systems gegeben sind und wenn das System von allen Beteiligten akzeptiert wird.

Erwartung	Beeinflussung der Erwartung durch ein Advice System
Pünktlichkeit	+ Wenn entsprechende Pufferzeiten zur Verfügung stehen, wird der Tf darin unterstützt, seine Fahrweise entsprechend der physikalischen Grenzen so zu wählen, dass Ankunft und Abfahrt möglichst der im Fahrplan genannten Zeit entsprechen.
Akzeptable Preise	± Wenn die Wirtschaftlichkeit des Systems infolge der Randbedingungen und der Akzeptanz durch die Tf gegeben ist, können die Fahrpreise stabil gehalten oder gar gesenkt werden. Ist die Wirtschaftlichkeit im realen Betrieb nicht gegeben, sind Preiserhöhungen zum Abfangen der Investitionskosten zu befürchten.
Freundliches Personal	(+) Tf, die durch ein Advice System stressfreier und ruhiger fahren, werden - sofern es zu ihrem Aufgabenbereich gehört - Kunden freundlicher behandeln.

Tabelle 16: Erwartungen der Kunden, die in Beziehung zu einem Advice System stehen

4.6 Akzeptanz eines Advice Systems

Der technische und wirtschaftliche Erfolg eines Advice Systems ist stark von der Akzeptanz des Systems abhängig. Nur Fahrempfehlungen, die auch angenommen und durchgesetzt werden, können die Erwartungen befriedigen.

4.6.1 Akzeptanz beim Triebfahrzeugführer

Primäre Aufgabe des Tf ist es, das Tfz sicher und pünktlich an seinen Bestimmungsort zu führen (→ Abschnitt 2.5). Das Advice System sollte ihn darin unterstützen. Daneben hat ein Tf jedoch weitere (persönliche) Ziele, die einen Einfluss auf die Akzeptanz haben:

- Sicherheit des Arbeitsplatzes:
  Ein Advice System darf den Arbeitsplatz des Tf nicht unbedeutender oder gar überflüssig machen. Andererseits hat die wirtschaftliche Lage des (inzwischen privatwirtschaftlich geführten) Bahnbetreibers auch einen direkten Einfluss auf seinen Arbeitsplatz und sein Gehalt. Wenn also durch ein Advice System die Wirtschaftlichkeit des Bahnsystems erhöht werden kann, hat der Tf dadurch auch Vorteile.

- Stressminderung:
  Tf leiden durch ihre komplexen Aufgaben, verbunden mit nicht von ihnen zu vertretenden Störungen und knappen Fahrplänen, häufig unter Stress. Dies ist besonders im städtischen Nahverkehr (U- und S-Bahn, Stadt- und Straßenbahn) zu beobachten, da dort zusätzliche Belastungen durch hohes Passagieraufkommen, durch Fahren auf Sicht bei Stadt- und Straßenbahnen (teilweise auch auf gemeinsamem Fahrweg mit dem Individualverkehr) und durch zusätzliche Aufgaben (z.B. Fahrscheinverkauf, Auskunft für Fahrgäste etc.) auftreten.

Advice Systeme können dazu beitragen, den Stress zu mindern, indem der Tf bei der Einhaltung des Fahrplans und bei der Wahl der Fahrweise unterstützt wird. Ein gut funktionierendes Advice System führt zu einer ruhigeren und damit auch entspannten Fahrweise.
Genauso wurde jedoch beobachtet, dass sich Tf durch die zusätzliche Aufgabe des Beobachtens und der Befolgung der Fahrempfehlung abgelenkt oder gar gestört fühlten, was zu einer Erhöhung des Stresses führen kann.

- Erfahrung durch langjährige Praxis:
  Tf, die schon viele Jahre diesen Beruf ausüben, behaupten zu Recht, ein sehr gutes Gefühl für das Fahren eines Tfz zu haben und stehen einem Advice System zunächst häufig skeptisch gegenüber. Dieser Skepsis kann nur begegnet werden, wenn das Advice System das hält, was man sich von ihm verspricht und die vom System vorgeschlagenen Fahrempfehlungen im Nachhinein vom Tf als sinnvoll bewertet werden.
- Widerstand gegen die Bevormundung durch ein elektronisches System:
  Ein Tf, der den Eindruck hat, von einem Advice Systeme bevormundet oder in der Ausübung seiner Tätigkeit beeinträchtigt zu werden, wird das System nicht akzeptieren. Dabei spielt es keine Rolle, ob dies wirklich so ist. Alleine das Gefühl zählt.

Daraus folgend kann die Akzeptanz und damit die Wirtschaftlichkeit eines Advice Systems durch folgende Maßnahmen erhöht werden:

- Definition der Erwartungshaltung:
  Bevor ein Advice System eingeführt wird, müssen die Erwartungen an das System und an den Tf klar definiert werden (→ Abschnitt 4.5). Die Erwartungen sollten zeitlich gestaffelt und anhand von Meilensteinen überprüfbar sein.
  Es dürfen nur Erwartungen definiert werden, die vom System, vom Betrieb und von den Tf auch erfüllt werden können. So ist z.B. die Erwartung, dass im nicht automatisch geführten Betrieb Fahrempfehlungen zu mehr als 95 % eingehalten werden, in der Praxis irreal, d.h. diese Erwartung kann nicht erfüllt werden.
- Überprüfung, ob das System der Erwartungshaltung entspricht:
  Durch einen begrenzten Testbetrieb (→ Abschnitt 7.3.4) mit einem einzelnen Fahrzeug kann überprüft werden, ob das System prinzipiell den Erwatungen entspricht. Jeder definierte Meilenstein muss entsprechend den Anforderungen überprüft werden.
  Wenn das System nicht den Erwartungshaltungen entspricht, muss entschieden werden, ob das System verbessert werden kann, ob die Erwartungshaltung angepasst werden soll oder ob die Einführung des Systems abgebrochen werden muss. Hierbei sind insbesondere die wirtschaftlichen Gesichtspunkte zu berücksichtigen.

- Information und Schulung der Triebfahrzeugführer:
  Ganz entscheidend für die Akzeptanz des Systems sind die Information und die Schulung aller Beteiligten des Betreibers, insbesondere der Tf. Im Rahmen der Information sind alle wesentlichen Aspekte, die zur Erprobung bzw. Einführung des Systems beigetragen haben, detailliert zu erläutern. Hierbei sind vor allem die für die Tf relevanten Aspekte in einer positiven, aber auch wahren Weise darzulegen. Die Tf müssen darüber aufgeklärt werden, dass ein Advice System immer nur eine Empfehlung darstellt und die Tf nicht bevormundet.

  Da diese Information die Grundlage für die Akzeptanz des Systems bei den Tf bildet, sollten die Tf schon frühzeitig in die Planungen einbezogen werden und auch über die technischen Grundlagen und die Arbeitsweise des Systems informiert werden. Nur jemand, der ein System (zumindest prinzipiell) versteht, kann es auch objektiv bewerten und akzeptieren. Beim Aufbau der Erwartungshaltung der Tf an das System ist darauf zu achten, dass nur Erwartungen gebildet werden, die auch vom System zu erfüllen sind, da eine Enttäuschung über eine nicht erfüllte Erwartung die Akzeptanz das Systems negativ beeinträchtigt.

  Die Erfahrung aus verschiedenen Testbetrieben des Siemens METROMISER™ (→ Abschnitte 4.7.3 und 7.3.4) zeigt, dass es sehr wichtig ist, durch Information und Schulung eine positive Grundhaltung der Tf gegenüber dem System zu schaffen. Dennoch sollten gegenüber den Tf die Erwartungen an das Advice System nicht zu euphorisch formulieren werden. Es ist besser, die Tf im Rahmen des Testbetriebes mit Fakten zu überzeugen. Eine selbst erlebte positive Erfahrung schlägt sich viel positiver in der Akzeptanz nieder, als eine vom EVU vorgegebene Erwartung.

4.6.2 Akzeptanz beim Betreiber

Das EVU ist als Betreiber letztendlich die Instanz, die über die Einführung und den Betrieb eines Advice Systems entscheidet, es sei denn, eine übergeordnete Stelle, z.B. der Staat, verlangt, z.B. aus ökologischen Gründen, den Einsatz eines solchen Systems.

Für den Betreiber spielen überwiegend Wirtschaftlichkeit und Zufriedenheit der Kunden eine Rolle. Nur wenn diese Faktoren durch ein Advice System positiv beeinflusst werden, wird der Betreiber einem Advice System positiv gegenüber stehen. Heutzutage wird unter dem wirtschaftlichen Druck kein Betreiber mehr in neue technische Systeme investieren, wenn die Wirtschaftlichkeit des Systems nicht stichhaltig nachgewiesen werden kann.

Hat sich der Betreiber einmal für ein Advice System entschieden, muss er mit aller Kraft auch dafür sorgen, dass sich seine Erwartungen daran auch erfüllen. Da sich die wirtschaftlichen Erwartungen nur dann erfüllen werden, wenn das System auch von den Tf akzeptiert wird, hat er durch Information und Schulung dafür zu sorgen, dass dies in hohem Maße geschieht.

4.6.3 Akzeptanz bei Kunden des Bahnsystems

Nur die wenigsten Kunden interessieren sich für die eingesetzten technischen Systeme im Bahnbetrieb, d.h. eine direkte Akzeptanz eines Advice Systems durch die Kunden ist weder quantifizierbar noch relevant. Vielmehr ist die Akzeptanz des gesamten Bahnsystems bei den Kunden entscheidend, da diese Einfluss auf die Häufigkeit der Nutzung und somit auf den Umsatz hat. Somit ist zu klären, ob ein Advice System einen Beitrag zur Erfüllung der Erwartungen der Kunden an das Bahnsystem leisten kann.

4.7 Realisierte Advice Systeme

In den letzten Jahren wurden einige Advice Systeme zur Realisierung der energiesparsamen Fahrweise entwickelt und in Betrieb genommen. Diese kurze Übersicht berücksichtigt nur einige Systeme, die in Deutschland bis zur Serienreife entwickelt wurden.

4.7.1 ESF ICE

Die DB AG verfolgt die ESF schon seit vielen Jahren. Durch den großen Erfolg des ICE-Betriebs, der jedoch auch mit einem enormen Energieverbrauch verbunden war, wurde Mitte der neunziger Jahre beschlossen, ein Fahrerassistenzsystem zur Realisierung der ESF zu entwickeln. Hierzu wurden zunächst anhand von theoretischen Untersuchungen die Algorithmen entwickelt und mit einem ersten Prototyp die Umsetzung getestet [ISB-1995] und [EWSN-1996a]. Diese Untersuchungen wiesen unter realistischen Bedingungen eine Einsparungsrate von 5 - 10 % aus, so dass die theoretischen Grundlagen und Voraussetzungen zur Einführung einer ESF weiter untersucht und optimiert wurden [ISB-1998a], [ISB-1998b], [ISB-1998c], [Sanftleben-2000], [SFWBB-2001b] und [SFWBB-2001c]. Gleichzeitig wurde mit der Entwicklung eines alltagstauglichen Systems begonnen. Das System wurde als Softwarekomponente auf dem EBuLa-Bordrechner realisiert (→ Abschnitt 3.6.3.1). Da der planmäßige ESF-Einsatz erst seit Herbst 2003 läuft, liegen noch keine Erfahrungen vor. Im vorausgegangenen Probebetrieb konnten die Erwartungen hinsichtlich der Einsparungsrate jedoch erfüllt werden.

4.7.2 ESF LOK

Das im ICE-Verkehr erprobte System soll mittelfristig auch im lokbespannten Verkehr eingesetzt werden. Da im lokbespannten Betrieb die Zugkonfiguration nur bedingt voraussehbar ist, muss das System selbsttätig fahrdynamische Parameter ermitteln können. Hierzu wurde der Einfluss der Parameter auf die Fahrdynamik und die ESF untersucht [ISB-1998a] und [Kapitzke-2002]. Weiterhin verfügt eine Lok im Gegensatz zum ICE nicht über einen nicht angetriebenen und nicht gebremsten Radsatz, so dass das Ortungssystem angepasst werden musste. Anforderungen und Lösungsansätze eines solchen Systems wurden in [ISB-1998b] und [SFWBB-2001b] untersucht.

Für den Pilotbetrieb wurde eine Lok BR 101 der DB AG mit den erforderlichen Komponenten ausgerüstet und im normalen Betrieb eingesetzt. Ab Herbst 2003 soll ein erweiterter Probebetrieb mit fünf bis sechs Lokomotiven im normalen Betriebseinsatz aufgenommen werden [Sonntag-2003]. Erfahrungen über die Qualität der Fahrempfehlung und das erreichte Einsparpotenzial liegen noch nicht vor.

4.7.3 Siemens METROMISER™

METROMISER ist ein System der ***Siemens Transportation Systems*** zur Optimierung des Fahrverhaltens im Nahverkehr [Siemens-2000] und [Siemens-2002]. Das System besteht aus einem Bordcomputer (***On Board Unit***), der in Abhängigkeit vom momentanen Fahrtverlauf dem Tf Vorschläge zur Fahrweise gibt, und einem PC-Softwaresystem (***Time Table Optimiser***) zur Projektierung und Optimierung von Fahrplänen.

Die Software des METROMISER Systems wurde im Auftrag der Siemens Transportation Systems, Braunschweig, am ***Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb*** der ***Technischen Universität Berlin*** entwickelt.[1]

Die Grundlagen der METROMISER-Technik wurden Ende der achtziger Jahre an der ***Universität Südaustralien (UniSA)*** im Rahmen eines langfristigen, von der australischen Regierung geförderten, Forschungsprogramms geschaffen. Die Algorithmen wurden speziell für den Einsatz im Nahverkehr entwickelt (→ Abschnitt 3.3.6). Aus heutiger Sicht stellen diese nur geringe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Bordcomputers. Die UniSA-Algorithmen wurden vom australischen Unternehmen ***TEKNIS*** in ein kommerzielles Produkt umgesetzt, den ***TEKNIS METROMISER***. Mit diesem System wurden 1991 alle Züge des Regionalverkehrsbetreibers ***TransAdelaide*** ausgestattet. Während eines zweijährigen Einsatzes im dieselhydraulischen Betrieb konnten 12 - 14 % des Dieseltreibstoffs im Verhältnis zur vorher praktizierten Fahrweise eingespart werden [Milroy-2000]. Umfangreiche Untersuchungen bei anderen Betreibern in Australien, Kanada und England haben diese Ergebnisse bestätigt. Alle Untersuchungen haben auch eine Verbesserung der Pünktlichkeit bewiesen.

Der Siemens METROMISER basiert teilweise auf den von der UniSA entwickelten Algorithmen, die von der Siemens AG lizenziert und im Rahmen der Neuentwicklung an aktuelle Anforderungen angepasst und konsequent objektorientiert in C++ umgesetzt wurden.

Das System unterstützt sowohl den Tf als auch die Fahrplanersteller. Beide Gruppen erhalten vom System Empfehlungen, die es erlauben, den Energiebedarf des Zuges zu berücksichtigen, sowohl während des Betriebs als auch bei der Fahrplanerstellung. Oberste Priorität behalten in jedem Fall die Pünktlichkeit und das Einhalten der verkehrlichen und betrieblichen Anforderungen (z.B. der Anschlusssicherung).

Die Praxistauglichkeit des Siemens METROMISER wurde im Rahmen von mehreren, teilweise langfristigen Tests in normalen Betriebseinsatz erwiesen, u.a. bei einem Praxistest in Adelaide, Australien (→ Abschnitt 7.3.4).

---

[1] Für die Projektleitung und die Entwicklung des Systems war der Autor dieser Arbeit verantwortlich.

4.7.3.1 On Board Unit

Mit Hilfe der On Board Unit (OBU) wird in Abhängigkeit von der momentanen Fahrplanlage die Fahrempfehlung berechnet. Diese wird dem Tf mit Hilfe von drei Lampen angezeigt. Die Lampen haben folgende Bedeutung:

- Die grüne Lampe bedeutet „Fahren“: Sie fordert den Tf auf, im Rahmen der betrieblichen Gegebenheiten so zügig wie möglich zu fahren.
- Die blaue Lampe bedeutet „Rollen“: Sie zeigt an, dass der Zug die nächste Station voraussichtlich pünktlich erreicht, wenn jetzt mit dem Rollen begonnen wird.
- Die gelbe Lampe bedeutet „Ende der Rollphase“. Sie zeigt dem Tf an, dass er sich dem Haltepunkt so weit genähert hat, dass er in den nächsten Sekunden beginnen muss, zu bremsen. Die gelbe Lampe hat keine sicherheitstechnische Bedeutung. Der Tf ist für die Fahrt und den Bremszeitpunkt selbst verantwortlich!

In vielen Einsatzfällen kann auf die grüne und die gelbe Lampe verzicht werden. Nur die blaue Lampe ist für die Rollempfehlung wirklich wichtig. Der Wechsel einer Fahrempfehlung kann akustisch gemeldet werden.

Die angezeigten Fahrempfehlungen werden von der OBU auf Basis von gespeicherten Daten über Strecke, Fahrzeug und Fahrplan sowie auf Grundlage der aktuellen Uhrzeit, der Geschwindigkeit und der Position des Zuges ermittelt. Ein wesentliches Merkmal der OBU ist die Fähigkeit, das Rollverhalten des individuellen Fahrzeugs zu erfassen und für die Berechnungen der Rolleinsatzpunkte künftiger Fahrten abzuspeichern. Die Fahrempfehlungen werden daher schon nach kurzer Zeit nicht mehr mit „theoretischen“, sondern mit im Betrieb erfassten, fahrzeugindividuellen Parametern berechnet. Diese Funktion wurde entwickelt, um den unterschiedlichen Rolleigenschaften von Fahrzeugen gleicher Baureihe Rechnung zu tragen.

Die Hardware der OBU besteht aus einem Bordcomputer der ***IBISplus-Familie*** von ***Siemens Transit Telematic Systems (Siemens TTS)***[1]. Dieser Bordcomputer (Bild 47) wurde um anwendungsspezifische Schnittstellen (z.B. Wegimpulszähler, Türkontakt) und eine externe Advice Unit mit drei Leuchten zur Anzeige der Fahrempfehlung erweitert. Als Betriebssystem wird ***Microsoft Windows CE 3.0*** verwendet, die Software wurde unter Verwendung von ***Microsoft Embedded Visual C++ 3.0*** entwickelt.

[1] Ehemals: Häni-Prolectron AG, Bronschhofen (CH)

Bild 47: On Board Unit: Bordcomputer [Siemens-2002]

Das System wird vom Tf durch ein Terminal bedient (Bild 48). Vor Fahrtantritt ist lediglich die eindeutige Fahrtnummer bzw. eine Kombination aus Linien-, Kurs- und Zielnummer einzugeben. Während der Fahrt werden die aktuelle Station bzw. der aktuelle Abschnitt sowie die aktuelle Fahrplanlage angezeigt. Für Betreiber mit vorhandener IBIS-Ausstattung ist ein IBIS-METROMISER verfügbar. Dieser wird in die vorhandene IBIS-Ausrüstung (→ Abschnitt 3.6.3.3) eingebunden, d.h. die Daten werden automatisch von dort übernommen. In diesem Fall ist kein zusätzliches Terminal notwendig.

Bild 48: On Board Unit: Terminal [Siemens-2002]

4.7.3.2 Time Table Optimiser

Der Time Table Optimiser (TTO) ist eine unter Microsoft Windows NT/2000/XP® laufende Anwendung zur Projektierung der METROMISER-Daten und zur Optimierung von Fahrplänen hinsichtlich ihrer Energieeffizienz.

Zur Eingabe der Leistungsdaten der Züge, der Streckendaten und der Fahrpläne stehen komfortable Editoren zur Verfügung (Bild 49). Mit dem integrierten Simulationsmodul können unterschiedliche Fahrweisen berechnet und bewertet werden. Vorhandene Fahrpläne können übernommen werden. Alternativ dazu kann anhand von automatisch berechneten Fahrzeiten und von Vorgaben für Haltezeiten und Fahrzeitreserven ein komplett neuer Fahrplan erstellt werden. Zur Optimierung des Fahrplans steht ein Modul zur Verfügung, mit dem die Fahrzeitreserven energieoptimal verteilt werden können (→ Abschnitt 3.8). In der Praxis vorhandene Rahmenbedingungen, wie feste Umsteigezeiten an bestimmten Stationen, werden dabei vom Bediener gekennzeichnet und vom System berücksichtigt. Es entsteht ein neuer energieoptimaler Fahrplan, der in den vorhandenen Netzfahrplan passt.

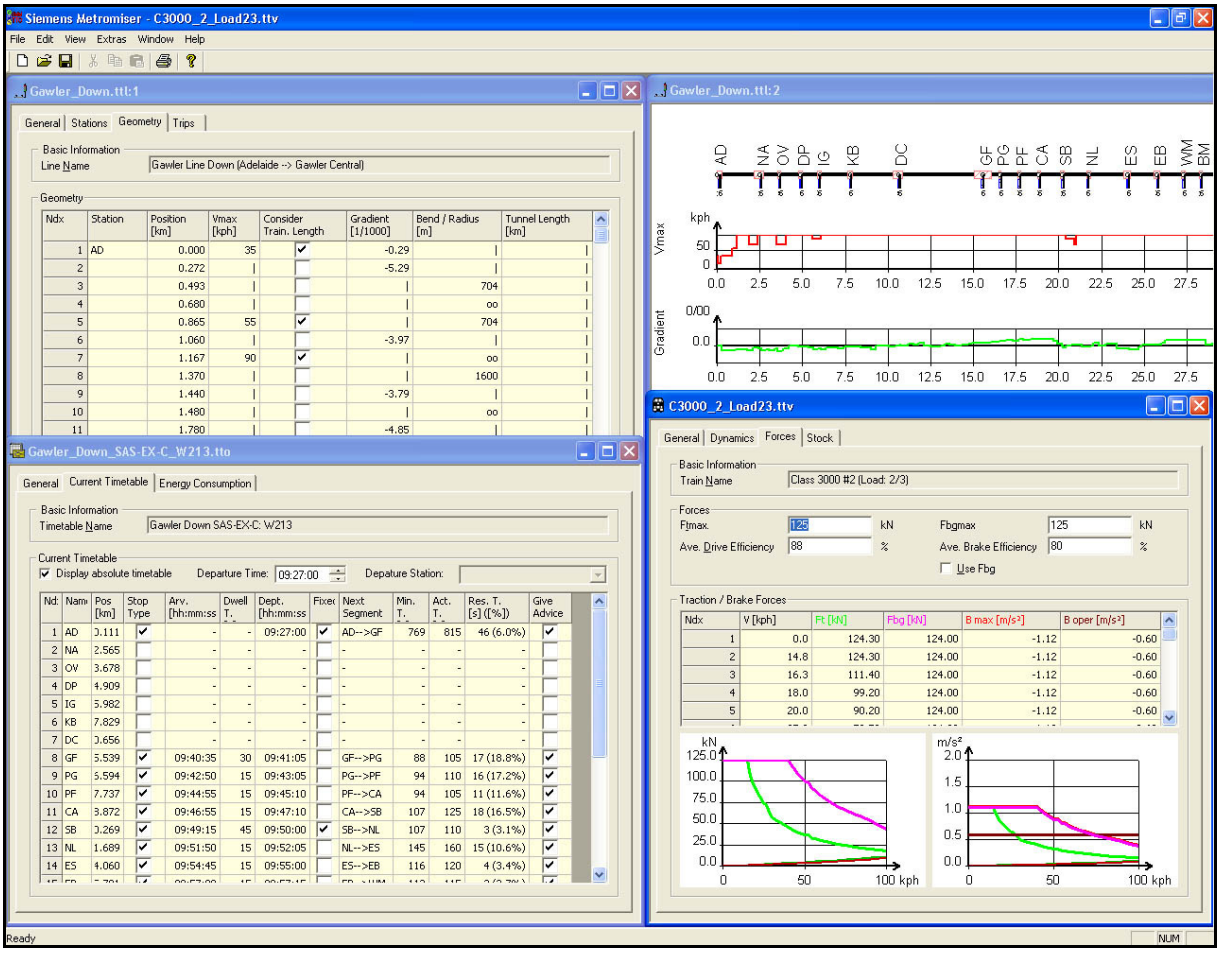


Bild 49: Time Table Optimiser: User-Interface

Sind alle Strecken, Fahrzeugtypen und Fahrpläne projektiert, können die Konfigurationsdaten der OBU auf Knopfdruck generiert werden. Alle nötigen Daten werden dabei in eine einzelne Datei gepackt und auf dem lokalen Dateisystem oder einem Netzwerkordner abgelegt.

4.7.3.3 Datenversorgung

Die vom TTO generierten OBU-Konfigurationsdaten können manuell oder automatisch auf die OBU transferiert werden. Zur manuellen Datenversorgung wird die Konfigurationsdatei auf eine Compact Flash Card in ein definiertes Verzeichnis kopiert. Diese Karte wird in die OBU eingesetzt. Beim nächsten Systemstart wird die Konfigurationsdatei automatisch entpackt und die darin enthaltenen Daten werden verarbeitet und intern gespeichert. Die manuelle Datenversorgung eignet sich nur bei einem sehr kleinen Fahrzeugbestand und für die Erprobung.

Zur automatischen Datenversorgung kann der ***Depot-Daten-Manager (DDM)*** des IBISplus-Systems von Siemens TTS verwendet werden [HPW-2001]. Der DDM besteht aus einer stationären Server-Software, einem Wireless Local Area Network (WLAN) und einer Onboard-Softwarekomponente.

Die Server-Software verwaltet Konfigurationsdaten sowie Software- und Betriebssystempakete in einer Datenbank. Die Daten können fahrzeug- oder fahrzeuggruppenspezifisch verwaltet werden. Für alle Daten kann ein Gültigkeitsbereich angegeben werden. Am Bedienplatz (DDM-Client) können Ladeaufträge definiert sowie der Ladezustand jedes Fahrzeuges überprüft werden.

Als Kommunikationsmedium zwischen Server und Bordcomputer wird ein WLAN auf allen relevanten Betriebshöfen verwendet (→ Abschnitt 3.6.2). Sobald ein Fahrzeug in den Bereich eines WLAN einfährt, wird eine Verbindung zum DDM-Server aufgebaut. Sofern für das betreffende Fahrzeug neue Daten vorliegen, werden diese auf den Bordcomputer übertragen. Wenn alle Daten vollständig und fehlerfrei übertragen wurden, werden sie von der Onboard-Software verarbeitet. Wenn dies vollständig geschehen ist, wird dies dem DDM Server mitgeteilt, so dass der Ladeauftrag als erfolgreich abgeschlossen markiert wird. Treten Übertragungsprobleme auf, z.B. weil das Fahrzeug zu schnell den Bereich des WLANs verlässt, wird die Übertragung beim nächsten Kontakt wiederholt. Innerhalb eines Betriebshofes kann der Versorgungsbereich durch die Installation von mehreren Access Points beliebig groß gestaltet werden. Wenn sich die Funkzellen überlappen, können langsam fahrende Fahrzeuge ohne Unterbrechung der logischen Verbindung die Funkzelle wechseln. Mehrere Betriebshöfe können zentral von einem DDM-Server versorgt werden, so dass es unerheblich ist, in welchem Betriebshof das Fahrzeug sich befindet.

4.8 Leitfaden zur Entwicklung eines Advice Systems

Die bisher definierten Anforderungen an Advice Systeme und die dargelegten Möglichkeiten zur Entwicklung eines Advice Systems können zu einem Leitfaden zusammengefasst werden. Er beschreibt das grundsätzliche Vorgehen zur Entwicklung eines Advice Systems, stellt jedoch nur eine von mehreren Möglichkeiten dar und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit (Bild 50). Während der Entwicklung ist die Wirtschaftlichkeit der Systementwicklung regelmäßig zu überwachen (→ Abschnitt 6.3). Davon abhängig müssen ggf. die Entwicklungsziele angepasst oder gar die Entwicklung gestoppt werden.

Voruntersuchungen: Definition des Einsatzbereiches bzw. des gewünschten Kundenprofils

- Verkehrsart: Personen-Fernverkehr, Güter-Fernverkehr, Nahverkehr
- Zugsteuerung: Tf oder ATO
- Externe Systeme: geforderte, gewünschte oder mögliche Einbindung in externe Systeme
- Optimierungsziele: Reduktion Energieverbrauch, Erhöhung Pünktlichkeit, Reduktion Verschleiß, Erhöhung Strecken- oder Knotenleistungsfähigkeit, Entlastung Tf, etc.
- Zusatzfunktionen: gefordert oder optional
- Erwartungshaltung: Definition der Erwartungen von EVU, Tf und Kunden
- Entwicklungspartner: EVU (für Testbetrieb), ggf. Systemhersteller, Hardwarelieferanten, etc.

Grundkonzept

- Einschränkung der möglichen Plattformen
- Definition der Art der Algorithmen
- Klärung bzw. Definition der technischen und betrieblichen Voraussetzungen
- Anforderungsdefinition an die Ortung
- Anforderungsdefinition an die Datenversorgung

Feinkonzept / Prototyping

- Entwicklung der Algorithmen
  - Auswahl der geeigneten Algorithmen
  - Test der Algorithmen mit einem Simulator
  - Feinkonzept für die Algorithmen
- Entscheidung für eine Hardwareplattform
- Entscheidung für eine Entwicklungsumgebung
- Festlegung der Teststrategie und der Testumgebung

Entwicklung

- Entwicklung der Testumgebung
- Entwicklung / Anpassung der Hardware
- Entwicklung der Hardware-I/Os
- Anpassung des Betriebssystems
- Entwicklung Ortungssystem
- Entwicklung / Anpassung der Datenversorgung
- Entwicklung / Anpassung der Kommunikations- und Wartungssysteme
- Entwicklung der Anwendungssoftware
- Ggf. Sicherheitsnachweis

Test (teilweise parallel zur Entwicklung)

- Komponententest im Labor und ggf. im Betrieb
- Systemerprobung im Labor
- Systemerprobung auf speziellen Testfahrten (begleitet)
- Systemerprobung im Regelbetrieb (begleitet / unbegleitet)
- Langzeiterprobung im Regelbetrieb (unbegleitet)

Bild 50: Leitfaden zur Entwicklung eines Advice Systems

5 Auswertung von Fahrten

5.1 Anforderungen an Fahrtsimulationen und aufgezeichnete Fahrten

Zur Auswertung von Zugfahrtsimulationen und aufgezeichneten Zugfahrten müssen einige Begriffe definiert werden:

- ***Fahrt***: Bei einer Fahrt kann es sich um eine Fahrtsimulation oder um die Aufzeichnung einer realen Fahrt handeln. Sie besteht aus einem oder mehreren → ***Fahrtabschnitten***, die hintereinander stattfinden. Zwischen zwei Fahrtabschnitten kann die Konfiguration des Zuges und die Besetzung bzw. die Beladung variieren. Zwischen zwei Abschnitten dürfen sich die Position und die Geschwindigkeit des Zugteiles, der in den Folgeabschnitt übergeht, nicht ändern. Der Laufweg des Zuges muss eindeutig und nachvollziehbar sein.
- ***Fahrtabschnitt***: Ein Fahrtabschnitt ist ein zusammenhängender Abschnitt einer Fahrtsimulation oder einer aufgezeichneten Fahrt. Er ist durch folgende Merkmale charakterisiert:
  - Die Hauptfahrtrichtung wird nicht geändert, ein Zurücksetzen ist jedoch möglich.
  - Innerhalb eines Fahrtabschnittes ändert sich die Fahrzeugkonfiguration und die Besetzung bzw. die Beladung nicht. Allenfalls bei Dieseltraktion ist die Verringerung der Fahrzeugmasse durch Umsetzung von Brennstoff in Energie möglich. Dies wird jedoch auf kurzen bis mittleren Distanzen wegen Geringfügigkeit im Allgemeinen vernachlässigt.
  - Bezugspunkt für die Fahrzeugbewegung ist per Definition die vordere Spitze des Zuges (Puffer). Positionsangaben, die für andere Punkte des Zuges gelten, müssen auf die Zugspitze umgerechnet werden.
  - Innerhalb eines Fahrtabschnittes wird die Position des Zuges (bzw. der Zugspitze) relativ zum Startpunkt des Fahrtabschnittes angegeben, wobei die Relativposition am Startpunkt nicht Null sein muss. Die absolute Fahrzeugposition muss zu jedem Zeitpunkt anhand der Relativposition, der Infrastrukturdaten und des Laufweges zu bestimmen sein.

5.2 Auswertung aufgezeichneter Fahrten

Zur Bewertung von Fahrweisen oder von Maßnahmen zur Optimierung von Fahrweisen müssen Fahrten mit realen Fahrzeugen auf realen Strecken ausgewertet werden. Weiterhin können aus der Auswertung von Fahrten fahrdynamische Kennwerte (z.B. Laufwiderstands-parameter) des Fahrzeuges ermittelt werden. Grundlage der Auswertung einer Fahrweise ist eine fahrdynamische Aufzeichnung von Fahrzeugbewegungen.

5.2.1 Aufzeichnungsverfahren

Zur Aufzeichnung von Fahrten gibt es die unterschiedlichsten Möglichkeiten. Grundsätzlich muss zwischen verschiedenen Arten von Aufzeichnungsgeräten unterschieden werden:

- Nutzung von standardmäßig im Fahrzeug vorhandenen Messaufnehmern und einem fest installieren Datenlogger,
- Nutzung von speziellen Messaufnehmern und einem Datenlogger, die eigens zur Aufzeichnung der Fahrt installiert wurden und
- Visuelle Aufzeichnung von Fahrzeugbewegungen mittels einer oder mehrerer Kameras innerhalb oder außerhalb des Fahrzeuges, ggf. auch per Satellit.

Bei der Auswahl der Aufzeichnungsgeräte ist neben der jeweils zu erwartenden Datenqualität (→ Abschnitt 5.3.1) auch das Medium der Aufzeichnung für die Qualität und für den Aufwand der Auswertung entscheidend. Vorzugsweise sind rein digitale Medien zu verwenden. Damit kann eine spätere manuelle Analog-Digital-Wandlung vermieden werden, die sehr aufwändig ist und zu zusätzlichen Fehlerquellen führt.

Häufig werden mehrere Aufzeichnungsgeräte gemeinsam genutzt, um alle nötigen Informationen aufzuzeichnen. Vorzugsweise sind jedoch alle Daten auf einem gemeinsamen Medium zeitsynchron aufzuzeichnen. Ist dies nicht möglich, müssen die einzelnen Daten zur Auswertung automatisch oder manuell zusammengefasst werden. Hierzu sind geeignete Synchronisationsmethoden zu verwenden. Am einfachsten ist dies durch die Aufzeichnung der Uhrzeit auf allen Auszeichnungsmedien. Hierzu müssen die verwendeten Uhren vor dem Aufzeichnungsstart mindestens auf die Sekunde genau synchronisiert werden.

Durch die Verwendung einer einheitlichen, PC-basierten Aufzeichnung in Echtzeit können schon während oder kurz nach dem Ende der Fahrt erste Auswertungen durchgeführt werden. Dadurch können Messfehler sofort erkannt und behoben werden. Weiterhin können wichtige oder interessante Betriebsbedingungen schneller identifiziert und durch weitere Messfahrten genauer beobachtet werden. Zu guter Letzt erwartet der Betreiber häufig schon am Ende der Messfahrt eine erste Aussage über die Untersuchungen.

Es wird zwischen einer kontinuierlichen Aufzeichnung in einem vorher festgelegten Intervall und einer ereignisgesteuerten Aufzeichnung unterschieden. Eine Kombination aus beiden Arten ist möglich. Während die fahrdynamischen Daten üblicherweise in einem festen Zeitraster (z.B. 1 s) aufgezeichnet werden, wird die Ankunft bzw. Abfahrt an einer Station meist ereignisgesteuert protokolliert.

Für jede Messgröße muss die typische Latenzzeit zwischen dem wahren Auftreten des Wertes bzw. des Ereignisses und der Aufzeichnung bekannt sein bzw. vorher bestimmt werden. Ist diese Zeit für die Auswertung relevant, muss sie berücksichtigt werden.

Neben der Aufzeichnung von direkt gemessenen Größen (z.B. Zeit, Position) werden häufig auch Größen aufgezeichnet, die durch Differenziation oder Integration aus anderen Größen ermittelt werden (z.B. Geschwindigkeit, Beschleunigung). Für jede Größe muss die Art der Bestimmung bekannt sein. Vorzugsweise sind direkt gemessene Größen zu verwenden.

5.2.2 Aufzuzeichnende Größen

Zur Bewertung von Fahrweisen oder Advice Systemen trägt die Aufzeichnung einer Vielzahl von Daten aus unterschiedlichen Kategorien bei (Tabelle 17). Welche dieser Größen wirklich aufgezeichnet und welche Genauigkeitsanforderungen dabei gestellt werden müssen, hängt vom Einsatzgebiet und vom Zweck der Bewertung ab.

Kategorie/Größe	Beschreibung/ Zweck der Aufzeichnung	Typische Abtastrate [Bereich]
Fahrdynamische Größen: • Zeit • Position auf dem Netz[1] • Geschwindigkeit • (Beschleunigung)[2]	Aufzeichnung des exakten Fahrtverlaufs	1 s [0,1 .. 10,0 s]
GPS-Daten: • Länge • Breite • Höhe • GPS-Empfangsqualität	Geografische Information zum momentanen Ort	1 s [1 .. 60 s] oder ereignisgesteuert z.B. am Stationshalt
Antriebs- und Bremsstatus: • Fahr- und Bremsstufe • Antriebsleistung • Leistung der generatorischen Bremse • Zug- bzw. Bremskraft	• Aufzeichnung des Verhaltens des Tf • Bestimmung des Energie-verbrauchs • Bestimmung der Leistungs-daten von Antrieb und Bremse	1 s [0,1 .. 10,0 s] oder bei Änderung des Wertes
Kraftstoffverbrauch: • Menge des verbrauchten Kraftstoffes; ggf. für jeden Verbraucher getrennt	• Bewertung eines Advice Systems zur Realisierung der energiesparsamen Fahrwiese für Dieseltraktion	10 s [1 .. 600 s] oder ereignisgesteuert z.B. bei Abfahrt und Ankunft
Betriebliche Daten: • Ankunft, Abfahrt und Durchfahrt an Betriebsstellen • Haltezeiten an Stationen oder Blocksignalen	• Bewertung der Pünktlichkeit • Aufzeichnung typischer betrieblicher Störungen	ereignisgesteuert
Verkehrliche Daten: • Fahrgastwechsel • Beladung	• Aufzeichnung typischer verkehrlicher Daten • Verbesserung der fahrdyna-mischen Parameter durch Messung der Beladung	ereignisgesteuert
Verhalten des Advice Systems: • Fahrempfehlung • Reaktion des Tf auf die Fahrempfehlung	• Bewertung des Advice Systems • Bestimmung der Akzeptanz	ereignisgesteuert bei Änderung des Zustandes

Tabelle 17: Aufzuzeichnende Größen

[1] Absolute Position auf dem Netz (→ Abschnitt 3.5.1.1) bzw. Relativposition zu einer festgelegten absoluten Referenzposition.

[2] Das Aufzeichnen der Beschleunigung ist nur dann sinnvoll, wenn sie durch einen eigenen Sensor gemessen wird. Wenn sie dagegen durch Differenziation der anderen fahrdynamischen Größen ermittelt wird, ist die Aufzeichnung redundant und deshalb nicht nötig.

5.3 Fahrdynamische Auswertung

Sowohl für die internen Algorithmen eines Advice Systems als auch für die spätere Auswertung sind die Zusammenhänge der fahrdynamischen Größen von großer Bedeutung. Die wesentlichen fahrdynamischen Größen sind die Zeit, die Position und die Geschwindigkeit. Häufig ist auch die Beschleunigung und gelegentlich der Ruck von Bedeutung. Die kinematischen Grundlagen werden im Anhang A.2 zusammengefasst.

Basis der fahrdynamischen Auswertung ist normalerweise die gleichmäßig beschleunigte Bewegung (→ Anhang A.2.2.2). Diese ist durch eine abschnittsweise konstante Beschleunigung bzw. Verzögerung gekennzeichnet, der Ruck wird innerhalb dieses (kleinen) Abschnitts gleich Null angenommen.

Aufgezeichnete Geschwindigkeitsverläufe enthalten eine Menge von Datensätzen, die mindestens zwei der drei grundlegenden fahrdynamischen Daten enthalten:

- Zeit
- Position
- Geschwindigkeit

Zur Auswertung sollten nur die Daten benutzt werden, die direkt gemessen werden und nicht aus den anderen Daten abgeleitet werden können. Wenn alle drei Daten zur Verfügung stehen, die Geschwindigkeit jedoch aus der Differenziation der Position nach der Zeit ermittelt wurde, sollte die Auswertung auf der Zeit und der Position basieren.

5.3.1 Messfehler und Güte der fahrdynamischen Aufzeichnung

Die Güte der fahrdynamischen Aufzeichnung kann in Abhängigkeit vom verwendeten Aufzeichnungsverfahren, der Messungenauigkeit, der Auflösung und der Abtastrate bewertet werden.

Die folgenden Betrachtungen beruhen auf der Annahme, dass nur Zeit und Weg gemessen werden und dass Geschwindigkeit und Beschleunigung daraus abgeleitet werden. Für die Zeitmessung wird eine Echtzeituhr mit einer nominellen Einteilung von einer Millisekunde verwendet. Die Wegmessung basiert zunächst ausschließlich auf einem Wegimpulszähler (Odometer), mit dem die Radumdrehungen gemessen werden. Aus der Anzahl der gezählten Impulse und einem Kalibrierungsfaktor kann der Weg berechnet werden.

Bei der Bestimmung der fahrdynamischen Größen treten Messfehler unterschiedlicher Herkunft auf (Tabelle 18).

Anhand eines auf MS Windows® basierenden Advice Systems wird im folgenden Abschnitt der durch die Digitalisierung hervorgerufene maximale Messfehler bei der Bestimmung der fahrdynamischen Daten festgestellt. Die berücksichtigten Systemeigenschaften entsprechen dem System Siemens METROMISER (→ Abschnitt 4.7.3), sind jedoch typisch für PC-basierte Advice Systeme.

Fehlertyp	Beeinflussung	Bemerkung
Kalibrierungsfehler des Wegimpulszählers	Weg (Geschwindigkeit, Beschleunigung)	Der Kalibrierungsfaktor ist vom Radumfang abhängig, der sich durch Abnutzung ständig ändert. Er muss deshalb regelmäßig automatisch oder manuell angepasst werden. Bei der Auswertung aufgezeichneter Fahrten spielt der Kalibrierungsfehler keine Rolle, da die Werte anhand des bekannten Abstandes zwischen Start- und Zielpunkt skaliert werden können.
Schlupf	Weg (Geschwindigkeit, Beschleunigung)	Örtlicher starker Schlupf kann in der Online-Berechnung durch das Überschreiten von Grenzwerten erkannt, nicht aber bestimmt werden. Er kann allenfalls statistisch durch eine Anpassung des Kalibrierungsfaktors berücksichtigt werden. Durch die Wegmessung an nicht angetriebenen und nicht gebremsten Radsätzen kann der Einfluss des Schlupfes minimiert werden.
Abtastrate	Zeit, Weg (Geschwindigkeit, Beschleunigung)	Je häufiger der Wegimpulszähler abgefragt wird, desto schneller kann die momentane Position und die Geschwindigkeit abgefragt werden.
Auflösung, Digitalisierungsfehler	Zeit, Weg (Geschwindigkeit, Beschleunigung)	Durch die Auflösung des Wegimpulszählers (Anzahl der Impulse pro Meter) wird nicht nur die Genauigkeit der Wegbestimmung festgelegt, sondern im Zusammenhang mit der Abtastrate und dem Digitalisierungsfehler noch viel stärker die Genauigkeit der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsberechnung. Ebenso sind die Auflösung und der Zeitversatz bei der Zeitmessung von Bedeutung.

Tabelle 18: Messfehler bei der Bestimmung der fahrdynamischen Größen

5.3.1.1 Wegimpulszähler

Die Wegimpulse werden von einem Hardware-Counter (16-Bit) in Echtzeit aufgenommen. Da der Counter nicht interruptfähig[1] ist, muss er durch Polling[2] ausgelesen werden.

Die Auflösung des Wegimpulszählers ist variabel und bewegt sich normalerweise im Bereich von 4 bis 100 Impulsen pro Radumdrehung. Der zugehörige Kalibrierfaktor des Wegimpulszählers, der die Anzahl der Impulse pro Meter angibt, liegt also im Bereich von:

$$F_{Odo} = 1 - 40 \frac{\text{Impulse}}{\text{m}} \qquad \text{Gl. 8}$$

[1] „Interrupt“: englisch für unterbrechen. Eine Komponente ist interruptfähig, wenn sie in der Lage ist, beim Eintreffen eines Ereignisses den aktiven Prozess zu unterbrechen und das Ereignis sofort zu behandeln.

[2] „Polling“: englisch für Wählen, Abfragen. Im Zusammenhang mit Hardware-Inputs bedeutet „Polling“, dass das System regelmäßig den Zustand des Hardware-Inputs abfragt, dieser jedoch dem System eine Änderung seines Zustandes nicht selbst mitteilen kann.

Da es sich um einen Hardware-Counter handelt, ist die Messgenauigkeit ± 1 Impuls. Impulse, die aufgrund von technischen Fehlern (z.B. durch abgelöste Reflektoren etc.) verloren gehen, werden hier nicht berücksichtigt. Daraus ergibt sich der maximale Wegmessfehler:

$$s_{f,odo,\max} = \frac{\pm \text{Impulsfehler}}{F_{odo}} = \pm \frac{1}{F_{odo}} \qquad \text{Gl. 9}$$

Zur reinen Wegmessung würde dementsprechend eine sehr geringe Auflösung ausreichen (Tabelle 19). Sollen jedoch auch Geschwindigkeit oder Beschleunigung ermittelt werden, sind höhere Anforderungen an die Abtastrate zu stellen.

Kalibrierungsfaktor [Impulse / m]	Max. Wegmessfehler [m]
1	± 1,0
5	± 0,2
10	± 0,1
20	± 0,05
30	± 0,033
40	± 0,025

Tabelle 19: Wegmessfehler in Abhängigkeit vom Kalibrierungsfaktor

5.3.1.2 Zeitsignal

Zur Bestimmung von Geschwindigkeit und Beschleunigung muss der Weg ein- oder zweifach nach der Zeit abgeleitet werden. Weiterhin ist die Auflösung des Timers von Bedeutung. Obwohl die nominelle Auflösung des Windows-Timers 1 ms ist, werden in Abhängigkeit vom Betriebssystem deutlich schlechtere Werte erreicht (Tabelle 20). Im Rahmen von Tests auf unterschiedlichen Plattformen konnten diese Werte bestätigt werden. Lediglich in weniger als 10 % der Abfragen wurde eine zusätzliche Ungenauigkeit von +1 ms festgestellt.

Hardware / Betriebssystem	Auflösung des Timers (ca.)
PC x86: Windows 95, 98, ME	55 ms
PC x86: Windows NT 3.1	16 ms
PC x86: Windows NT 3.5, NT 4.0, 2000, XP	10 ms
IBISplus: Windows CE 2.11, CE 3.0	1 ms (gemessen)

Tabelle 20: Auflösung des Windows-Systemtimers

Die Werte basieren auf einem Polling-Verfahren. Der Windows System-Timer, mit dem interruptgesteuert eine bestimmte Aktion durchgeführt werden kann, ist generell auf ca. 55 ms bzw. ein Vielfaches davon begrenzt. Höhere Auflösungen bzw. interruptgesteuerte Timer sind nur mit spezieller Hardware oder unter Verwendung der sog. Multimedia-Timer realisierbar, die jedoch nicht immer zur Verfügung stehen.

5.3.1.3 Geschwindigkeitsbestimmung

Bei der Bestimmung der Momentan- oder Durchschnittsgeschwindigkeit müssen die Messfehler der Wegmessung (s_f) und der Zeitmessung (t_f) berücksichtigt werden:

$$v_{mess} = \frac{\Delta s_{mess}}{\Delta t_{mess}} = \frac{\left(s_2 \pm s_f\right) - \left(s_1 \pm s_f\right)}{\left(t_2 \pm t_f\right) - \left(t_1 \pm t_f\right)} \qquad \text{Gl. 10}$$

Für den maximalen Geschwindigkeitsmessfehler $v_{f,max}$ gilt:

$$v_{f,\max} = v_{wahr} - v_{mess,\min} = \frac{\Delta s}{\Delta t} - \frac{\left(s_2 - s_f\right) - \left(s_1 + s_f\right)}{\left(t_2 + t_f\right) - \left(t_1 - t_f\right)} \qquad \text{Gl. 11}$$

$$v_{f,\max} = 2 \cdot \frac{\Delta s \cdot t_f + \Delta t \cdot s_f}{\Delta t^2 + 2 \cdot \Delta t \cdot t_f} \qquad \text{Gl. 12}$$

Je größer der Messzeitraum Δt zur Bestimmung der Durchschnittsgeschwindigkeit ist, desto kleiner wird der Geschwindigkeitsmessfehler. Zur Bestimmung der Momentangeschwindigkeit wird jedoch ein kleiner Messzeitraum gefordert.

5.3.1.4 Beschleunigungsbestimmung

Der maximale Digitalisierungsfehler bei der Bestimmung der Beschleunigung wird durch die Messfehler der Geschwindigkeitsmessung (v_f) und der Zeitmessung (t_f) bestimmt:

$$a_{mess} = \frac{\Delta v_{mess}}{\Delta t_{mess}} = \frac{\left(v_2 \pm v_f\right) - \left(v_1 \pm v_f\right)}{\left(t_2 \pm t_f\right) - \left(t_1 \pm t_f\right)} \qquad \text{Gl. 13}$$

Für den maximalen Beschleunigungsmessfehler $a_{f,max}$ gilt:

$$a_{f,\max} = a_{wahr} - a_{mess,\min} = \frac{\Delta v}{\Delta t} - \frac{\left(v_2 - v_f\right) - \left(v_1 + v_f\right)}{\left(t_2 + t_f\right) - \left(t_1 - t_f\right)} \qquad \text{Gl. 14}$$

$$a_{f,\max} = 2 \cdot \frac{\Delta v \cdot t_f + \Delta t \cdot v_f}{\Delta t^2 + 2 \cdot \Delta t \cdot t_f} \qquad \text{Gl. 15}$$

Wird die Geschwindigkeit aus der Weg- und Zeitmessung bestimmt, ist der maximale Messfehler aus Gl. 12 zu verwenden.

5.3.1.5 Onlinebestimmung von Momentangeschwindigkeit und Momentanbeschleunigung

Im Advice System müssen Momentangeschwindigkeit und -beschleunigung zur Berechnung der Fahrempfehlung in Echtzeit ermittelt werden. Da diese Größen normalerweise nicht direkt gemessen werden, müssen sie aus dem zeitlichen Verlauf des Wegimpulszählers ermittelt werden. Um den Fehler möglichst gering zu halten, sollte einerseits der Differenzialquotient möglichst über einen großen Zeitraum bestimmt werden, andererseits aber auch zeitnah ermittelt werden.

Werden für die Ermittlung der Geschwindigkeit nur die beiden letzten gemessenen Wertepaare aus Zeit und Position verwendet, zeigt sich eine deutliche Abweichung vom exakten Wert. Wird analog dazu die Beschleunigung ermittelt, ergeben sich nicht zu akzeptierende Abweichungen. Anhand eines Beispiels wird dies gezeigt (Bild 51).

Beispiel: Exakte Simulation im Zeitschrittverfahren

v_{start}	= 30 m/s	Anfangsgeschwindigkeit
a	= -1,0 m/s²	Beschleunigung
Δt	= 1 ms	Zeitschritt
F_{Odo}	= 20 Impulse/m	Kalibrierungsfaktor Odometer
$t_{f,Messung}$	= 1 ms	Genauigkeit Zeitermittlung
t_{Abtast}	= 100 ms	Nominelle Abtastrate
t_{Timer}	= 55,2 ms	Auflösung Windows-Timer

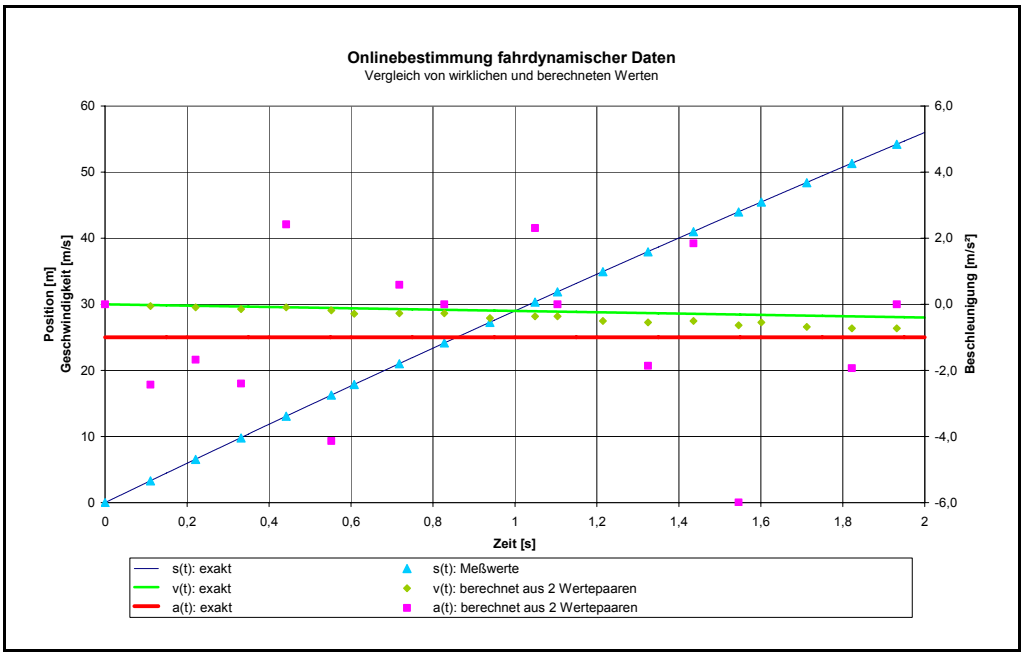


Bild 51: Onlinebestimmung fahrdynamischer Daten

Eine Lösungsmöglichkeit zur zuverlässigeren Bestimmung der Momentangrößen ist die Verwendung eines Ringpuffers, in dem über einen Zeitraum von einigen Sekunden Wertepaare aus dem Stand des Wegimpulszählers und dem Zeitpunkt der Erfassung des Zählerstandes gespeichert werden. Die aufgezeichneten Wertepaare werden unter Berücksichtigung von fahrdynamischen Randbedingungen geglättet. Im Anschluss daran werden Geschwindigkeit und Beschleunigung durch Inter- bzw. Extrapolation der geglätteten Fahrschaulinie ermittelt.

5.3.2 Aufarbeitung von aufgezeichneten Geschwindigkeitsverläufen

Externe Aufzeichnungsgeräte zeichnen Position und Geschwindigkeit häufig nur ungenau auf. So wird die Geschwindigkeit häufig ohne Nachkommastellen angegeben. Sollen die aufgezeichneten Daten als Grundlage für fahrdynamische Untersuchungen genutzt werden, müssen die Rohdaten erst um ggf. fehlende Daten ergänzt und geglättet werden.

5.3.2.1 Berechnung nicht aufgezeichneter Größen

Fehlende fahrdynamische Größen können beim Importieren der Aufzeichnung teilweise bestimmt werden. Sie werden anhand der anderen fahrdynamischen Größen und dem bisherigen Fahrtverlauf berechnet. Je nach Qualität der Rohdaten sind im Anschluss daran eine Skalierung und eine Glättung des Fahrtverlaufs nötig.

Grundlage der Berechnung nicht aufgezeichneter Größen ist die gleichmäßig beschleunigte Bewegung (→ Anhang A.2.2.2). Teilweise werden jedoch die Gleichungen der gleichförmigen Bewegung angesetzt, wobei dann mit der mittleren Geschwindigkeit gerechnet wird.

Bestimmung der Position anhand von Zeit und Geschwindigkeit:

$$s_i = s_{i-1} + \frac{v_i + v_{i-1}}{2} \cdot \left(t_i - t_{i-1}\right) \qquad \text{Gl. 16}$$

Bestimmung der Zeit anhand von Position und Geschwindigkeit:

$$t_i = t_{i-1} + \frac{2 \cdot \left(s_i - s_{i-1}\right)}{v_i + v_{i-1}} \qquad \text{Gl. 17}$$

Wenn die mittlere Geschwindigkeit Null ist, kann die Zeit nicht bestimmt werden.

Bestimmung der Geschwindigkeit anhand von Position und Zeit:

$$v_i = 2 \cdot \frac{\left(s_i - s_{i-1}\right)}{t_i - t_{i-1}} - v_{i-1} \qquad \text{Gl. 18}$$

Wenn die Zeitdifferenz Null ist, ist $v_i = v_{i-1}$.

Die Beschleunigung kann sowohl anhand von Position und Geschwindigkeit als auch anhand von Zeit und Geschwindigkeit ermittelt werden. Wenn alle drei fahrdynamischen Größen gemessen zur Verfügung stehen, kann zur Erhöhung der Qualität der Durchschnittswert bestimmt werden.

Bestimmung der Beschleunigung anhand von Position und Geschwindigkeit:

$$a_i = \frac{v_i^2 - v_{i-1}^2}{2 \cdot \left(s_i - s_{i-1}\right)} \qquad \text{Gl. 19}$$

Bestimmung der Beschleunigung anhand von Zeit und Geschwindigkeit:

$$a_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \qquad \text{Gl. 20}$$

5.3.2.2 Glättung von Geschwindigkeitsverläufen

Zur Glättung des Geschwindigkeitsverlaufs wird die Geschwindigkeit über einen definierten Bereich gemittelt. Der Bereich kann fest vorgegeben oder automatisch anhand des Geschwindigkeitsverlaufs ermittelt werden. Durch eine intelligente automatische Bereichsermittlung können charakteristische Geschwindigkeitsänderungen von solchen Änderungen unterschieden werden, die durch Digitalisierung oder Rundung hervorgerufen wurden. Datensätze, bei denen die Geschwindigkeit annähernd Null ist, sollten dabei nicht berücksichtigt werden.

Bei der automatischen Bereichsermittlung werden zunächst Bereiche gesucht, bei denen die Geschwindigkeit durch die Digitalisierung konstant ist. Für jeden Datensatz werden die Hälfte seines umschließenden Bereiches und die Hälfte des am nahesten gelegenen vorherigen oder nachfolgenden Bereiches berücksichtigt (Bild 52).

Die Glättung basiert auf der mittleren Beschleunigung innerhalb des jeweiligen Glättungsbereiches. Diese wird aus der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Bereichsanfang und Bereichsende sowie der Zeitdifferenz bzw. der Positionsdifferenz ermittelt. Ausgehend von der mittleren Beschleunigung wird die gemittelte Geschwindigkeit berechnet.

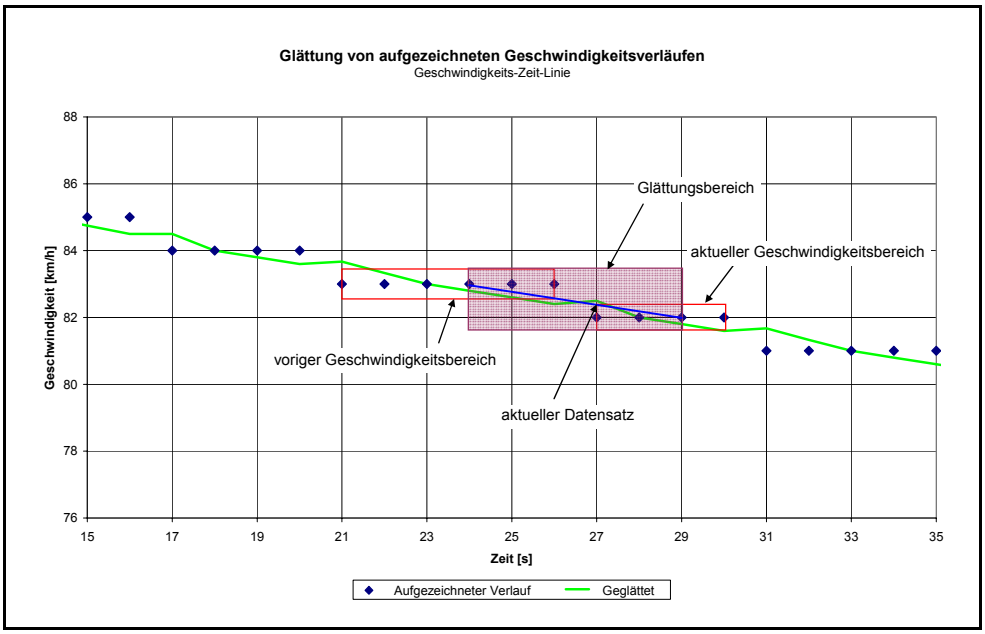


Bild 52: Glättung von aufgezeichneten Geschwindigkeitsverläufen

5.3.3 Bestimmung fahrdynamischer Daten aus aufgezeichneten Fahrten

Anhand von Fahrtaufzeichnungen können fahrdynamische Daten eines Zuges ermittelt werden. Die Onlinebestimmung aller Daten wurde ansatzweise untersucht ([ISB-1998a] und [Kapitzke-2002]). Ein allgemeingültiges Verfahren, mit dem schnell und einfach alle fahrdynamischen Daten in hoher Qualität bestimmt werden können, ist sehr komplex und noch nicht ausreichend erforscht.

Systeme zur Ermittlung der Zug- und Bremskraft mittels Online-Fahrwiderstandsmessung wurden erfolgreich erprobt, sind für einen Serieneinsatz auf allen Fahrzeugen allerdings zu aufwändig [Rick-2003].

Sind Zugmasse, Zuglänge und alle relevanten Streckendaten bekannt, können jedoch aus der Aufzeichnung von Messfahrten die Laufwiderstandsparameter mit hinreichender Genauigkeit ermittelt werden.

Die Laufwiderstandskraft wird meist mit der Davis-Formel berechnet (→ Anhang A.1.2.6):

$$W_l = A + B \cdot v + C \cdot (v + dv)^2 \qquad \text{Gl. 21}$$

Die Koeffizienten *A*, *B* und *C* sind fahrzeugspezifisch und müssen ermittelt werden. Mit dem Koeffizienten *dv* wird der Windeinfluss berücksichtigt. Die Windkomponente, die der Fahrzeugbewegung entgegenwirkt, wird der Fahrgeschwindigkeit zugeschlagen. Durch den geschwindigkeitsquadratischen Einfluss und durch den von der Windrichtung unabhängigen Einfluss aus Reibung am Fahrzeug sowie aus der Verwirbelung ist der Einfluss durch Wind im Durchschnitt immer negativ. Bei Simulationen wird deshalb meist ein Geschwindigkeitszuwachs von *dv* = 15 km/h angenommen.

Bei der Auswertung von Messfahrten sollte der wahre Windeinfluss berücksichtigt werden, sofern er bekannt ist. Während der Einfluss von Gegen- und Rückenwind anhand der gemessenen Windgeschwindigkeit berücksichtigt werden kann, ist der genaue Einfluss von Seitenwind nur sehr schwer zu erfassen. Weiterhin wäre zu berücksichtigen, dass der Wind örtlich und zeitlich schwankt. Daraus folgt, dass die Messfahrten möglichst bei Windstille durchgeführt werden sollten. Ist dies nicht möglich, muss der Einfluss abgeschätzt werden. Bei starkem Gegen- oder Rückenwind sind Fahrten in beiden Richtungen durchzuführen.

Nachdem eine oder mehrere Messfahrten mit Ausrollvorgängen im relevanten Geschwindigkeitsbereich durchgeführt wurden, können die Koeffizienten *A*, *B* und *C* bestimmt werden. Die theoretischen Grundlagen hierfür kommen aus der Fahrdynamik (Bild 53). In der Praxis ergeben sich jedoch einige Probleme, die häufig unterschätzt werden:

- Alle anderen fahrdynamisch relevanten Daten, speziell Fahrzeugmasse und -länge sowie Streckenneigung und -krümmung müssen bekannt sein.
- Die exakte Position des Rollbereiches auf der Strecke muss bekannt sein. Die Streckenwiderstände haben einen großen Einfluss auf das Rollverhalten. Auf Strecken mit häufigen Neigungswechseln kann schon eine Abweichung von wenigen Metern zu großen Abweichungen bei der Bestimmung der Koeffizienten führen.
- Die Rollverzögerung auf ebener Strecke liegt häufig unterhalb von 0,1 m/s², d.h. in einem Zeitraum von 10 s (ca. 220 m bei 80 km/h) ändert sich die Geschwindigkeit nur um 3,6 km/h. Um diese Rollverzögerung mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen, müssen Positions- und Geschwindigkeitsmessung sehr genau sein.
- Die Koeffizienten können nur dann hinreichend genau bestimmt werden, wenn eine große Anzahl von Geschwindigkeits-Laufwiderstands-Wertepaaren in einem großen Geschwindigkeitsbereich vorliegt. Die Annahme, mit nur drei Wertepaaren die Koeffizienten bestimmen zu können, ist zwar mathematisch richtig, in der Praxis zeigt sich jedoch, dass eine sehr viel höhere Anzahl nötig ist. Dies liegt darin begründet, dass es sich um gemessene Werte handelt, die aufgrund von Mess- und Digitalisierungs-

fehlern ungenau sind. Mit einem Least-Square-Fit werden die Koeffizienten so bestimmt, dass die quadratische Abweichung an den Stützstellen minimal ist. Bei einer zu geringen Anzahl von Stützstellen im gesamten Geschwindigkeitsbereich können sich Kurven ergeben, bei denen dies zwar zutrifft, die jedoch nicht dem charakteristischen Verlauf entsprechen.

Definitionen:	
DynRecord	Datensatz mit Zeit, Position und Geschwindigkeit
DriveRecording	Feld mit allen *DynRecords* einer Fahrt
CoastArea	Bereich eines *DriveRecording*, in dem gerollt wird
NormalResistCourse	Laufwiderstandsverlauf: Feld mit Wertepaaren aus Geschwindigkeit und Laufwiderstandskraft
v_{avg}	Durchschnittliche Geschwindigkeit [m/s]
a_{avg}	Durchschnittliche Beschleunigung [m/s²]
F_h	Hangabtriebskraft (+ Gefälle; - Steigung) [kN]
W_k	Kurvenwiderstandskraft [kN]
W_l	Laufwiderstandskraft [kN]
m_{ges}	Gesamtmasse inkl. rotierender Massen [t]
A, *B*, *C*	Koeffizienten der Davis-Formel

DriveRecording analysieren

foreach *CoastArea* in *DriveRecording*

- Bereichsgrenzen in *CoastArea* in beide Richtungen um 2-3 Datensätze verkürzen (zur Vermeidung von Übergansstadien mit anderen Fahrzuständen)
- foreach *DynRecord* in verkürztem *CoastArea*
  - Durchschnittliche Beschleunigung (a_{avg}) und durchschnittliche Geschwindigkeit (v_{avg}) im Bereich des Datensatzes ermitteln
  - Wirksame Hangabtriebskraft (F_h) und Kurvenwiderstandskraft (W_k) an der aktuellen Position aus den Streckendaten bestimmen
  - Laufwiderstandskraft (W_l) berechnen: $W_l = -m_{ges} \cdot a_{avg} + F_h - W_k$
  - Hinzufügen des Wertepaares aus v_{avg} und W_l in *NormalResistCourse*

Koeffizienten *A*,*B* und *C* mit einem Least-Square-Fit aus *NormalResistCourse* bestimmen

Bild 53: Algorithmus zur Bestimmung der Koeffizienten der Davis-Formel

Die geschilderten Probleme führen zu hohen Anforderungen an die Auslaufmessungen und an die Auswertung:

- Eine genaue Messtechnik zur Aufzeichnung von Zeit, Position und Geschwindigkeit wird gefordert. Die Werte sollten mindestens im Sekundenraster aufgezeichnet werden.
- Die Bestimmung der Beschleunigung kann durch die Verwendung von in Längsrichtung angeordneten Beschleunigungsaufnehmern vereinfacht werden. Diese müssen jedoch recht genau sein und müssen dynamische Beschleunigungen ausfiltern.

- Die Messfahrten sollten mehrmals und in beiden Fahrtrichtungen durchgeführt werden. Es sollte möglichst ein ebenes und gerades Gleis verwendet werden. Messungen bei starkem Wind müssen vermieden werden.
- Der Rollbereich sollte möglichst metergenau protokolliert werden, sofern innerhalb des Bereiches Neigungs- oder Krümmungswechsel liegen. Während der Auswertung sollte die manuelle oder automatische Positionskorrektur unterstützt werden.

Mit der Analyse-Funktion des Siemens METROMISER Time Table Optimisers (→ Abschnitt 4.7.3.2) können die Koeffizienten der Davis-Formel aus aufgezeichneten Fahrten bestimmt werden (Bild 54). Die Messfahrten können auf beliebigen Streckenabschnitten durchgeführt werden, es müssen lediglich alle Streckenparameter und der genaue Rollbereich bekannt sein. Für jede einzelne Messfahrt kann der Bereich manuell oder automatisch verschoben werden. Bei der automatischen Verschiebung wird der Offset innerhalb eines definierten Bereiches so bestimmt, dass die Summe der quadratischen Abweichungen an den Stützstellen minimal wird. Durch die grafische Darstellung des Kurvenverlaufs und der Wertepaare kann der Benutzer die Koeffizienten auch interaktiv optimieren.

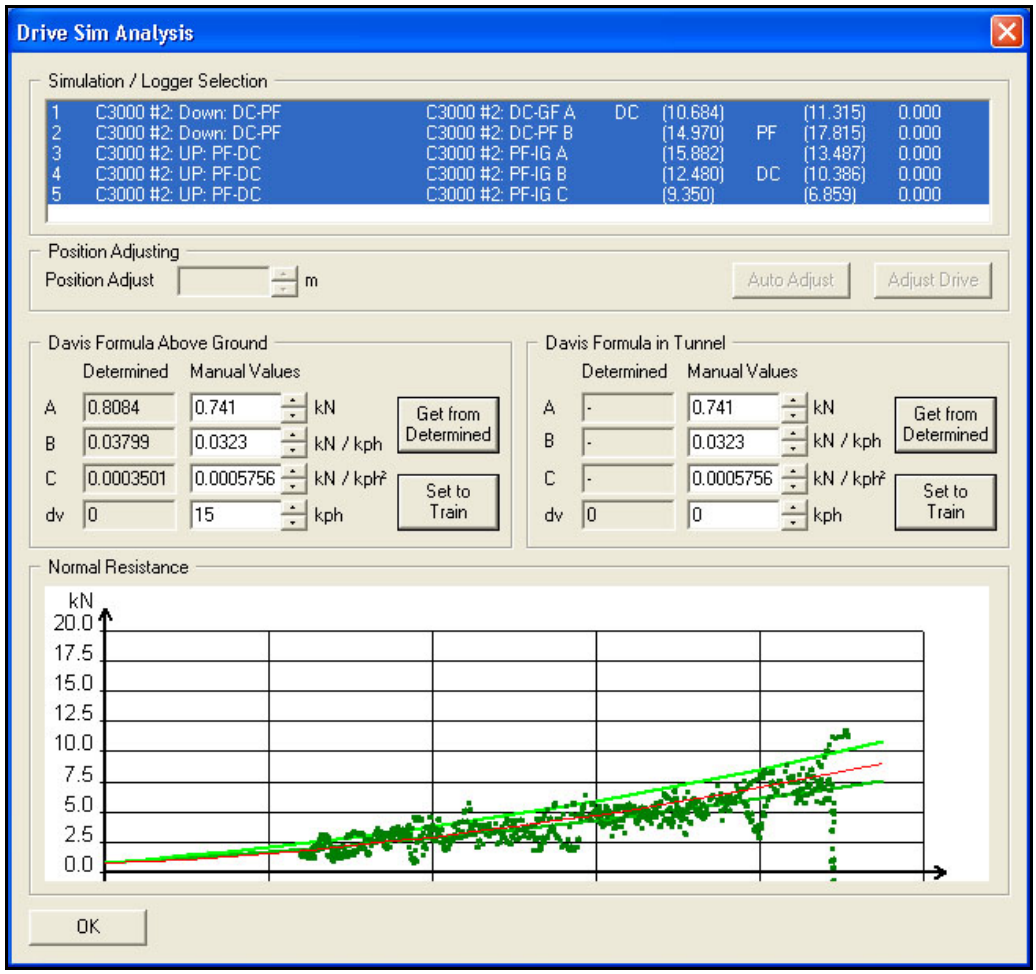


Bild 54: Analyse-Funktion zur Bestimmung der Koeffizienten der Davis-Formel

5.4 Bewertung von Fahrten

Vor der Bewertung von Fahrten müssen zunächst die Bewertungsrichtlinien sowie die Anforderungen an Art und Qualität der Fahrtaufzeichnung definiert werden. Sind mehrere Eigenschaften zu bewerten, muss ein Bewertungsschema festgelegt werden, bei dem die unterschiedlichen Ziele (z.B. Pünktlichkeit, Energieverbrauch, Streckendurchsatz etc.) mit Prioritäten zu belegen sind. Dies kann z.B. durch ein Punkteschema geschehen, wobei besonders wichtige Kriterien auch als K.O.-Kriterien fungieren können, d.h. wenn dort nicht eine Mindestqualität erreicht wird, ist die gesamte Fahrweise negativ zu bewerten. Das zur Anwendung kommende Punkteschema ist projektspezifisch und muss klar definiert sein.

Im Rahmen der „Untersuchungen zur Fahrzeugortung für energiesparsame Fahrweisen“ [SFWBB-2001b] wurde ein Schema zur Bewertung des Einflusses von Ortungskomponenten auf die Fahrweise erstellt. Dieses Schema ist in abgewandelter Form für die Bewertung von Fahrweisen verwendbar. Es berücksichtigt die Ziele Energieverbrauch und Pünktlichkeit.

Zur Bewertung des gemessenen Energieverbrauchs einer einzelnen Fahrt muss dieser mit dem Verbrauch einer Referenzfahrweise unter den gleichen äußeren Bedingungen verglichen werden. Als Vergleichsfahrweise können drei Arten von Fahrweisen verwendet werden:

- Straffe Fahrweise (theoretisch ermittelt):
  Die straffe Fahrweise lässt sich leicht und eindeutig ermitteln, berücksichtigt jedoch normalerweise keine betrieblichen Einflüsse.

- Praktizierte Fahrweise (Gemessen als Durchschnittswert):
  Die praktizierte Fahrweise ist nur aufwändig zu ermitteln und nicht eindeutig, d.h. es handelt sich um einen Durchschnitt aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Fahrten. Typische betriebliche Einflüsse werden berücksichtigt, jedoch ist es sehr aufwändig, den Zusammenhang zwischen den einzelnen Einflüssen und den jeweiligen Auswirkungen auf die Fahrt aufzuschlüsseln.

- „Optimale“ Fahrweise (theoretisch ermittelt):
  Der Vergleich mit der „optimalen“ Fahrweise ist zur Bewertung einer konkreten Fahrt im Vergleich zur idealen Fahrt sehr interessant. Die optimale Fahrweise kann jedoch häufig nur näherungsweise ermittelt werden. Außerdem entspricht das Gesamtoptimum nicht unbedingt der Fahrweise mit dem geringsten Energieverbrauch. Betriebliche Einflüsse werden normalerweise nicht berücksichtigt.

Insgesamt ist die straffe Fahrweise als Basis der Bewertung am besten geeignet, da sie eindeutig ist und leicht ermittelt werden kann. Wenn eine größere Anzahl von Messfahrten durchgeführt wurde und die betrieblichen und verkehrlichen Rahmenbedingungen bekannt sind, kann in der Gesamtbewertung ein Vergleich mit der praktizierten bzw. theoretisch optimalen Fahrweise durchgeführt werden.

Für die Bewertung der Pünktlichkeit wurde in [SFWBB-2001b] eine Pünktlichkeits-Effizienz im Bereich von 0 bis 100 % definiert, die in Abhängigkeit von der relativen Fahrplanabweichung, der zuggattungsabhängigen durchschnittlichen Fahrzeitreserve und der Art der Abweichung ermittelt wird:

$$\eta_{Pünktlichkeit} = e^{-a \cdot \frac{t_{Abw,bew}}{t_{straff} - t_{Res,rel}}}$$ Pünktlichkeits-Effizienz Gl. 22

$$t_{Abw,bew} = \begin{cases} 0 & \text{für } t_{Abw} <= t_{Abschlag} \\ t_{Abw} - t_{Abschlag} & \text{für } t_{Abw} > t_{Abschlag} \end{cases}$$ bewertete Abweichung Gl. 23

mit: α Gewichtungsfaktor
z.B. 1,3 für Verspätungen; 0,9 für Verfrühungen

t_{straff} reine Fahrzeit (straffe Fahrweise) [s]

t_{Abw} Abweichung bezogen auf Sollfahrzeit [s]

$t_{Abschlag}$ Abschlag für erlaubte Abweichungen [s]
z.B. 6 s für Verspätungen; 30 s für Verfrühungen

$t_{Res,rel}$ Fahrplanreserve [%]

Diese Beziehung ergibt einen Bewertungsverlauf, bei dem kleine Abweichungen vom Sollfahrplan toleriert werden und Verspätungen gegenüber Verfrühungen einen stärkeren negativen Einfluss haben (Bild 55). Die angenommenen Faktoren und Abschläge beziehen sich auf die Ankunfts-Pünktlichkeit. Im konkreten Fall sind sie den Rahmenbedingungen anzupassen. Ggf. wird auch eine Abfahrts-Pünktlichkeit bewertet.

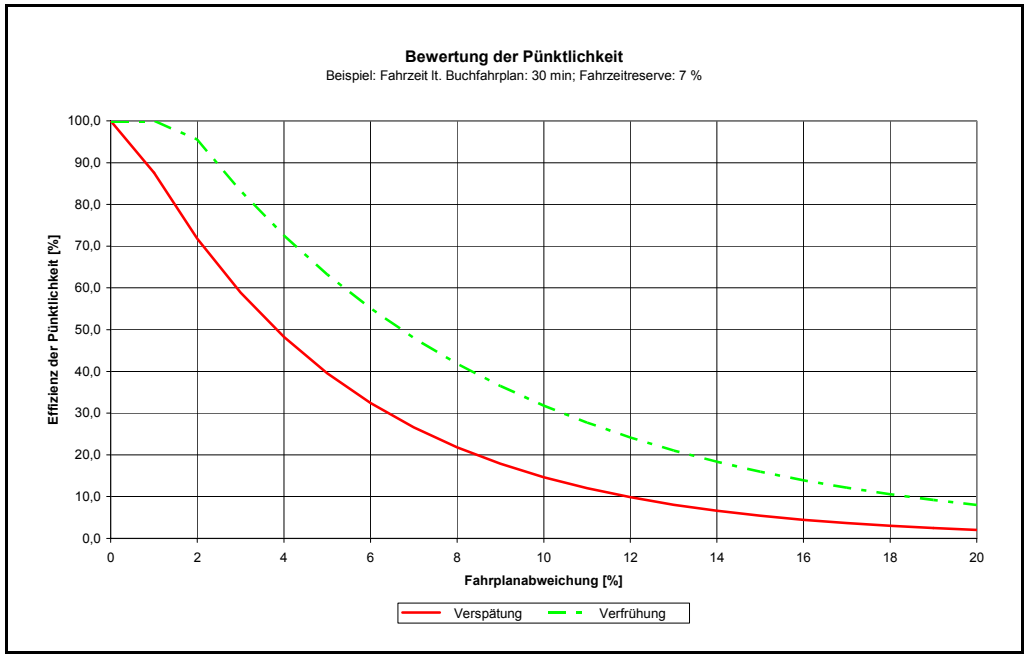


Bild 55: Bewertung der Pünktlichkeit

Zur Gesamtbewertung einer Fahrt sind die Einzelbewertungen zusammenzufassen. Sie sind zu gewichten und zu addieren. Wenn alle Einzelbewertungen als prozentuale Effizienz vorliegen und einzelne schlechte Bewertungen das Gesamtergebnis stark beeinflussen sollen, ist auch die Multiplikation der einzelnen Bewertungen möglich.

Die Bewertung von Einzelfahrten beruht immer auf den betrieblichen und verkehrlichen Randbedingungen. Beim Vergleich von Fahrten sind also dieselben Randbedingungen anzusetzen. Auch die beste Fahrweise ist nicht in der Lage, eine hohe Verspätung aufzuholen und dabei gleichzeitig den Traktionsenergieverbrauch zu senken. Zum Vergleich von Fahrweisen ist demnach eine Vielzahl von Fahrten zu berücksichtigen. Damit werden die betrieblichen Einflüsse statistisch berücksichtigt, ohne jedoch einzelne Ereignisse überzuwerten.

5.5 Bewertung von Fahrempfehlungen und Advice Systemen

Die Qualität einer Fahrempfehlung muss durch einen Vergleich zwischen der Fahrweise mit Advice System und der Fahrweise ohne Advice System beurteilt werden. Beide Fahrweisen sollten über einen längeren Zeitraum im normalen Betrieb aufgezeichnet und ausgewertet werden. Normale betriebliche Störungen müssen berücksichtigt werden und sollten in beiden Fällen vergleichbar sein und dokumentiert werden. Untypische Ereignisse sollten von der Auswertung ausgeschlossen werden.

Können die Fahrweisen nicht im realen Betrieb getestet werden, sind beide Untersuchungen mit denselben Randbedingungen zu simulieren. Dabei sollte eine hohe Anzahl von Simulationen mit unterschiedlichen Randbedingungen und Störungen durchgeführt werden. Die typische Akzeptanz des Systems beim Tf ist in diesem Fall anhand von Befragungen und Erfahrungen aus ähnlichen Projekten abzuschätzen.

Neben der Beurteilung der Qualität einer Fahrempfehlung bzw. eines Advice Systems hinsichtlich des eigentlichen Zieles (z.B. Energieeinsparung) müssen auch die Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Akzeptanz bei den Tf beurteilt werden. Diese Aspekte sind nur im realen Alltagsbetrieb zu beurteilen. Hierzu sind neben der automatischen Aufzeichnung der Einsatzdauer, der Fahrempfehlungen und der Fahrerreaktion auch die subjektiven Eindrücke der Tf und der Begleitperson zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Praxistests oder durch Simulationen ist das Verhalten des Systems bei außergewöhnlichen Störungen zu untersuchen. In diesen seltenen Fällen ist jedoch weniger die Qualität der Fahrempfehlung hinsichtlich des eigentlichen Zieles von Bedeutung, sondern vielmehr die Zuverlässigkeit und Stabilität des Systems.

Zur Auswertung der Fahrten wird eine Datenbank empfohlen, in der alle relevanten Daten jeder einzelnen Fahrt bzw. jedes einzelnen Fahrtabschnitts zusammengefasst werden. Im Rahmen der Tests des Systems Siemens METROMISER wurde zur Auswertung von Testfahrten eine Datenbank entwickelt (Bild 56). Sie enthält für jeden Fahrtabschnitt alle relevanten Informationen, z.B. Referenzen auf Start- und Zielstation, den zugrunde liegenden Fahrplan, die Abfahrts- und die Ankunftszeit, die Referenz auf die fahrdynamische Aufzeichnung und den Energieverbrauch. Weiterhin werden Informationen zu den

Fahrempfehlungen und zu deren Einhaltung gespeichert. Störungen und weitere betriebliche oder verkehrliche Informationen können in einem Kommentarfeld vermerkt werden.

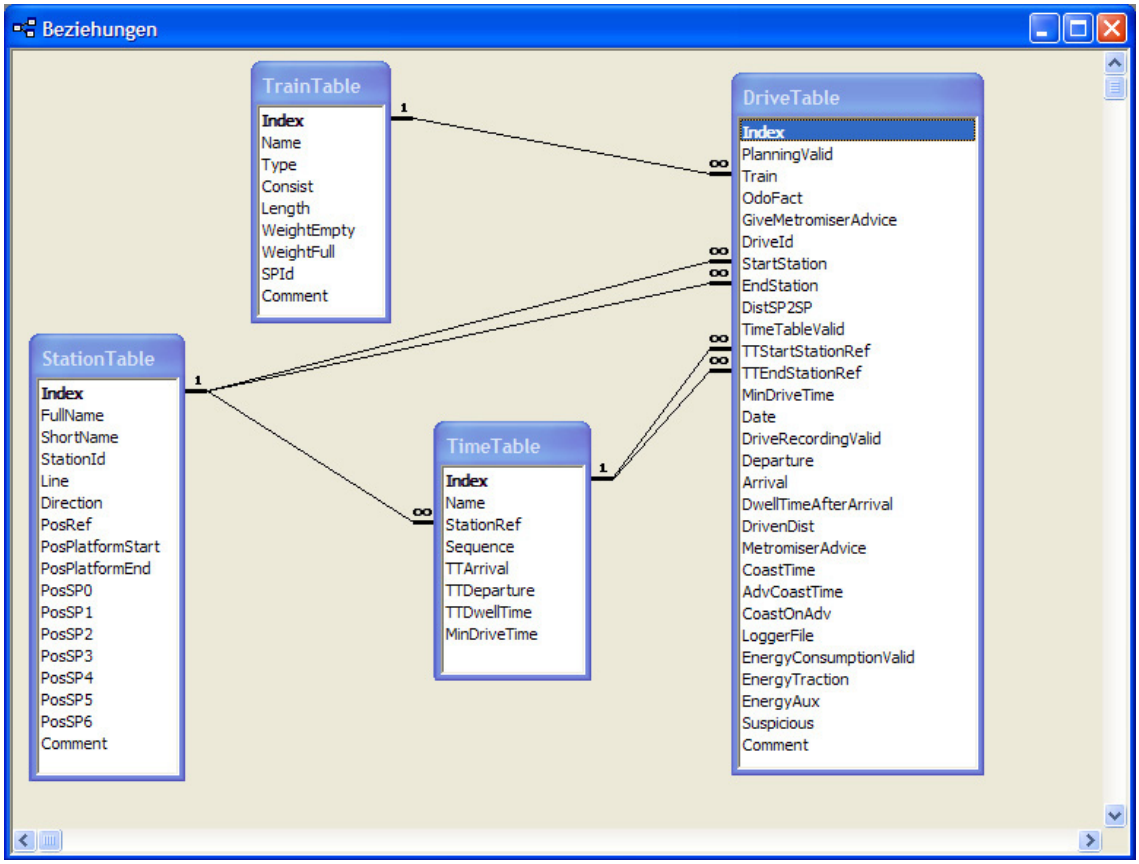


Bild 56: Tabellenbeziehung einer Datenbank zur Auswertung von Fahrten

Zur Bearbeitung der Datenbank und zur Analyse der Fahrten wurde ein spezifisches User-Interface entwickelt (Bild 57). Dieses Programm extrahiert alle wesentlichen Informationen aus den verschiedenen Datenquellen und erzeugt aus allen gültigen Einträgen einen Report mit einer Zusammenfassung der Analyse.

Mit diesen Hilfsmitteln können Fahrempfehlungen und Advice Systeme schnell und leicht beurteilt werden.

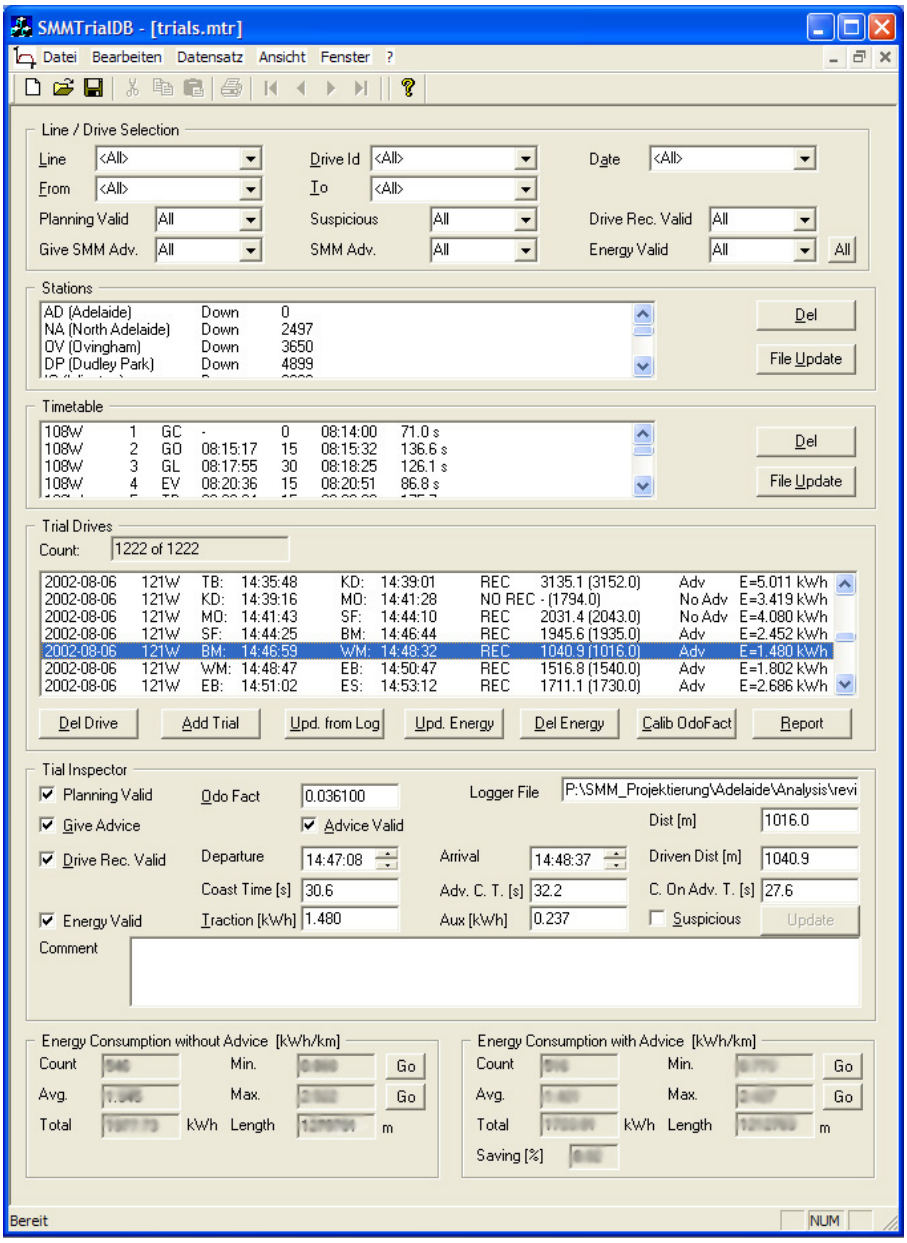


Bild 57: User-Interface einer Datenbank zur Auswertung von Fahrten

6 Wirtschaftlichkeit von Advice Systemen

Advice Systeme sind nur dann sinnvoll einzusetzen, wenn sie mittelfristig wirtschaftlich sind. Lediglich wenn durch die Einführung eines Advice Systems ein erheblicher Zusatznutzen entsteht, der nicht monetär zu bewerten ist, muss die Wirtschaftlichkeit nicht gegeben sein.

Definitionen:	Die ***Wirtschaftlichkeit*** eines Systems oder eines Unternehmens ist dadurch definiert, dass es Erlöse erzielt, welche die Kosten der Leistungserstellung übersteigen. Im Unterschied zur Produktivität ist die Wirtschaftlichkeit wertmäßig erfassbar. ***Kosten*** sind der in Geld bewertete Aufwand an Produktionsfaktoren, die nötig sind, um betriebliche Leistungen und die betriebliche Leistungsfähigkeit aufrechtzuerhalten. Man unterscheidet ***fixe*** und ***variable Kosten***. Der ***Ertrag*** ist die Summe aller Einnahmen während einer bestimmten Zeitperiode. Der ***Gewinn*** ist der Überschuss des Ertrags über die Kosten innerhalb eines bestimmten Zeitraums. Das Gegenstück ist der ***Verlust***. Der ***Cashflow*** ist - vereinfacht ausgedrückt - die Summe von Überschuss, Abschreibungen und Rückstellungen im Jahresabschluss.
Quelle:	[Encarta-2002]

Die Wirtschaftlichkeit eines Advice Systems muss sowohl aus Sicht des Betreibers als auch aus Sicht des Herstellers untersucht werden. Die Wirtschaftlichkeit zur Entwicklung eines Advice Systems kann nur dann gegeben sein, wenn genügend potenzielle Betreiber existieren, bei denen das System wirtschaftlich eingesetzt werden kann.

Zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit wird hier in beiden Fällen die ***Discounted-Cash-Flow-Methode*** verwendet.

6.1 Discounted-Cash-Flow-Methode

Die Discounted-Cash-Flow-Methode (DCFM) ist eine klassische Form der Wirtschaftlichkeitsrechnung. Sie sieht vor, dass der freie Cashflow des Projektes pro Periode ermittelt wird und mit dem kalkulatorischen Zinssatz abgezinst wird. Der Cashflow ergibt sich aus der Summe aller Ein- und Auszahlungen des Projektes, die in der jeweiligen Periode anfallen.

Dem Projekt wird ein Risiko über die Höhe des kalkulatorischen Zinssatzes zugesprochen. Diesem Risiko steht eine Renditeerwartung gegenüber. Je höher das Risiko ist, desto höher ist auch die Renditeerwartung.

Der ***Present Value*** $V_{present}$ ist der Betrag, den die Summe der abgezinsten Cashflows heute wert ist. Er berücksichtigt den kalkulatorischen Zinssatz jeder Periode (Gl. 24).

$$V_{present} = \sum_{t} \frac{C_t}{(1 + r_t)^t} \qquad \text{Present Value des DCF} \qquad \text{Gl. 24}$$

mit: t Periode
C_t Cashflow der Periode t
r_t Zinsfaktor der Periode t

Der Cashflow jeder Periode wird aus den Auszahlungen, den Einzahlungen und den Finanzierungsparametern bestimmt. Das System ist insgesamt wirtschaftlich, wenn der Present Value positiv ist.

Da einige der Parameter mit einer Unsicherheit behaftet sind, z.B. der kalkulatorische Zinssatz in der Zukunft, sollte die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung einer ***Sensitivitätsanalyse*** unterzogen werden. Hierbei werden die unsicheren Parameter jeweils in definierten Grenzen variiert. Es ergibt sich eine Funktion der Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit der einzelnen Parameter. Damit kann das Risiko der Investition besser beurteilt werden.

6.2 Wirtschaftlichkeit aus Sicht des Betreibers

Für den Betreiber eines Bahnsystems ist ein Advice System wirtschaftlich, wenn die Summe der zusätzlichen Einnahmen bzw. die Summe der verringerten Ausgaben, die sich durch die Einführung ergeben, größer ist, als die Summe aller Aufwendungen für das System. Zusatznutzen, die sich durch die Einführung eines Advice Systems ergeben, sowie gesetzliche Regelungen zur Einführung von Advice Systemen müssen, wenn möglich, monetär bewertet werden. Andernfalls bleiben sie zunächst unberücksichtigt.

Die Grundlagen zur Bewertung von Advice Systemen aus Sicht des Betreibers mit Hilfe der DCFM wurde in [Burkhardt-2001] beschrieben.

6.2.1 Einzahlungen

Einzahlungen fassen die erhöhten Erträge und verminderten Kosten zusammen, die sich durch die Investition in ein Advice System ergeben (Tabelle 21). Die Abschätzung der Einzahlungen ist teilweise mit einem hohen Risiko verbunden. Dieses Risiko kann nur durch vorherige Tests und detaillierte Simulationen reduziert werden. Durch eine Sensitivitätsanalyse kann der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Wirtschaftlichkeit untersucht werden.

Kategorie	Einzahlung	Bedeutung der Einzahlung[1]	Sicherheit der Abschätzung[2]
Energie	Verminderung des Traktionsenergieverbrauchs	++	+/o[3]
	Reduzierung der Aufwendungen in neue Energie-Infrastruktur	-	-
	Reduzierung der Wartungskosten der Energie-Infrastruktur	-	o
Verschleiß	Verminderung des Verschleißes durch Reduzierung der mechanischen Bremsarbeit	o	+
Pünktlichkeit	Verminderung der Betriebskosten durch Erhöhung der Pünktlichkeit	o	-
	Erhöhung der Einnahmen durch mehr Fahrgäste	o	-
Zusatznutzen	Einzahlungen aus systemfremden Zusatznutzen	?[4]	?[4]

Tabelle 21: Typische Einzahlungen für Advice Systeme zur Realisierung der ESF

Die wichtigste Einzahlung ist die Reduzierung des Energieverbrauchs. Diese muss unter Berücksichtigung aller relevanten Betriebsparameter anhand von detaillierten Simulationen und einem Testbetrieb zuverlässig abgeschätzt werden.

Zur Ermittlung der daraus folgenden Kosteneinsparung ist der Energiepreis entscheidend. Dieser kann tageszeitabhängig sein und muss für alle Perioden bekannt sein bzw. abgeschätzt werden. Die zukünftige Entwicklung des Strompreises ist jedoch nur sehr schwer abzuschätzen. Einerseits sind durch die Liberalisierung des Strom- und Rohstoffmarktes die Energiepreise in den letzten Jahren gesunken, andererseits kann sich diese Entwicklung durch den Abbau von Überkapazitäten, durch überfällige Investitionen in die Netzinfrastruktur[5] und durch Anhebung der Ökosteuer schnell umkehren.

---

[1] Bedeutung der Einzahlung: „++“ = sehr relevant; „--“ = nicht relevant

[2] Sicherheit der Abschätzung: „++“ = sehr sicher; „--“ = sehr riskant

[3] Die Einsparung des Energieverbrauchs lässt sich gut abschätzen, wenn alle Betriebsparameter sorgfältig berücksichtigt werden. Durch die schwankenden Energiepreise lässt sich die Kosteneinsparung jedoch nur durchschnittlich abschätzen.

[4] Ohne Kenntnis des konkreten Falls ist der Zusatznutzen nicht abzuschätzen.

[5] Die weltweit gehäuften Stromausfälle im Sommer und Herbst 2003 sind überwiegend auf eine veraltete Netzinfrastruktur und auf den Abbau von Reservekapazitäten zurückzuführen. Zur Erhöhung der Stabilität der Energieversorgung sind weitreichende Investitionen nötig, die mittelfristig durch den Strompreis finanziert werden müssen.

6.2.2 Auszahlungen

Die projektspezifischen Auszahlungen setzten sich aus den Anfangsinvestitionen sowie den fixen und den variablen laufenden Kosten zusammen. Die Anfangsinvestitionen beinhalten im Wesentlichen die Investitionen in Anlagen, Software, Installation und Tests. Sie fallen meist in der ersten oder zweiten Periode an. Die fixen Kosten entstehen während jeder Periode und sind unabhängig von der Art und der Intensität der Nutzung des Systems. Im Gegensatz dazu sind die variablen Kosten von der Intensität der Nutzung abhängig, z.B. von der Anzahl von Fahrten pro Tag oder den gefahrenen Kilometern.

Das Risiko bei der Kalkulation der Ausgaben ist relativ gering, da sie vom Systemanbieter häufig garantiert werden oder vom Betreiber sicher abgeschätzt werden können.

Für ein Advice System, ähnlich den System Siemens METROMISER, können die Auszahlungen in fünf Kategorien eingeteilt werden (Tabelle 22).

Kategorie	Auszahlung	Bedeutung der Auszahlung[1]	Art der Kosten: Anfangsinvestition	Art der Kosten: Fixe laufende Kosten	Art der Kosten: Variable laufende Kosten
Fahrzeug	Bordcomputer	++	X		
	Einbau der Bordcomputer	+	X		
	Einbau der zusätzlichen Infrastruktur (z.B. Sensoren)	+	X		
	Wartung und Austausch der eingebauten Mittel	-		X	X
Strecke	Installation ortsfester Anlagen	o	X		
	Wartung der ortsfesten Anlagen	-		X	X
Fahrzeugdepot, Verwaltung	Datenversorgungs- und Kommunikations-systeme	+	X		
	Wartung der Datenversorgungs- und Kommunikationssysteme	-		X	X
	Aufbereitung und Wartung der Streckendaten	o	X		X
	Aufbereitung und Wartung der Fahrplandaten	o	X		X
	Auswertung von aufgezeichneten Daten	-	X		X
Mitarbeiter	Schulung der Tf	-	X	X	X
	Schulung der Mitarbeiter in der Verwaltung	-	X	X	X
Zusatznutzen	Kosten für systemfremden Zusatznutzen	?[2]	X	X	X

Tabelle 22: Typische Auszahlungen für Advice Systeme zur Realisierung der ESF

[1] Bedeutung der Auszahlung: „++“ = sehr relevant; „--“ = nicht relevant

[2] Ohne Kenntnis des konkreten Falls ist der Zusatznutzen nicht abzuschätzen.

6.2.3 Finanzierungsparameter

Der wesentliche Finanzierungsparameter ist der angenommene kalkulatorische Zinssatz. Bei der Bestimmung der Wirtschaftlichkeit nach der DCFM ist jedoch nicht der tatsächliche Zinssatz entscheidend, mit dem die Investition finanziert wird, sondern der am freien Markt übliche Zinssatz für Investitionen mit einem ähnlichen Risiko. Dadurch wird die Investition in ein Advice System mit einer beliebigen anderen Investition am Kapitalmarkt verglichen.

Es reicht also nicht aus, dass sich die Investitionskosten innerhalb einer festgelegten Zeit amortisieren. Sie müssen mindestens dieselben Zinsen wie eine Anlage desselben Betrages am Kapitalmarkt erwirtschaften.

Da bei öffentlichen Bahnbetreibern die Investition am freien Kapitalmarkt auf Grund des Auftrages ein Bahnsystem zu betreiben sowie der meist leeren Kassen nicht zur Diskussion steht, muss sich der anzunehmende kalkulatorische Zinssatz an anderen Investitionen im Bahnbereich messen.

Zu den Finanzierungsparametern gehören auch die Periodendauer und die Anzahl der Perioden. Die Periodendauer ist üblicherweise ein Jahr, die Anzahl der Perioden hängt von der erwarteten Nutzungsdauer des Systems ab und liegt häufig bei ca. 10 Jahren. Diese recht lange Nutzungsdauer orientiert sich an der Lebensdauer von Bahnfahrzeugen, die mindestens 20 Jahre beträgt. Mit dem Modell der DCFM kann die Wirtschaftlichkeit der Investition jedoch auch schon früher bestimmt werden, da nach jeder Periode der Cashflow ermittelt wird.

Je nach Art des Unternehmens können steuerliche Aspekte sowie Art und Verlauf der Abschreibungen für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wichtig sein. Sind diese für den konkreten Fall bekannt, können sie in den Ein- und Auszahlungen berücksichtigt werden.

Das hier beschriebene Modell zur Wirtschaftlichkeitsermittlung basiert auf der Annahme, dass das System vom Betreiber gekauft wird. Alternativ dazu kann das System jedoch auch geleast oder gemietet werden. In der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung werden die fälligen Leasing- oder Mietkosten den fixen laufenden Kosten zugeordnet. Ebenso kann eine ggf. vom Hersteller zugesicherte Erfolgsgarantie (→ Abschnitt 6.3.3) bei den Einzahlungen berücksichtigt werden.

6.2.4 Modell zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit

Zunächst müssen anhand der technischen, betrieblichen und organisatorischen Parameter die Ein- und Auszahlungen für jede Periode bestimmt werden. Daraus wird der Cashflow bestimmt und über die vorgesehene Nutzungsdauer abgezinst summiert (Bild 58).

In [Burkhardt-2001] wurde das Modell in Form mehrere Tabellen in Microsoft EXCEL® implementiert. Damit kann die Wirtschaftlichkeit von Advice Systemen sehr schnell und leicht bestimmt werden, wenn alle erforderlichen Größen bekannt sind.

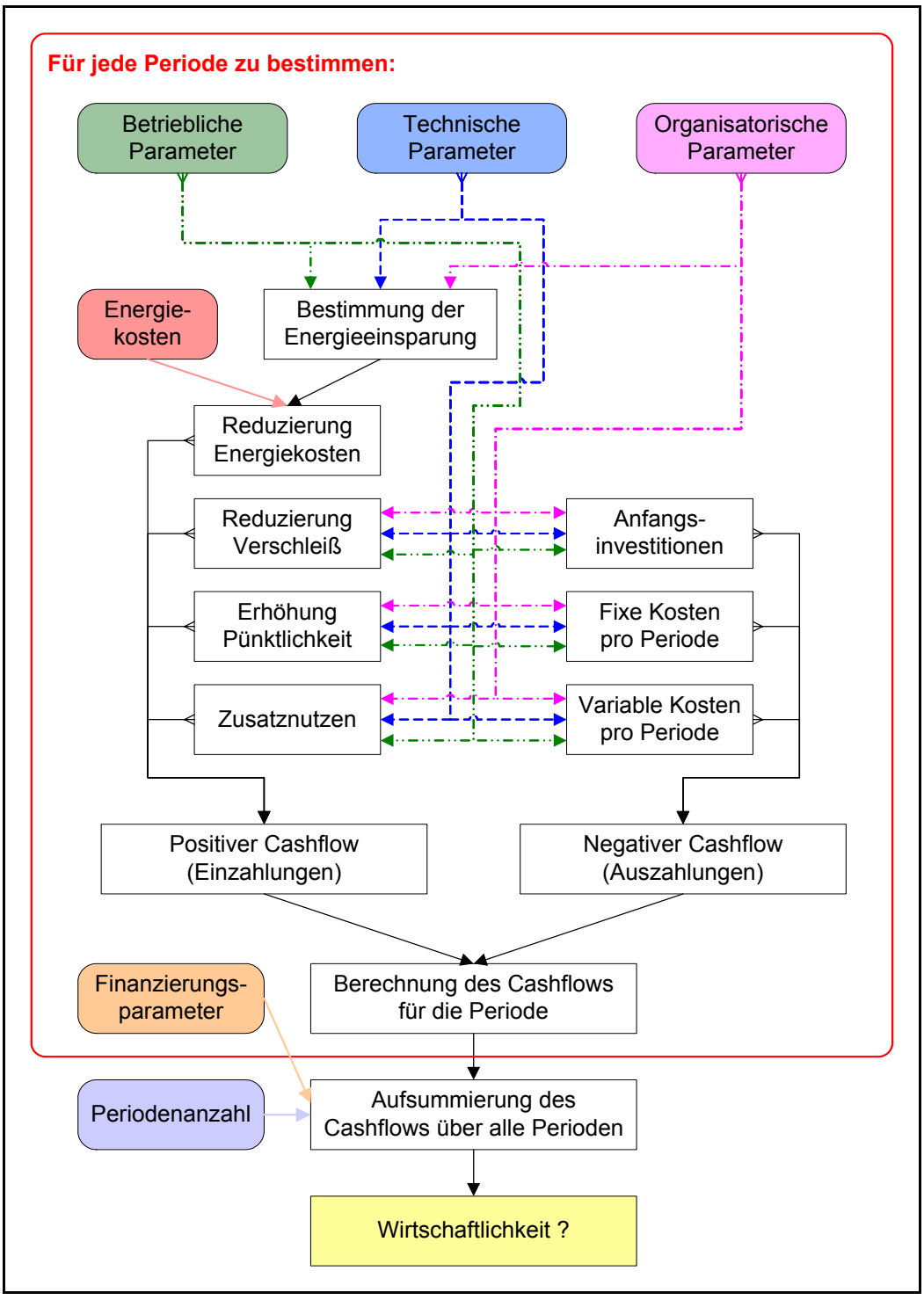


Bild 58: Modell zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Advice Systemen nach der DCFM

6.3 Wirtschaftlichkeit der Systementwicklung und -vermarktung

Die Wirtschaftlichkeit der Systementwicklung eines Advice Systems und dessen Vermarktung ist im Wesentlichen von den Entwicklungs- und Vermarktungskosten sowie vom Erlös aus dem Verkauf abhängig. Zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit kann auch hier die Discounted-Cash-Flow-Methode herangezogen werden. Das Modell zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit entspricht weitestgehend dem der Wirtschaftlichkeitsberechnung von Advice Systemen. Die Ein- und Auszahlungen sind jedoch anders.

6.3.1 Einzahlungen

Die Einzahlungen werden vom Verkauf und vom Verleasen bzw. Vermieten von Advice Systemen geprägt. Weiterhin sind Einnahmen aus Wartungsverträgen sowie ggf. durch den Verkauf von Lizenzen oder Patenten zu erwarten (Tabelle 23).

Kategorie	Einzahlung	Bedeutung der Einzahlung[1]	Sicherheit der Abschätzung[2]
Vermarktung des Systems	Verkauf von Advice Systemen und Softwarelizenzen an Betreiber von Bahnsystemen	++	o
	Vermieten / Verleasen von Advice Systemen und Softwarelizenzen an Betreiber von Bahnsystemen	o	o
	Systemspezifische Consultingtätigkeiten (z.B. Durchführung von Tests bei potenziellen Kunden, Projektierung)	o	+
	Durchführung von Schulungen für (potenzielle) Betreiber	o	o
Vermarktung von Lizenzen	Verkauf von Lizenzen an den Algorithmen oder der Software an andere Systemhersteller oder Consultants	o	o
	Verkauf oder Lizenzierung von Patenten	o	o

Tabelle 23: Typische Einzahlungen bei der Entwicklung/Vermarktung eines Advice Systeme zur Realisierung der ESF

Da der Verkauf von Advice Systemen die einzige wesentliche Einzahlung ist, muss die Marktchance des Systems vor Beginn der Entwicklung genau untersucht werden. Die Marktchancen werden von den Systemeigenschaften und der zu erwartenden Wirtschaftlichkeit des Systems für die Betreiber geprägt. Zwingende Voraussetzung ist, dass die Wirtschaftlichkeit bei einer Vielzahl von potenziellen Kunden gegeben ist. Dies alleine ist aber noch keine Garantie für einen Markterfolg. Advice Systeme sind noch recht neu auf dem Markt und es existieren kaum langjährige Erfahrungen damit. Die potenziellen Kunden gehen also ein hohes Risiko ein und müssen von der Vorteilhaftigkeit einer Investition erst überzeugt werden. Neben den klassischen Methoden des Marketings kann der Umsatz auch durch Garantien oder die Übernahme des Risikos durch den Systemhersteller gesteigert werden (→ Abschnitt 6.3.3).

6.3.2 Auszahlungen

Die Auszahlungen setzen sich aus den Entwicklungskosten, sowie den fixen und den variablen laufenden Kosten für Vermarktung, Wartung und Support zusammen. Die Entwicklungskosten fallen überwiegend in den ersten Perioden an, bevor das System vermarktet werden kann. Während die Kosten für die Vermarktung nur so lange anfallen, wie das System

---

[1] Bedeutung der Einzahlung: „++“ = sehr relevant; „--“ = nicht relevant

[2] Sicherheit der Abschätzung: „++“ = sehr sicher; „--“ = sehr riskant

tatsächlich am Markt angeboten wird, müssen Wartung und Support auch nach dem Marktaustritt noch für die übliche Nutzungsdauer angeboten werden.

Für die Entwicklung eines eigenständigen Advice Systems, ähnlich dem System Siemens METROMISER, können die Auszahlungen in fünf Kategorien eingeteilt werden (Tabelle 24).

Kategorie	Auszahlung	Bedeutung der Auszahlung[1]	Sicherheit der Abschätzung[2]	Art der Kosten: Anfangs-investition	Art der Kosten: Fixe laufende Kosten	Art der Kosten: Variable laufende Kosten
Entwicklung	Entwicklung oder Erwerb von Algorithmen	++	+	X		
	Hardwareentwicklung Bordcomputer[3]	+	o	X		
	Softwareentwicklung Bordcomputer	++	o	X		
	Softwareentwicklung Planungstool	++	o	X		
	Entwicklung von Datenversorgungs- und Kommunikationssystemen[4]	+	+	X		
	Entwicklung der Testumgebung	+	o	X		
	Systemtest	+	o	X		(X)
	Gebühren zur Wahrung von Patenten	-	++	X	(X)	
Wartung	Hardwarewartung	o	+		(X)	X
	Softwarewartung	o	o		X	(X)
Support	Kundenbetreuung	o	+			X
Vermarktung	Herstellung und Verbreitung von System-informationen (z.B. Prospekte etc.)	-	++	X	X	
	Förderung des Markteintritts durch Sponsoring der ersten Kunden	o	-	X		
	Akquisitionskosten/Kundenberatung	o	+	(X)	(X)	X
Produktion	Zukauf Hardware/Hardwareproduktion	+	+	X	(X)	X
	Softwareproduktion/Installation	-	+	(X)	(X)	X

Tabelle 24: Typische Auszahlungen bei der Entwicklung bzw. Vermarktung eines Advice Systeme zur Realisierung der ESF

[1] Bedeutung der Auszahlung: „++“ = sehr relevant; „--“ = nicht relevant

[2] Sicherheit der Abschätzung: „++“ = sehr sicher; „--“ = sehr riskant

[3] Es wird davon ausgegangen, dass die Hardware nicht eigenständig für das Advice System entwickelt wird, sondern dass es sich um eine zugekaufte und an die Anforderungen angepasste Lösung handelt.

[4] Es wird davon ausgegangen, dass es sich um keine eigenständige Entwicklung handelt, sondern dass existierende Lösungen verwendet und angepasst werden.

6.3.3 Umsatzsteigerung durch die Übernahme einer Erfolgsgarantie

Der Betreiber eines Bahnsystems verfügt häufig nicht über genügend finanzielle Mittel zur Anschaffung eines Advice Systems, obwohl eine Einführung für ihn wirtschaftlich sein würde. Da es bisher nur geringe Erfahrungen mit Advice Systemen gibt und die Wirtschaftlichkeitsrechnung mit einem Risiko behaftet ist, kann es für den Betreiber schwierig sein, sich die notwendigen Mittel auf dem Kapitalmarkt zu leihen. Da der Hersteller eines Advice Systems am besten in der Lage sein sollte, die Wirtschaftlichkeit der Investition für den potenziellen Betreiber sicher zu bestimmen, kann er das System mit einer Erfolgsgarantie anbieten bzw. selber das System finanzieren. Hierfür gibt es unterschiedliche Modelle:

- Der Betreiber kauft das System mit eigenen oder geliehenen Mitteln:
  Der Systemhersteller garantiert entweder eine absolute oder eine relative Energieeinsparung. Hierzu sind jedoch sehr genaue Betriebsbedingungen zu definieren und deren Einhaltung durch geeignete Maßnahmen oder Systeme zu dokumentieren. Werden trotz Einhaltung der Betriebsbedingungen nicht die garantierten Einsparungen erzielt, zahlt der Systemhersteller dem Betreiber die Differenz zwischen erreichter und garantierter Einsparung.
  Die Garantie erstreckt sich über mindestens den Zeitraum, der in der Wirtschaftlichkeitsrechnung als Rentabilitätsschwelle ermittelt wurde. Durch die Garantie des Systemherstellers ist die Finanzierung sicherer kalkulierbar und es fällt leichter, sich Mittel auf dem Kapitalmarkt zu besorgen.

- Der Systemhersteller finanziert das System:
  Der Systemhersteller übernimmt die Anschaffungskosten des Systems, der Betreiber den Einbau und die laufenden Kosten. Über einen festgelegten Zeitraum teilen sich der Betreiber und der Systemhersteller die Einsparungen, die sich aus dem Einsatz des Systems ergeben, nach einem festgelegten Schlüssel.

Beiden Finanzierungsmodellen ist gemein, dass der Systemhersteller das Risiko der Wirtschaftlichkeit übernimmt, er jedoch dadurch neue Absatzmärkte erschließen kann. Weiterhin kann er durch die Übernahme des Risikos die Preise entsprechend höher ansetzen.

Zur Risikoabschätzung und -einschränkung sind zwei Aspekte zu berücksichtigen:

- Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung muss mit äußerster Sorgfalt durchgeführt und mit einer Sensitivitätsanalyse untermauert werden. Das berücksichtigte Einsparpotenzial muss sehr konservativ bestimmt werden. Dabei sind alle üblichen betrieblichen Einschränkungen zu berücksichtigen.

- Die Betriebsbedingungen müssen exakt definiert und automatisiert überprüft werden, so dass im Streitfall schnell herausgefunden werden kann, wen die Schuld trifft. Weiterhin ist der aktuelle Status Quo ohne Advice System genau zu dokumentieren, so dass die Einsparungen nachweislich dem Advice System zugeschrieben werden können.

6.3.4 Bewertung der Wirtschaftlichkeit während der Entwicklung bzw. nach dem Markteintritt

Die Entwicklung neuartiger technischer Systeme ist häufig schwer zu kalkulieren. Zur Abdeckung von wirtschaftlichen und zeitlichen Risiken werden bei der Projektplanung meist angemessene Reserven berücksichtigt. Dennoch zeigt sich immer wieder, dass die geplanten Mittel nicht reichen oder dass Termine nicht eingehalten werden können. Schon bei der Gefahr einer größeren Abweichung vom Plan sind die Systementscheidung und die Wirtschaftlichkeit neu zu bewerten. Die Bewertung während der Entwicklung unterscheidet sich jedoch in einigen Punkten von der Bewertung vor dem Systementscheid:

- Ausgaben, die schon getätigt wurden oder nicht mehr zu stoppen sind, sind zwar zur nachträglichen Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Entwicklung zu berücksichtigen, nicht jedoch bei der Bewertung, ob die Entwicklung gestoppt oder weitergeführt werden sollte.

- Es muss deutlicher unterschieden werden, ob es sich um Abweichungen im Bereich der zu erwartenden Einzahlungen oder im Bereich der der zu erwartenden Auszahlungen handelt.
  Fehleinschätzungen im Bereich der Einzahlungen können evtl. durch gezielte Maßnahmen des Marketings abgefangen werden, sofern die Fehleinschätzung nicht auf den Systemeigenschaften beruht. Können jedoch die angenommenen Systemeigenschaften nicht erfüllt werden, ist der Systementscheid neu zu bewerten.
  Fehleinschätzungen im Bereich der Auszahlungen können meist nur durch eine Abweichung der Systemeigenschaften ausgeglichen werden. Dies ist jedoch nur selten sinnvoll, weil damit auch die Marktchancen des Systems reduziert werden. Besser ist es, den Return-Of-Investment zu verschieben oder zu versuchen, neu Absatzquellen zu erschließen, um den erhöhten Auszahlungen auch erhöhten Einzahlungen gegenüberzustellen.

- Ist das System schon am Markt eingeführt oder im Rahmen von Veröffentlichungen bzw. Messeauftritten den potenziellen Kunden vorgestellt worden, sollten grundlegende Einschneidungen im Systemdesign bzw. die Einstellung der Entwicklung gut überdacht werden. Häufig ist es besser, einen (kleinen) finanziellen Verlust bei einem Produkt hinzunehmen, wenn dadurch treue Kunden zufrieden gestellt werden können und das Vertrauen in den Systemhersteller nicht beeinträchtigt wird. Wenn jedoch die gewünschten Systemeigenschaften nicht oder nur teilweise erfüllt werden können, ist es meist sinnvoller, das Produkt zurückzuziehen und Kunden ggf. zu entschädigen, anstatt immer mehr Kunden zu verärgern.

Insgesamt kann das Risiko der Systementwicklung nur durch eine sorgfältige technische, finanzielle und zeitliche Planung sowie mit einem ausgereiften Marketingkonzept gering gehalten werden.

7 Einführung und Bewertung eines Advice Systems

Anhand einer typischen Vorgehensweise wird die Einführung und Bewertung eines Advice Systems dargelegt. Diese Vorgehensweise entspricht weitestgehend dem üblichen Vorgehen bei der Einführung neuer Systeme, wurde vom Verfasser jedoch im Rahmen verschiedener Studien und Erprobungen für potenzielle Anwender des Systems Siemens METROMISER an die speziellen Bedürfnisse eines Advice Systems angepasst [SFWBB-2001d], [SFWBB-2001e], [SFWBB-2001f], [Siegmann-2002] und [Siegmann-2003]. Im Folgenden wird von einem Advice System zur Realisierdung der ESF für Bahnsysteme ohne ATO ausgegangen.

Die prinzipielle Vorgehensweise wird anhand eines realen Beispiels demonstriert. Dabei handelt es sich um Untersuchungen zur Einführung des Systems Siemens METROMISER bei ***TransAdelaide***, die Mitte 2002 durchgeführt wurden [Siegmann-2002] und [Siegmann-2003]. Aus datenschutzrechtlichen Gründen können nicht immer die realen Zahlen verwendet werden. Stattdessen werden Schätzwerte angesetzt und als solche gekennzeichnet.

Informationen über den Betreiber TransAdelaide und das Bahnnetz sowie die Fahrzeuge sind in Anhang F zusammengefasst.

7.1 Allgemeines Vorgehen

Die Initiative, sich mit einem Advice System zu beschäftigen, kann sowohl vom Betreiber als auch vom Hersteller aus ergriffen werden. Der Hersteller sollte den Betreiber jedoch von Anfang an bei dem Entscheidungsprozess zur Einführung eines Advice Systems unterstützen. Nur er kennt sein System genau und kann einschätzen, unter welchen Voraussetzungen und Bedingungen das System wirtschaftlich eingesetzt werden kann. Nur wenn der Hersteller bei der Bewertung objektiv und ehrlich vorgeht, kann er sein System langfristig erfolgreich vermarkten. Wenn die internen Kalkulationen des Herstellers ergeben, dass das System für den potenziellen Betreiber technisch, betrieblich oder wirtschaftlich nicht geeignet ist, sollte dies dem Betreiber auch sofort mitgeteilt werden und zum Abbruch der Verhandlungen führen. Nur so kann der Akquisitionsaufwand für Projekte, die nicht zum Vertragsabschluss führen, vermieden werden. Wenn es trotz interner Bedenken zum Vertragsabschluss kommt, ist die Wirtschaftlichkeit des Projektes durch nötige Nachbesserungen und ggf. durch Schadensersatzforderungen häufig nicht mehr gegeben.

Die Einführung eines Advice Systems wird in zwei Hauptphasen unterteilt:

1. Phase: Pre-Sales-Aktivitäten:
   - Klärung der Erwartungen und der Voraussetzungen,
   - Voruntersuchungen,
   - Testbetrieb,
   - Detaillierte Untersuchungen zum Einsatz im ganzen Netz und
   - Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

2. Phase: Einführung des Systems:
   - Projektierung,
   - Ausrüstung der Fahrzeuge,
   - Schulung der Triebfahrzeugführer,
   - Probebetrieb und
   - Einführung in den normalen Betrieb

Zwischen den beiden Phasen stehen der Systementscheid und ggf. der Vertragsabschluss. Beim Systementscheid wird entschieden, ob und ggf. welches Advice System zu welchem Zeitpunkt eingeführt wird. Nach dem Systementscheid sind allenfalls kleinere Änderungen am Systemdesign möglich, ohne dass die Wirtschaftlichkeit des Projektes in Frage gestellt werden muss.

Nach Abschluss der zweiten Phase ist das System voll einsatzfähig. Nach einer Betriebszeit von mindestens sechs Monaten sollte das System technisch, betrieblich und wirtschaftlich bewertet werden.

7.2 Motivation

Bahnbetreiber möchten ihren Betrieb effizienter und wirtschaftlicher gestalten. Die Optimierung der Fahrweise kann einen Beitrag dazu leisten. Die Ziele zur Optimierung der Fahrweise sind vielschichtig und können von Betreiber zu Betreiber variieren (→ Abschnitt 1.3). Besonders die Umsetzung der energiesparsamen Fahrweise erscheint viel versprechend. Angesprochen durch die beworbenen Aussagen der Systemhersteller für Advice Systeme, die nicht selten Einsparungen von 15 oder gar 20 % an Traktionsenergie versprechen, besteht bei vielen Betreibern ein prinzipielles Interesse an der Einführung eines Advice Systems.

Einerseits ist bei einigen Betreibern ein blindes Vertrauen in neue Technik zu beobachten, andererseits stehen andere Betreiber Advice Systemen sehr skeptisch gegenüber. Allgemeingültige Aussagen über die Wirtschaftlichkeit von Advice Systemen können nicht getroffen werden, da hierfür zu viele individuelle Aspekte des jeweiligen Advice Systems und des Betreibers zu berücksichtigen sind. Noch gibt es kaum belastbare Erfahrungen mit Advice Systemen, so dass potenzielle Betreiber den Nutzen einer Einführung selbstständig oder mit Hilfe externer Berater bewerten müssen, wenn sie sich nicht ausschließlich auf die Aussagen des Anbieters verlassen wollen.

Beispiel: Motivation bei TransAdelaide

TransAdelaide hat 1991 alle Fahrzeuge der Class 2000/2100 mit dem ***TEKNIS METROMISER***, dem technologischen Vorgänger des Siemens METROMISER, ausgestattet. Durch die Geschäftsaufgabe von TEKNIS konnte das System nicht mehr weiterentwickelt und gewartet werden, so dass das System nach ca. zwei Jahren Betriebseinsatz stillgelegt wurde.

Durch den Einsatz des Systems konnten im Verhältnis zur vorher praktizierten Fahrweise ca. 12 - 14 % des Dieseltreibstoffs eingespart werden [Milroy-2000]. Laut Aussagen von Triebfahrzeugführern war das System jedoch nicht sehr zuverlässig und aufwändig zu bedienen.

Die Neuentwicklung des Systems Siemens METROMISER basiert auf den bewährten Algorithmen, die jedoch weiterentwickelt und dem Stand der Technik angepasst wurden. Im Vergleich zum TEKNIS METROMISER wurden hinsichtlich des Datenmanagements, des User-Interfaces und der Stabilität sowie der Hardwareplattform sehr große Fortschritte erzielt, so dass TransAdelaide dem Einsatz des Systems sehr positiv entgegenstand.

7.3 Pre-Sales-Aktivitäten

Die Pre-Sales-Aktivitäten fassen alle Untersuchungen zusammen, die vor dem Systementscheid und vor dem Vertragsabschluss durchgeführt werden. In dieser Phase muss sichergestellt werden, dass das ausgewählte System allen Anforderungen aus technischer und betrieblicher Sicht gerecht wird, dass die Voraussetzungen zur Einführung des Systems gegeben sind bzw. geschaffen werden können und dass das System wirtschaftlich ist.

Die Pre-Sales-Aktivitäten können sehr aufwändig sein. In einem mehrstufigen Verfahren werden systematisch die technische Lösung, die Erfolgsaussichten und die Wirtschaftlichkeit des Systems immer detaillierter untersucht. Nach jeder Stufe wird über den Fortgang der Untersuchungen entschieden (Bild 59). Da in den ersten Stufen die Wirtschaftlichkeit noch nicht exakt bestimmt werden kann, sind die Untersuchungen ggf. auch dann fortzuführen, wenn die Wirtschaftlichkeit nur knapp verfehlt wird.

Die beachtlichen Kosten der Pre-Sales-Aktivitäten sollten sich der Hersteller und der Betreiber angemessen teilen. Während alle Aktivitäten bis zu den Voruntersuchungen noch maßgeblich vom Hersteller durchgeführt und finanziert werden, sollten der Testbetrieb und die detaillierten Untersuchungen von beiden Partnern getragen werden. Damit wird einerseits gewährleistet, dass potenzielle Betreiber nicht durch hohe Kosten von vornherein abgeschreckt werden und andererseits, dass die aufwändigen Untersuchungen nur bei Betreibern durchgeführt werden, die ein ernsthaftes Interesse an dem System haben und bei denen ein wirtschaftlicher Einsatz des Systems zumindest möglich erscheint. Idealerweise werden sowohl der Testbetrieb als auch die detaillierten netzweiten Untersuchungen von externen Beratern durchgeführt, die vom potenziellen Kunden bezahlt werden. Somit ist eine unabhängige Bewertung gewährleistet.

Kommen mehrere unterschiedliche Advice Systeme in Frage, müssen alle Systeme gleichartig untersucht und bewertet werden.

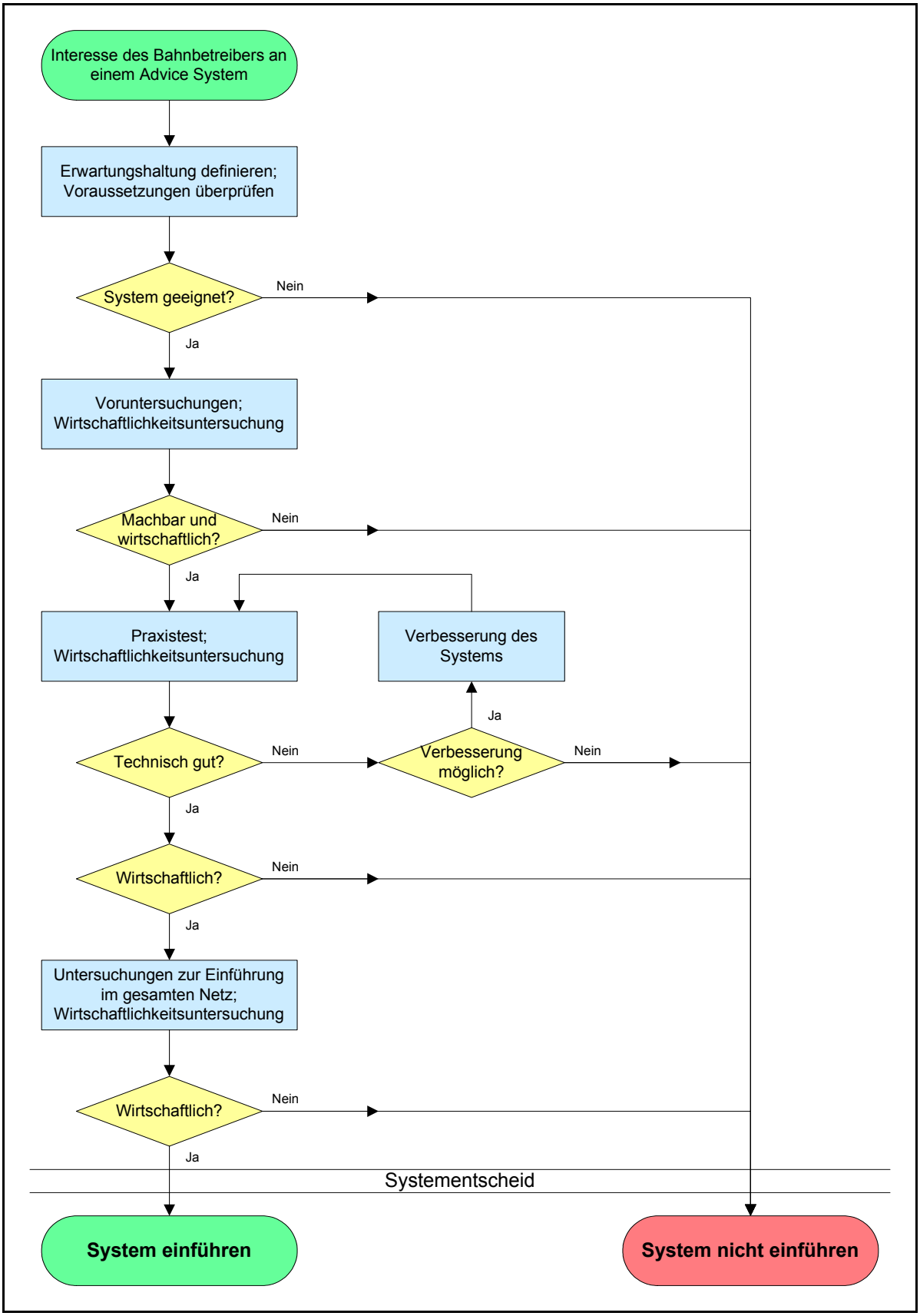


Bild 59: Pre-Sales-Aktivitäten bis zum Systementscheid

7.3.1 Erwartungshaltung

Zur späteren Bewertung des Nutzens eines Advice Systems sind zunächst die Erwartungen des Betreibers und ggf. auch seiner Mitarbeiter (z.B. den Tf) zu klären und festzuhalten (→ Abschnitt 4.5). Hier ist besonders der Hersteller gefordert, überzogene Erwartungen oder nicht gegebene Systemeigenschaften schnell zu erkennen und als nicht realisierbar zu kennzeichnen.

Beispiel: Erwartungen bei TransAdelaide:

Aufgrund der Erfahrungen mit dem TEKNIS METROMISER erwartete TransAdelaide eine Traktionsenergieeinsparung von mindestens 12 % bei einer Steigerung der Pünktlichkeit. Weiterhin wurde ein einfach zu bedienendes und wartungsarmes System erwartet. Die Tf sollten ausschließlich am Anfang der Fahrt einige wenige Eingaben tätigen müssen und jederzeit den aktuellen Status des Systems und die aktuelle Fahrplanlage ablesen können. Das System sollte anhand der eindeutigen Fahrtnummer, des Türkontaktes und des Wegimpulszählers die Position zuverlässig erkennen und Fehlzustände (z.B. fehlende oder falsche Daten) automatisch erkennen und anzeigen können.

Die Tf sollten durch das System unterstützt, nicht jedoch bevormundet werden. Sie erwarteten ein zuverlässiges und leicht zu bedienendes System, durch das sie keine zusätzliche Arbeit haben.

7.3.2 Überprüfung der Voraussetzungen

Der Erfolg eines Advice Systems ist von verschiedenen technischen und betrieblichen Voraussetzungen abhängig. Einige dieser Voraussetzungen sind zwingend, d.h. ein Einsatz des Systems ist ohne deren Erfüllung nicht möglich. Alle Advice Systeme benötigen z.B. ein Ortungssystem. Andere Voraussetzungen sind zwar nicht zwingend, der Erfolg des Advice Systems ist jedoch vom Erfüllungsgrad der Voraussetzungen abhängig. Dies betrifft z.B. die Fahrzeitreserve und die Pünktlichkeit. Für Advice Systeme zur Realisierung der energiesparsamen Fahrweise sind die Voraussetzungen weitestgehend erfasst (→ Abschnitte 3.6 und 3.7). Für andere Arten von Advice Systemen müssen sie angepasst oder ergänzt werden.

Beispiel: Überprüfung der Voraussetzungen bei TransAdelaide

Zur Fahrzeugortung sollte ein vorhandener Wegimpulszähler mit hoher Genauigkeit verwendet werden. Die Signale für Türfreigabe und Rollen waren vorhanden und konnten leicht abgegriffen werden.

Die Datenversorgung sollte entsprechend dem Datenversorgungskonzept des Siemens METROMISER über Wireless LAN und einen Betriebshofserver gewährleistet werden (→ Abschnitte 3.6.2 und 4.7.3.3).

Die Integration in andere Bordcomputer war nicht geplant, das System sollte zunächst völlig autark arbeiten.

Die Fahrpläne wiesen im Durchschnitt eine angemessene Fahrzeitreserve aus, waren jedoch nicht sekundengenau und mussten deshalb optimiert werden, ohne jedoch die Gesamtfahrzeit zu ändern. Laut Betreiber sollte die Pünktlichkeit hinreichend hoch zur Realisierung der energiesparsamen Fahrweise sein. Weiterhin versprach man sich vom Siemens METROMISER eine Erhöhung der Pünktlichkeit. Da die einzelnen Linien weitestgehend unabhängig voneinander verlaufen und der Zugfolgeabstand relativ groß ist, wurden keine größeren Störungen durch die Zugfolge erwartet.

7.3.3 Voruntersuchung

Die Voruntersuchungen dienen einer ersten Abschätzung der Machbarkeit und der Wirtschaftlichkeit. Das Ziel ist, den Aufwand, die Erfolgsaussichten und die Risiken zu ermitteln und zu bewerten.

In einer technischen Machbarkeitsstudie werden erste Konzepte zur Erfüllung aller technischen und betrieblichen Voraussetzungen erarbeitet. Hierzu gehört auch ein Grobkonzept zum Einbau des Bordcomputers und zur Ansteuerung aller benötigten Hardware-I/Os. Weiterhin muss das Datenversorgungskonzept anhand der örtlichen und betrieblichen Gegebenheiten konkretisiert werden. Ggf. muss der Zusatznutzen spezifiziert und bewertet werden, der durch den Einsatz des Advice Systems erwartet wird. Weiterhin müssen die zu erwartenden Probleme bei der Einführung des Systems identifiziert und entsprechende Lösungsansätze erarbeitet werden. Aus dem Ergebnis der Machbarkeitsstudie können der Aufwand und die Kosten des Systems grob abgeschätzt werden.

In der zweiten Stufe wird der voraussichtliche Nutzen des Systems ermittelt. Es werden einzelne typische Zugfahrten auf einem repräsentativen Teilstück des Netzes simuliert. Hierzu müssen Infrastruktur-, Fahrzeug- und Fahrplandaten projektiert werden. Zur Abschätzung des Nutzens sind sowohl Fahrten ohne Advice System als auch Fahrten mit Advice System zu simulieren. Typische betriebliche und technischen Einflüsse und die zu erwartende Akzeptanz des Systems müssen durch den Betreiber realistisch abgeschätzt und in den Simulationen berücksichtigt werden. Durch die Definition mehrerer Szenarien mit unterschiedlichen Störungs- und Akzeptanzniveaus kann eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden.

Abschließend wird die Wirtschaftlichkeit anhand der geschätzten Kosten und des simulierten Nutzens ermittelt. Da im Rahmen der Voruntersuchungen sowohl die Kosten als auch die monetäre Bewertung des Nutzens nur ungenau bestimmt werden können, kann die ermittelte Wirtschaftlichkeit nur als Anhaltspunkt dienen, ob ein Testbetrieb und detaillierte Untersuchungen sinnvoll sind.

Beispiel: Voruntersuchungen bei TransAdelaide

Die Voruntersuchungen basieren auf den zweijährigen Erfahrungen mit dem System TEKNIS METROMISER. Sie wurden durch einzelne Simulationen für die neuere Fahrzeuggeneration Class 3000/3100 ergänzt [Milroy-2000].

Es wurde ermittelt, dass die Einsparungen mindestens in derselben Größenordnung wie beim Serienbetrieb des TEKNIS METROMISER liegen, d.h. bei insgesamt 12 - 14 %.

Eine vollständige Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wurde nicht durchgeführt.

7.3.4 Testbetrieb

Vor der Einführung eines Advice Systems sollte ein Testbetrieb unter realen Bedingungen auf dem Netz des Betreibers durchgeführt werden. Dieser Test hat folgende Ziele:

- Anpassung des Systems an den realen Betrieb des Betreibers,
- Überprüfung und Anpassung der Konfigurationsdaten,
- Identifikation von möglichen Problemen bei der Einführung,
- Überprüfung, ob die technische und wirtschaftliche Erwartung des Betreibers an das System erfüllt wird,
- Information und erste Schulung der Tf, die den Test durchführen und
- erste Überprüfung der Akzeptanz des Systems.

Die erfolgreiche Durchführung des Testbetriebes ist entscheidend für den Gesamterfolg des Projektes, da die endgültige Entscheidung zur Einführung des Advice Systems zu diesem Zeitpunkt normalerweise noch nicht erfolgt ist. Deshalb muss der Testbetrieb gut vorbereitet und von qualifiziertem Personal durchgeführt werden.

Da während des Testbetriebes alle häufiger vorkommenden Zustände und Störungen abzudecken sind, ist ein Zeitraum von ca. zwei Wochen im normalen Fahrgastbetrieb zu veranschlagen. Seltener vorkommende Zustände und Störungen müssen durch spezielle Tests oder durch Simulationen abgedeckt werden.

Durch die Beschränkung des Testbetriebes auf eine typische Strecke bzw. einen typischen Streckenabschnitt wird die Auswertung vereinfacht und übersichtlicher. Weiterhin ist diese Methode aussagekräftiger, da dann mehr Fahrten unter ähnlichen Bedingungen durchgeführt werden können. Zum besseren Vergleich sollten alle Fahrten mit demselben Tfz und für einen vorher festgelegten Fahrplan durchgeführt werden. Nur wenn sehr unterschiedliche Fahrzeuge und/oder Strecken zu berücksichtigen sind, ist eine entsprechende Ausweitung des Testbetriebes sinnvoll.

Bevor der eigentliche Testbetrieb durchgeführt wird, muss das Advice System auf dem Tfz installiert und getestet werden. Hierbei kann die Anbindung an die externen Systeme (z.B. Wegimpulszähler etc.) provisorisch geschehen. Die ersten Funktionstests sollten außerhalb des normalen Betriebes im Depot oder auf freier Strecke durchgeführt werden. Erst wenn eine

komplette Fahrt auf der zu untersuchenden Strecke erfolgreich durchgeführt werden konnte, ist das System im normalen Betriebseinsatz zu erproben.

Der gesamte Testbetrieb sollte von einem Entwicklungsingenieur des Systems begleitet werden, um etwaige Probleme schnell zu erkennen und - wenn möglich - zu beseitigen, sowie um dem Tf einen kompetenten Ansprechpartner für Fragen und Verbesserungsvorschläge zur Seite zu stellen. Auch die Interessen des Betreibers machen es erforderlich, motiviertes und qualifiziertes Fahrpersonal einzusetzen. Dies gilt im Besonderen für die Tf, die den Test durchführen sollen, da diese von dem Advice System direkt betroffen sind und deren Eindruck letztendlich in eine Entscheidung mit einfließen wird.

Zur Bewertung des Systems müssen die durchgeführten Fahrten aufgezeichnet und ausgewertet werden. Hierzu sind die entwickelten Methoden zu verwenden (→ Kapitel 5). Bei der Auswahl der aufzuzeichnenden Größen ist darauf zu achten, dass alle Faktoren, die bei der Auswertung eine Rolle spielen könnten, aufgezeichnet werden. Die Aufzeichnungen sind durch zusätzliche Kommentare zu ergänzen, speziell wenn es sich um Informationen handelt, die nicht automatisch aufgezeichnet werden können. Eine zeitsynchrone Video- und Audioaufzeichnung kann wertvolle Dienste leisten.

Da mit Einführung eines Advice Systems die Fahrweise im Vergleich zum bisherigen Zustand hinsichtlich der zu setzenden Ziele optimiert werden soll, ist es wichtig, auch den bisherigen Zustand zu dokumentieren. Hierzu sind Fahrten ohne Advice System durchzuführen, aufzuzeichnen und auszuwerten. Dies geschieht am besten zum Anfang des Testbetriebes. Dadurch sind die Tf noch unbeeinflusst vom Advice System und fahren entsprechend ihrer persönlichen Erfahrung. Weiterhin kann diese Zeit zum Funktionstest des Advice Systems genutzt werden, indem das System „blind“ mitläuft, ohne dass die Fahrempfehlungen dem Tf angezeigt werden.

Aus den Erfahrungen des Testbetriebes können wertvolle Erkenntnisse für die detaillierten Untersuchungen zum Einsatz im ganzen Netz gewonnen werden:

- Quantifizierung des Hauptnutzens und ggf. der Nebennutzen des Advice Systems unter den definierten Bedingungen (bei Systemen zur Realisierung der ESF ist der Hauptnutzen die Traktionsenergieeinsparung und der Nebennutzen die Erhöhung der Pünktlichkeit),
- Typischer Betriebsverlauf, z.B. Pünktlichkeit, Störungen, Haltezeiten,
- Fahrdynamische Daten der verwendeten Fahrzeuge,
- Qualität der projektierten Infrastrukturdaten und
- Akzeptanz des Systems bei den Tf, dem Betreiber und ggf. bei den Kunden.

Der Testbetrieb wird mit einer technischen und wirtschaftlichen Analyse abgeschlossen. In der technischen Analyse werden alle Erfahrungen zusammengefasst, die einen Einfluss auf die technische Umsetzung des Systems für den Serienbetrieb haben. Wenn größere Unzulänglichkeiten festgestellt werden, ist ggf. eine Weiterentwicklung des Systems nötig. Ist diese nicht wirtschaftlich oder technisch nicht möglich, müssen die Untersuchungen zur Einführung des Systems abgebrochen werden. Durch den Testbetrieb können der Haupt- und

ggf. die Nebennutzen des Systems besser als in den Voruntersuchungen bestimmt werden. Daraus folgt, dass die Wirtschaftlichkeitsberechnung mit einem geringeren Risiko durchgeführt werden kann. Häufig wird jedoch auf die Wirtschaftlichkeitsrechnung verzichtet und erst nach den detaillierten Untersuchungen zum Einsatz im ganzen Netz durchgeführt.

Beispiel: Testbetrieb bei TransAdelaide

Von Ende Juli bis Mitte August 2002 wurden bei TransAdelaide Tests mit dem System Siemens METROMISER durchgeführt [Siegmann-2002]. Der Testbetrieb wurde gemeinsam vom Betreiber TransAdelaide und vom Hersteller Siemens vorbereitet und finanziert. Für die Durchführung und Bewertung wurde ein externer Consultant beauftragt[1], der zusammen mit einem Mitarbeiter des Siemens Vertriebs und jeweils einem von fünf ausgewählten Triebfahrzeugführern alle Fahrten begleitet hat.

Der Testbetrieb wurde auf der ***Gawler Line***, der längsten Strecke auf dem Netz von TransAdelaide, durchgeführt (→ Anhang F.2.1). Es wurde ein zweiteiliger Zug der Class 3000/3100 eingesetzt. Die Strecken-, Fahrzeug- und Fahrplandaten wurden anhand von Unterlagen mit dem ***Time Table Optimiser*** projektiert. Fehlerhafte oder ungenaue Projektierungsdaten mussten während des Testbetriebes berichtigt werden. Das Fahrzeug wurde mit einer mobilen ***On Board Unit*** ausgestattet (Bild 60). Da nur eine On Board Unit zur Verfügung stand und keine Kabel zu dem zweiten Führerstand gezogen werden konnten, wurden die Fahrempfehlungen bei der Rückfahrt per Funk durchgegeben. Wegimpulszähler, Türkontakt und Rollsignal wurden provisorisch angeschlossen. Der Kraftstoffverbrauch konnte nicht gemessen werden, stattdessen wurde die elektrische Leistung der Fahrmotoren gemessen und sekündlich aufgezeichnet. Durch eine gute Vorbereitung konnte das System innerhalb von wenigen Stunden in Betrieb genommen und am nächsten Tag im regulären Betrieb eingesetzt werden.

Die Einsatzplanung sah für das ausgerüstete Fahrzeug fünf Umläufe pro Tag vor, d.h. maximal zehn Fahrten á 42 km konnten pro Tag begleitet werden. Die Fahrten hatten teilweise sehr unterschiedliche Fahrpläne. Das Spektrum reichte von Fahrten, bei denen an allen 25 Stationen gehalten wurde, bis zu Expressfahrten, bei denen bis zu 20 km ohne Halt durchgefahren wurde.

Die Fahrten wurden durch eine interne fahrdynamische Aufzeichnung, durch eine manuelle Aufzeichnung von wichtigen Ereignissen und durch die Aufzeichnung der elektrischen Leistung protokolliert. Alle relevanten Daten wurden in einer Datenbank zusammengefasst (→ Abschnitt 5.5).

[1] Der Autor dieser Arbeit hat den Testbetrieb begleitet und war für die Bewertung und Berichtserstellung maßgeblich verantwortlich.

Insgesamt wurden 36 Fahrten (18 pro Richtung) ohne Fahrempfehlung und 32 Fahrten (16 pro Richtung) mit Fahrempfehlung aufgezeichnet. Einige Fahrtabschnitte konnten durch technische oder ungewöhnliche betriebliche Störungen nicht in der Auswertung berücksichtigt werden.

Die Fahrten ohne Fahrempfehlung zeigten das bisher typische Fahrverhalten. Alle Fahrer berücksichtigten kurze Rollphasen vor dem Bremsen. Die Länge der Rollphase war von Fahrer zu Fahrer verschieden, keiner passte sie jedoch dynamisch der aktuellen Betriebslage an. Vielmehr hatte jeder Fahrer auf jedem Abschnitt seine persönliche „Markierung“ (z.B. ein Baum oder ein Signal) ab der er die Zugkraft auf Null stellte.

Bei den Fahrten mit Fahrempfehlung war die Akzeptanz bei den Tf erstaunlich hoch. Nach anfänglicher Skepsis wurden die Fahrempfehlungen fast immer sofort umgesetzt. Bei pünktlicher oder nur leicht verspäteter Abfahrt konnten sehr lange Rollphasen realisiert werden. Obwohl es sich bei allen eingesetzten Tf um sehr erfahrene Fahrschullehrer handelte, waren sie alle überrascht, welch lange Strecken gerollt werden können, ohne dass die Sollfahrzeit überschritten wird. Bei großen Verspätungen wurden keine Rollphasen empfohlen. Dies führte im Vergleich zur manuellen Fahrweise zu leichten Fahrzeitgewinnen, jedoch auch zu leicht erhöhtem Energieverbrauch.

Insgesamt konnte durch den Einsatz des Siemens METROMISER eine Energieeinsparung von ca. 8 % nachgewiesen werden. Da die Projektierungsdaten teilweise mit Fehlern behaftet und die Testfahrten zeitweise mit untypischen Störungen verbunden waren, kann davon ausgegangen werden, dass im Regelbetrieb eine etwas höhere Einsparung erzielt werden kann.

Eine vollständige Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wurde nicht durchgeführt.

Bild 60: Mobile On Board Unit und Lampen zur Anzeige der Fahrempfehlung

7.3.5 Detaillierte Untersuchungen zum Einsatz im ganzen Netz

Sind durch den Testbetrieb die typischen betrieblichen Störungen erfasst und ist das Simulations- und Optimierungsmodell anhand der aufgezeichneten Fahrten den realen Bedingungen angepasst, kann der Nutzen der Systemeinführung im ganzen Netz bewertet werden.

Zunächst müssen die relevanten Infrastrukturdaten des gesamten Netzes sowie die fahrdynamischen Daten der verkehrlich eingesetzten Fahrzeuge erfasst und projektiert werden. Zur Bestimmung der fahrdynamischen Fahrzeugdaten sind ggf. Ausrollversuche durchzuführen und auszuwerten (→ Abschnitt 5.3.3). Ggf. können die Aufzeichnungen aus dem Testbetrieb hierfür verwendet werden.

Die Qualität der Abschätzung des Nutzens eines Advice Systems ist von vier Faktoren abhängig:

- Auswahl der zu simulierenden Fahrten:
  Es können nicht alle Fahrten des Fahrplans simuliert werden, da dieser Aufwand wirtschaftlich nicht vertretbar wäre. Deshalb müssen für jede Strecke und jeden Fahrzeugtyp einzelne, möglichst repräsentative Fahrten ausgewählt werden. Hierzu werden Kategorien gebildet und jede Fahrt einer Kategorie zugeordnet. Für jede Kategorie werden nun ein bis drei Fahrten zur Simulation ausgewählt. Zur Ermittlung des Gesamtnutzens werden die Gesamtkilometer aller Fahrten der jeweiligen Kategorie innerhalb einer definierten Zeitspanne (z.B. einer Woche) ermittelt und der Einzelnutzen anteilig hochgerechnet.

- Auswahl der zu simulierenden Fahrweisen:
  Meist genügt die Simulation der straffen, der praktizierten und der optimierten Fahrweise (→ Abschnitt 5.4). Während die straffe und die optimierte Fahrweise eindeutig anhand von definierten Kriterien simuliert werden können, ist dies bei der praktizierten Fahrweise nicht möglich, da sie vom jeweiligen Fahrer abhängt. Die durchschnittliche praktizierte Fahrweise kann z.B. näherungsweise ermittelt werden, indem vor jeder Bremsung eine kleinere Rollphase berücksichtigt wird.

- Auswahl der zu berücksichtigenden betrieblichen Störungen:
  Die betrieblichen Störungen haben einen erheblichen Einfluss auf die Fahrweise. Dieser Einfluss ist nur schwer pauschal abzuschätzen. Deshalb sollte der Einfluss typischer Störungen einzeln und ggf. auch in Kombination mit anderen Störungen durch Simulationen berechnet werden. Zumindest der Einfluss einer verspäteten Abfahrt sollte untersucht werden. Wenn weitere typische Störungen identifiziert und quantifiziert werden können, sind auch diese zu untersuchen. Für jeden Störungstyp müssen alle Fahrweisen simuliert werden.

- Bildung von Szenarien:
  Anhand von Szenarien kann die Häufigkeit von Störungen und die Befolgungsrate der Fahrempfehlungen untersucht werden. Für jedes Szenario ist der prozentuale Anteil jedes Störungstyps sowie der Befolgungsrate zu definieren. Daraus kann dann der spezifische Anteil jeder Fahrweise bestimmt werden.

Jede Kombination aus Fahrt, Fahrweise und Störungsniveau muss simuliert und anhand der definierten Kriterien bewertet werden. Im Falle der ESF ist das Kriterium der Energieverbrauch. Unter Berücksichtigung des Anteils der einzelnen Fahrt an der gesamten Streckenverkehrsleistung können der wöchentliche Energieverbrauch und die wöchentliche Gesamtfahrleistung jeder Kombination bestimmt werden. Diese bilden die Grundlage zur Berechnung des Nutzens für jedes Szenario.

Beispiel: Detaillierte Untersuchungen bei TransAdelaide

Im Anschluss an den Testbetrieb wurde der Einsatz des Systems Siemens METROMISER auf dem Netz von TransAdelaide bewertet [Siegmann-2003]. Die Untersuchungen wurden vom selben externen Consultant durchgeführt, der auch den Testbetrieb begleitet hat. Die Kosten hierfür wurden von dem Betreiber TransAdelaide und dem Hersteller Siemens gemeinsam getragen.

Für jede der sechs Linien wurden Kategorien gebildet und die einzelnen Fahrten den Kategorien zugeordnet. Fahrten, die sehr selten auftreten, wurden nicht berücksichtigt. Insgesamt wurden 63 Fahrten ausgewählt, die über 2.500 Fahrten pro Woche repräsentieren und denen eine Gesamtlaufleistung von über 67.000 km pro Woche zugeordnet werden kann.

Neben der straffen Fahrweise und der energiesparsamen Fahrweise wurde eine angenommene praktizierte Fahrweise betrachtet. Bei dieser Fahrweise wird davon ausgegangen, dass der Tf vor jedem relevanten Bremsbeginn für ca. 10 s rollt, wenn die Fahrdynamik dies zulässt. Dies entspricht in etwa den Beobachtungen während des Testbetriebes.

Betriebliche Störungen wurden durch eine verspätete Abfahrt berücksichtigt. Diese Störungskategorie wurde während des Testbetriebes häufig beobachtet, während andere betriebliche Störungen eher selten auftraten.

Es wurden fünf Szenarien definiert. Szenario 0 entspricht dem bisherigen Betriebszustand ohne ein Advice System. Die anderen Szenarien basieren auf der Einführung des METROMISER. Sie werden aus den Kombinationen aus zwei verschiedenen Befolgungsraten (70 % und 90 %) und zwei unterschiedlichen Verspätungsniveaus gebildet (Tabelle 25).

Für jede Kombination aus Linie und Szenario wurde der durchschnittliche spezifische Energieverbrauch sowie die Einsparung der Szenarien I bis IV gegenüber dem heutigen Betrieb ermittelt. Zuletzt wurde für jedes Szenario entsprechend der Fahrleistung auf jeder Strecke der mittlere Energieverbrauch im gesamten Netz berechnet. Die relative Einsparung gegenüber dem heutigen Betrieb lag je nach Szenario zwischen ca. 9 % und 16 %.

Eine vollständige Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wurde nicht durchgeführt.

	Szenario 0 Bisheriger Betrieb	**Szenario I** Gleiches Verspätungs-niveau Akzeptanz: 70 %	**Szenario II** Gleiches Verspätungs-niveau Akzeptanz: 90 %	**Szenario III** Verbessertes Verspätungs-niveau Akzeptanz: 70 %	**Szenario IV** Verbessertes Verspätungs-niveau Akzeptanz: 90 %
Akzeptanz	0,0 %[1]	70,0 %	90,0 %	70,0 %	90,0 %
Pünktliche Abfahrt	25,0 %	25,0 %	25,0 %	40,0 %	40,0 %
1 min Verspätung bei der Abfahrt	50,0 %	50,0 %	50,0 %	50,0 %	50,0 %
Verspätung > 1 min → Straffe Fahrweise	25,0 %	25,0 %	25,0 %	10,0 %	10,0 %
Fahrweise	Anteil der Fahrweise im jeweiligen Szenario				
Straffe Fahrweise	25,0 %	25,0 %	25,0 %	10,0 %	10,0 %
Praktizierte Fahrweise: pünktliche Abfahrt	25,0 %	7,5 %	2,5 %	12,0 %	4,0 %
Praktizierte Fahrweise: 1 min Verspätung	50,0 %	15,0 %	5,0 %	15,0 %	5,0 %
ESF: pünktliche Abfahrt	0,0 %	17,5 %	22,5 %	28,0 %	36,0 %
ESF: 1 min Verspätung	0,0 %	35,0 %	45,0 %	35,0 %	45,0%

Tabelle 25: Beispiel zur Definition von Szenarien [Siegmann-2003]

7.3.6 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

Durch den Testbetrieb und die detaillierten Untersuchungen kann der voraussichtliche Nutzen des Systems gut abgeschätzt werden. Im Falle der ESF ist der Nutzen in Form einer jährlichen Einsparung an Traktionsenergiekosten quantifizierbar. Dem Nutzen stehen die Investitions- und Betriebskosten entgegen. Die Wirtschaftlichkeit einer Systemeinführung für den Betreiber kann mit der ***Discounted-Cash-Flow-Methode*** ermittelt werden (→ Abschnitt 6.2).

Die Wirtschaftlichkeit eines Advice Systems wird maßgeblich von den Investitionskosten geprägt. Bei den aktuellen Energiepreisen ist die Einführung eines Advice Systems zur Realisierung der ESF meist nur dann wirtschaftlich, wenn damit zusätzlicher Nutzen verbunden ist. Die Wirtschaftlichkeit kann durch die gemeinsame Nutzung eines Bordcomputers für unterschiedliche Zwecke deutlich gesteigert werden. Damit lassen sich zumindest die Hardware- und Einbaukosten in Relation zum Nutzen senken.

[1] Kein Advice System → keine Befolgung einer Fahrempfehlung

Beispiel: Wirtschaftlichkeit der Einführung eines Advice Systems bei TransAdelaide

Achtung: *Eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung mit der Discounted-Cash-Flow-Methode unter Berücksichtigung aller relevanten Informationen wurde nicht durchgeführt!*
TransAdelaide wird zunächst auf die Einführung eines Advice Systems verzichten, da Siemens sein Angebot für das System METROMISER aufgrund von anstehenden Plattformänderungen zurückgezogen hat.
Zur Demonstration des prinzipiellen Vorgehens werden hier geschätzte Zahlen verwendet, die von den realen Zahlen deutlich abweichen können, d.h. eine Aussage, ob ein Advice System für TransAdelaide wirklich wirtschaftlich ist, kann hier nicht getroffen werden!

Annahmen:

Zinssatz:	$r_t = 4\ \%$	für alle Perioden
Energiekosten:	0,05 €/kWh	für alle Perioden
Periodenanzahl:	8 Jahre	
Szenarien:	lt. Tabelle 25	

Mittlere Energieeinsparung gegenüber der bisherigen Fahrweise:

Szenario 1:	9 %
Szenario 2:	11 %
Szenario 3:	13 %
Szenario 4:	16 %

Anfangskosten (Investitionen) für insgesamt 62 Züge und stationäre Einrichtungen: 926.000 €

Laufende Kosten: 29.320 € / Jahr

Zug-Laufleistung: 4.000.000 km / Jahr mit Einsatz des Advice Systems

Discounted-Cash-Flow:

Szenario	DCF nach 8 Jahren	Break Even
Szenario 1:	-432.000 €	19 Jahre
Szenario 2:	-286.000 €	13 Jahre
Szenario 3:	-140.000 €	10 Jahre
Szenario 4:	78.000 €	8 Jahre

In diesem Modell wäre die Investition in ein Advice System innerhalb von 8 Jahren nur wirtschaftlich, wenn eine Akzeptanz von mind. 90 % erreicht und das Verspätungsniveau verbessert wird.

7.4 Systemeinführung

Wenn die Wirtschaftlichkeit nachgewiesen wurde und der Entscheid zur Einführung eines Advice Systems gefallen ist, muss die Systemeinführung geplant und vorbereitet werden.

7.4.1 Projektierung

Für den Serienbetrieb müssen alle Strecken-, Fahrzeug- und Fahrplandaten genau projektiert werden. Hierbei sind alle vorhersehbaren Fahrten im Jahresfahrplan zu berücksichtigen. Während sich Strecken- und Fahrzeugdaten nur selten ändern, müssen die Fahrplandaten mindestens zu jeder Fahrplanperiode angepasst werden. Betreiber, die ihren Fahrplan EDV-gestützt gestalten, sollten auf eine automatische Übernahme der Fahrplandaten achten.

7.4.2 Ausrüstung der Fahrzeuge

Die Ausrüstung der Fahrzeuge ist meist nicht sehr aufwändig, wenn alle nötigen Sensoren zur Verfügung stehen und ein geeigneter Einbauplatz vorhanden ist. Die Erfahrungen aus dem ersten Testbetrieb des Siemens METROMISER bei der Stuttgarter Straßenbahn (SSB) zeigen, dass der solide Einbau in wenigen Stunden möglich ist. Dieser sollte möglichst vorgenommen werden, wenn das Fahrzeug sowieso für Wartungsarbeiten in der Betriebs- oder Hauptwerkstatt ist. Schwieriger wird es, wenn umfangreiche Arbeiten zu erledigen sind, z.B. das Verlegen von Kabeln durch den ganzen Wagenkasten oder die Installation einer Antenne auf dem Dach.

7.4.3 Stationäre Ausrüstung

Bei den meisten Advice Systemen kann auf eine Streckenausrüstung verzichtet werden. Lediglich die Systeme zur Datenversorgung und Kommunikation müssen installiert und eingerichtet werden.

Wird ein WLAN als Kommunikationsmedium zur Datenversorgung eingesetzt, müssen die Betriebshöfe mit Access Points ausgestattet werden. Die funktechnische Vermessung des Geländes war bisher recht aufwändig. Durch die rasante Verbreitung von WLAN im geschäftlichen und privaten Umfeld gibt es hierfür jedoch inzwischen eine Vielzahl von Hilfsmitteln und erfahrenen Netzwerktechnikern. Vor Inbetriebnahme des prinzipiell recht unsicheren WLAN muss ein Sicherheitskonzept zur Abwehr von Angriffen und Eindringlingen erstellt, implementiert und getestet sein. Hierfür sind jedoch inzwischen universelle Lösungen verfügbar.

7.4.4 Schulung des Personals

Von der Einführung und dem Betrieb eines Advice Systems sind verschiedene Bereiche des Personals betroffen, die sich auf unterschiedlichen Ebenen mit dem System vertraut machen müssen. Hierzu sind Schulungen unerlässlich, um den Erfolg und die Akzeptanz des Advice Systems nicht zu gefährden (Tabelle 26).

Abteilung / Personalgruppe	Art und Inhalt der Schulung
• Management • Abteilungsleiter Fahrzeuge • Abteilungsleiter Fahrplan • Abteilungsleiter IT	Präsentation und Unterlagen vom Hersteller: • Funktionsprinzip des Systems • Komponenten des Systems • Benötigte Daten und Datenqualität
• IT-Abteilung	Schulung durch den Hersteller: • Funktionsprinzip des Systems • IT-Komponenten des Systems • Benötigte Netzwerktechnik • Anbindung an Unternehmens-Netzwerk • Planungssoftware • Ggf. Wartung von Netzwerktechnik und Software
• Abteilung Fahrzeuge • Werkstatt/Wartung	Schulung durch Hersteller im Rahmen von Vorträgen, Vorführungen und Training im Betrieb: • Funktionsprinzip des Systems • Komponenten • Schaltpläne • Funktionstest • Bedienung • Wartung/Austausch von Komponenten
• Fahrlehrer • Einzelne Triebfahrzeugführer	Schulung durch Hersteller im Rahmen von Vorträgen, Vorführungen und Training im Betrieb: • Aufgaben und Nutzen des Systems • Funktionsprinzip des Systems • Bedienung Fahrzeuggerät
• Fahrplaner • Abteilung Fahrzeuge	Schulung durch Hersteller bzw. IT-Abteilung im Rahmen von Vorträgen, Vorführungen und Training im Betrieb: • Aufgaben und Nutzen des Systems • Funktionsprinzip des Systems • Bedienung Planungstool • Datenversorgung
• Triebfahrzeugführer	Schulung durch Fahrlehrer im Rahmen von Vorträgen, Vorführungen und Training im Betrieb: • Aufgaben und Nutzen des Systems • Funktionsprinzip des Systems • Bedienung Fahrzeuggerät

Tabelle 26: Schulungsbedarf Personal

Da im nicht automatisierten Betrieb letztendlich die Tf für die Umsetzung einer Fahrempfehlung verantwortlich sind, ist die Schulung der Tf besonders wichtig. Die Erfahrung aus mehreren Testbetrieben zeigt, dass nur gut geschulte Tf ein Advice System akzeptieren und dessen Fahrempfehlungen umsetzen. Hierbei genügt es jedoch nicht, die Tf lediglich in die Bedienung des Systems einzuweisen. Vielmehr muss ein Verständnis über die Aufgaben und die prinzipielle Funktionsweise des Systems vermittelt werden. Damit werden die Erwartungen der Tf an das System beeinflusst, so dass sie weitestgehend der realen Funktionalität des Systems entsprechen. Daraus folgt, dass die Erwartungen im realen Betrieb weitestgehend erfüllt werden und das System eine hohe Akzeptanz hat (→ Abschnitt 4.6.1).

7.4.5 Einführung des Systems in den normalen Betrieb

Vor der Einführung in den normalen Betrieb sollte das System in einem mehrwöchigen Probebetrieb getestet und optimiert werden. Hierzu sind mehrere Fahrzeuge mit dem System auszustatten und im regulären Betrieb einzusetzen. Der Probebetrieb dient weniger dem Erreichen oder dem Nachweis des eigentlichen Zieles, sondern vielmehr der Systemoptimierung und dem Funktionstest. Weiterhin kann im Rahmen des Probebetriebes die Datenqualität überprüft und ggf. durch geeignete Maßnahmen erhöht werden. Am Anfang des Probebetriebes müssen noch nicht alle Komponenten vollständig verfügbar sein. Beispielsweise reicht es, wenn die Datenversorgungs- und Kommunikationseinrichtungen nur temporär oder örtlich beschränkt verfügbar sind.

Zunächst kann der Probebetrieb auf ein oder zwei Linien begrenzt werden. Vor der Einführung in den Serienbetrieb muss der Probebetrieb jedoch auf das ganze Netz ausgedehnt werden. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Datenqualität auf dem ganzen Netz ausreichend ist.

Am Ende des Probebetriebes müssen alle Komponenten installiert und funktionsfähig sein. Nach der Freigabe kann der Serienbetrieb aufgenommen werden. Zu diesem Zeitpunkt müssen alle betroffenen Mitarbeiter geschult sein, so dass sie das System mit hoher Motivation und Akzeptanz verwenden.

7.5 Laufende Systembewertung

Während der Betriebsdauer sollte das Advice System regelmäßig, z.B. nach jeweils zwei Jahren, technisch und wirtschaftlich bewertet werden. Das System muss sich dabei an den zugesicherten Eigenschaften und den wirtschaftlichen Annahmen, die zur Systemeinführung geführt haben, messen lassen. Da in den ersten Monaten nach der Systemeinführung immer mit „Kinderkrankheiten“ zu rechnen ist, sollte dieser Zeitraum in der Bewertung nicht berücksichtigt werden.

In der nachträglichen Wirtschaftlichkeitsanalyse werden die realen Investitionskosten sowie die laufenden Kosten und Erträge der bisherigen Betriebsjahre erfasst. Anhand dieser Zahlen werden die Kosten und Erträge für die folgenden Jahre hochgerechnet. Auch für die nachträgliche Wirtschaftlichkeitsanalyse kann die Discounted-Cash-Flow-Methode angewandt werden. Der DCF bezieht sich auch dann noch auf den Zeitpunkt des Systementscheids. Selbst wenn der DCF negativ werden sollte, bedeutet dies noch nicht, dass das System sofort stillgelegt werden sollte. Dies ist nur dann ratsam, wenn die laufenden Kosten die laufenden Erträge überschreiten.

Die in der nachträglichen Systembewertung gewonnenen Erkenntnisse dienen nicht nur zur Bestätigung bzw. Infragestellung der Systementscheidung, sondern sie können auch wertvolle Informationen für zukünftige Entscheidungen liefern. Deshalb sollte auch der Systemhersteller in die Bewertung einbezogen werden.

8 Fazit und Ausblick

Die Gründe zur Optimierung der Fahrweise sind vielseitig (→ Abschnitt 1.3). Letztendlich dienen sie jedoch immer zur Steigerung der Effizienz und der Wirtschaftlichkeit des Bahnbetriebs. Obwohl sich schon Generationen von Ingenieuren mit der Optimierung von Fahrweisen befasst haben und erste computergestützte Advice Systeme zur Realisierung der ESF am Markt sind, steht man erst am Anfang einer breiten Nutzung dieser Systeme.

Bei der Entwicklung und dem Betrieb von Advice Systemen muss dem Kriterium der Wirtschaftlichkeit immer eine hohe Priorität eingeräumt werden. Aber auch die Forschung muss sich dem Ziel einer wirtschaftlichen Gestaltung des Bahnbetriebs stellen und primär solche Methoden erforschen sowie Verfahren entwickeln, mit denen dieses Verkehrsmittel ein auf lange Zeit zukunftssicheres, für den Kunden attraktives Angebot darstellt.

8.1 Aktueller Stand

Die grundlegenden Algorithmen und Methoden zur Optimierung von Fahrweisen sind erforscht und im realen Betrieb verifiziert. Dennoch kann die theoretisch optimale Fahrweise häufig nicht oder nur ansatzweise realisiert werden. Dies kann folgende Ursachen haben:

1. **Die optimale Fahrweise kann nicht ermittelt werden.**

   Die Gründe hierfür sind:
   - Daten, die zur Optimierung der Fahrweise nötig sind, liegen nicht vor.
   - Die verwendeten Algorithmen sind für den Anwendungsfall nicht geeignet.
   - Die verwendeten Algorithmen können kein Optimum ermitteln.
   - Die Berechnung der optimalen Fahrweise dauert so lange, dass die Fahrt beendet ist, bevor das Ergebnis vorliegt.
   - Das Advice System ist temporär oder örtlich nicht verfügbar.

2. **Die optimierte Fahrweise kann nicht oder nur ansatzweise umgesetzt werden.**

   Mögliche Gründe:
   - Die Fahrzeugsteuerung lässt die erforderliche feine Regelung der Fahrstufe nicht zu.
   - Die fahrdynamischen Bedingungen, die der Optimierung zugrunde gelegt wurden, entsprechen nicht der Realität.
   - Betriebliche Ereignisse, die nicht vorhergesehen wurden, erfordern eine Änderung der Fahrweise.
   - Der Tf akzeptiert die Fahrempfehlung nicht.

Durch technische Systemverbesserungen sowie durch organisatorische und betriebliche Maßnahmen können - im Vergleich zum derzeitigen Status quo - sowohl die Qualität der Fahrempfehlung als auch die Umsetzung der Fahrempfehlung noch deutlich verbessert werden. Obwohl dadurch die Bedeutung der oben genannten Aspekte abnimmt, ist es jedoch nahezu unmöglich, alle Fahrten „optimal“ durchzuführen.

8.2 Entwicklungsstrategie

Die zu verfolgende Strategie bei der Neu- und Weiterentwicklung eines Advice Systems bzw. der zugrunde liegenden Algorithmen und Methoden ist maßgeblich von der zu erwartenden Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Maßnahme abhängig. Hierbei muss die Wirtschaftlichkeit aus Sicht des Betreibers und aus Sicht des Systemherstellers berücksichtigt werden (Bild 61).

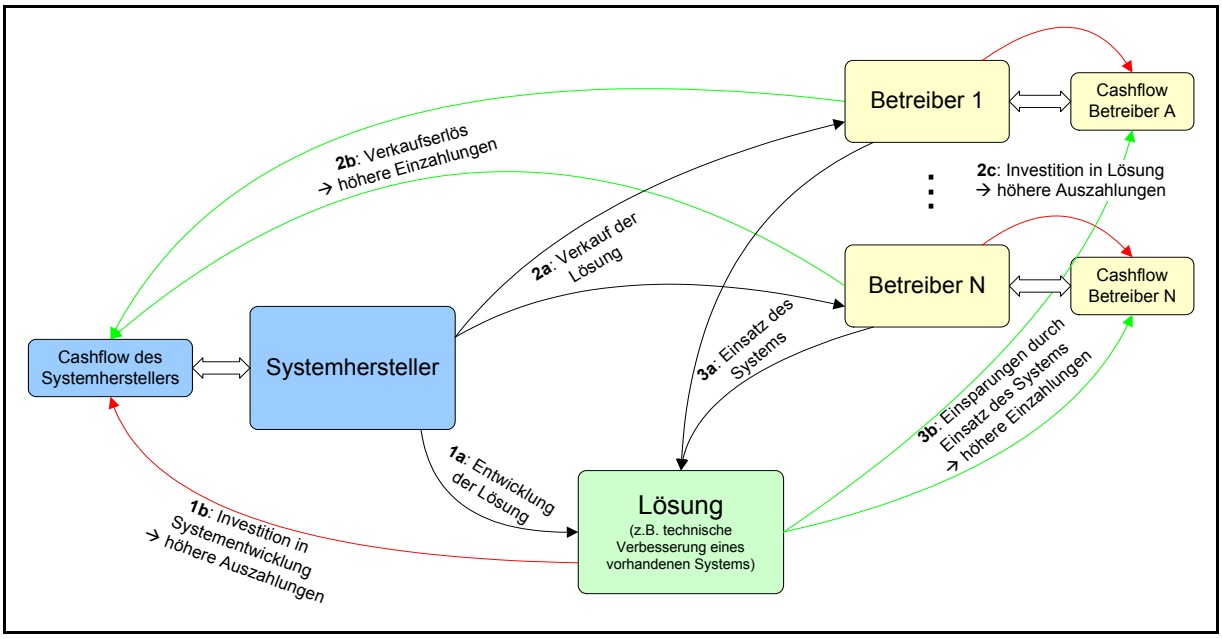


Bild 61: Auswirkung einer Investition in ein (weiterentwickeltes) Advice System auf den Cashflow der Betreiber und des Systemherstellers

Der Systemhersteller entscheidet über die Neu- bzw. Weiterentwicklung eines Advice Systems. Die Wirtschaftlichkeit seiner Systementscheidung ist im Wesentlichen von den jeweiligen Entwicklungskosten sowie vom Verkaufserlös der veräußerten Systeme abhängig. Der Verkaufserlös ist - vereinfacht ausgedrückt - das Produkt aus der Anzahl der Systeme und dem Erlös pro System. Der maximal zu erzielende Gewinn pro System ist u.a. von der Wirtschaftlichkeit des Systems aus Sicht des Betreibers abhängig, da ein Betreiber nur in ein für ihn wirtschaftliches Advice System investieren wird. Für die Entwicklungsstrategie bedeutet dies, dass mit dem neuen System entweder ein breiterer Kreis an Betreibern angesprochen wird oder dass der Systemnutzen gesteigert wird, so dass die Wirtschaftlichkeit aus Sicht des Betreibers auch bei einem höheren Preis gegeben ist.

Da die Wirtschaftlichkeit eines Advice Systems aus Sicht des Betreibers sowohl von der Qualität und der Einhaltung der Fahrempfehlung als auch von den Entwicklungs-, Investitions- und Betriebskosten des Systems abhängig ist, muss das System so gestaltet werden, dass das Verhältnis von Kosten zu Nutzen minimiert wird. Dies gilt sowohl für die Neu- als auch für die Weiterentwicklung von Advice Systemen.

Oberstes Ziel bei der Weiterentwicklung von Methoden und Systemen zur Optimierung der Fahrweise muss die Ausweitung auf mehr Verkehrs- und Betriebsarten sowie die Erhöhung des Nutzens und der Wirtschaftlichkeit für den Betreiber sein.

Dies gilt sowohl für die Systementwicklung als auch für die industrielle und wissenschaftliche Forschung!

8.3 Entwicklungsziele

Die heute bekannten Algorithmen und Systeme zur Optimierung von Fahrweisen haben ihre Praxistauglichkeit bereits deutlich und ihre Wirtschaftlichkeit häufig bewiesen. Dennoch werden schnell technische Entwicklungsziele deutlich, die den Einsatzbereich, den Nutzen oder die Wirtschaftlichkeit von Advice Systemen verbessern könnten (Tabelle 27).

Kategorie	Beschreibung	Auswirkung auf[1] Einsatzbereich[2]	Nutzen	Wirtschaftlichkeit[3]
Algorithmen Fahrdynamik	**Unterstützte Fahrweisen** Bei den bisherigen Systemen wird meist nur reines Cruisen oder reines Coasten berücksichtigt. Durch die Kombination von Coasten, Cruisen und Fahren/Bremsen im Teillastbereich können vorgegebene Durchfahrtszeiten (z.B. von der Betriebszentrale) besser eingehalten werden. Weiterhin können durch eine optimale Kombination der Energieverbrauch und der mechanische Bremsverschleiß weiter gesenkt werden [EWSN-1996b]. Systeme, die Coasten und Cruisen sowie ggf. deren Kombination unterstützen sind vielseitiger einsetzbar. Das Spektrum reicht vom Nah- über den Fern- bis zum Güterverkehr. Bei der Entwicklung von komplexeren Fahrweisen muss jedoch immer die Umsetzung der theoretisch ermittelten Fahrweise in die Realität berücksichtigt werden (→ Kapitel 2).	++	+	+
	Lernfähigkeit von fahrdynamischen Daten Die grundlegenden Methoden zur Bestimmung von fahrdynamischen Daten in Echtzeit wurden experimentell erforscht, sind jedoch noch nicht produktiv einzusetzen (→ Abschnitt 5.3.3). Durch eine weitere Erforschung der Methoden und die Entwicklung von praxistauglichen Algorithmen kann der Einsatzbereich auf Fahrzeuge ausgeweitet werden, bei denen die fahrdynamischen Daten nicht bekannt sind.	++	+	+

Tabelle 27: Entwicklungsziele

[1] Auswirkung auf Einsatzbereich, Nutzen und der Wirtschaftlichkeit:
„++“ = sehr hohe Verbesserung; „--“ = starke Verschlechterung

[2] Die Ausweitung des Einsatzbereiches bewirkt häufig auch eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Systemherstellers, da das System bei einer höheren Anzahl an Betreibern einsetzbar ist.

[3] Wirtschaftlichkeit für den Betreiber

Kategorie	Beschreibung	Auswirkung auf Einsatzbereich	Auswirkung auf Nutzen	Auswirkung auf Wirtschaftlichkeit
Algorithmen Fahrdynamik	**Verarbeitung von kurzfristigen Fahrt-Restriktionen** Die zu verwirklichende Fahrweise ist stark von der Streckenauslastung und von kurzfristigen Störungen abhängig. Diese führen häufig zu Geschwindigkeitsrestriktionen oder gar zu einem Halt. Wenn diese Restriktionen rechtzeitig bekannt sind, können sie in die Optimierung der Fahrweise integriert werden. Zunächst müssen die Algorithmen zur Optimierung der Fahrt dahingehend erweitert werden, dass kurzfristig vorgegebene Durchfahrtszeiten in der Optimierung berücksichtigt werden. Im zweiten Schritt sollte der Einfluss dieser Systemerweiterung auf das eigentliche Optimierungsziel, z.B. den Energieverbrauch, bestimmt werden. Umgesetzt werden kann diese Erweiterung durch die Integration des Systems in die Leit- und Sicherungstechnik (s.u.). Die Verarbeitung von Fahrt-Restriktionen hat voraussichtlich in den Verkehrsarten eine hohe Bedeutung, in denen die Fahrt nicht oder nur ungenau vorauszusehen ist, z.B. im Personennah- und -fernverkehr auf hochbelasteten Abschnitten bzw. Knoten sowie im Güterverkehr.	++	+	+
System-entwicklung	**Integration in die Leit- und Sicherungstechnik** Wenn aktuelle Fahrt-Restriktionen in der Optimierung der Fahrweise berücksichtigt werden sollen, müssen Informationen aus der Leit- und Sicherungstechnik verarbeitet werden. Hierzu müssen geeignete Schnittstellen geschaffen werden. Insbesondere der Informationsaustausch mit den modernen Systemen ERTMS und ETCS (→ Abschnitt 1.7.3) kann zu einer neuen Qualität bei der Optimierung von Fahrweisen führen.	++	+	+
	Nutzung eines gemeinsamen Bordcomputers Durch die Nutzung eines gemeinsamen Bordcomputers durch mehrere IT-Anwendungen können Synergieeffekte genutzt, die Redundanz von Daten verringert und die Wirtschaftlichkeit des Systems erhöht werden (→ Abschnitt 3.6.3).	o	+	+
Fahrplan	**Optimierung des Fahrplans** Die Algorithmen zur Optimierung des Fahrplans für die ESF sind bekannt (→ Abschnitt 3.8). Bisher wurden sie jedoch allenfalls singulär angewandt und nicht in den üblichen Prozess zur Fahrplangestaltung integriert. Für andere Optimierungsstrategien als die ESF müssen die Algorithmen ggf. angepasst werden. In Ergänzung zum untersuchten Einfluss der Fahrzeitreserve auf die theoretische Fahrweise (→ Abschnitt 3.2) muss auch der Einfluss auf die Störungsempfindlichkeit und die Qualität der Fahrempfehlung im realen Betrieb untersucht werden.	o	o	o

Tabelle 27: Entwicklungsziele (Fortsetzung)

9 Zusammenfassung

Der Fahrtverlauf von Schienenfahrzeugen lässt sich im Verhältnis zu anderen Verkehrsmitteln gut vorhersehen. Der Streckenverlauf und die fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeuges sind überwiegend bekannt und können zur exakten Simulation des Fahrtverlaufs genutzt werden. Diese günstigen Systemeigenschaften ermöglichen die Optimierung der Fahrweise hinsichtlich verschiedener Ziele, z.B. der Reduzierung der Traktionsenergie, der Minderung des mechanischen Verschleißes und der örtlichen Reduzierung der Lärmbelastung.

Basierend auf den nötigen Infrastruktur-, Fahrzeug- und Fahrplandaten kann die Fahrweise in der Simulation sehr gut optimiert werden. Die Grundlagen hierfür - speziell für die energiesparsame Fahrweise - wurden schon frühzeitig entwickelt und im Rahmen dieser Arbeit zusammengefasst und hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit verbessert.

Die Übertragung der Optimierungs-Verfahren in die Praxis ist ungleich schwieriger. Bis Anfang der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts waren fast alle Bemühungen gescheitert, die Fahrweise im realen Betrieb mit technischen Mitteln zu optimieren. Die wirksamste Methode zur Optimierung der Fahrweise war - und ist teilweise heute noch - die Schulung der Triebfahrzeugführer. Hiermit kann mit sehr bescheidenen Mitteln schon ein Teil des theoretischen Optimums erreicht werden. Technische Systeme, die zu einer messbar besseren Fahrweise führen, sind aufwändig, teuer und bezüglich der Verkehrs- und Betriebsart teilweise unflexibel. Erst die rasante Entwicklung der Rechnertechnik in den letzten Jahren ermöglichte den Einsatz computergestützter Advice Systeme, die in der Lage sind, die Fahrweise onboard in Echtzeit zu optimieren und flexibel auf kurzfristige Änderungen zu reagieren. Der betrieblich-technische Erfolg eines Advice Systems ist im Wesentlichen abhängig von den verwendeten Algorithmen, der Beachtung der technischen und betrieblichen Voraussetzungen sowie der Qualität der Umsetzung in Hard- und Software. Im Rahmen dieser Arbeit wird besonders auf die Fahrzeugortung, die Datenversorgung und die zu berücksichtigenden betrieblichen Störungen eingegangen. Weitere Schwerpunkte bilden die Entwicklung serienreifer Advice Systeme und die Strategien zur Einführung eines Advice Systems in den Betrieb.

Neben diesen eher technischen Aspekten werden die Methoden zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Advice Systemen aus Sicht des Betreibers und aus Sicht des Systemherstellers eingehend untersucht. Die hierfür nötigen Verfahren zur Aus- und Bewertung von Fahrweisen werden hergeleitet. Die Akzeptanz des Systems bei den Triebfahrzeugführern wird als wesentlicher Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit identifiziert und näher untersucht.

Fazit: Moderne Advice Systeme sind in der Lage, die an sie gestellten Forderungen zur Optimierung der Fahrweise zu erfüllen. Durch eine gezielte Schulung der Triebfahrzeugführer wird eine hohe Akzeptanz erreicht.
Dennoch ist die Wirtschaftlichkeit eines Advice Systems nicht zwangsläufig gegeben, sondern muss für jeden Anwendungsfall einzeln nachgewiesen werden.

Anhang

A Fahrdynamik 175
A.1 Mechanik 175
A.1.1 Kräfte und Momente 175
A.1.2 Kräfte am Fahrzeug 176
A.1.2.1 Bestimmung der Kräfte am Fahrzeug 178
A.1.2.2 Zugkraft 178
A.1.2.3 Hangabtriebskraft 180
A.1.2.4 Bremswiderstandskraft 181
A.1.2.5 Bremshundertstel 181
A.1.2.6 Laufwiderstandskraft 182
A.1.2.7 Tunnelwiderstandskraft 183
A.1.2.8 Bogenwiderstandskraft 183
A.1.2.9 Berücksichtigung der Zuglänge 184
A.1.2.10 Resultierende Kraft 185
A.2 Kinematik 187
A.2.1 Bewegungsgleichungen 187
A.2.2 Spezielle Bewegungsgleichungen 187
A.2.2.1 Gleichförmige Bewegung 187
A.2.2.2 Gleichmäßig beschleunigte Bewegung 187
A.2.3 Fahrdynamische Grenzwerte 188

B Zugfahrtsimulation 189
B.1 Arten der Zugfahrtsimulation 189
B.2 Methoden der fahrdynamischen Berechnung 190
B.2.1 Makroschrittverfahren 190
B.2.2 Mikroschrittverfahren 191

C Beispiel zur Optimierung der Fahrweise 193

D Beispielsimulation Ortungsfehler 197

E Datenbedarf eines Advice Systems 203
E.1 Fahrzeugdaten 203
E.2 Streckendaten 204
E.3 Fahrplandaten 206
E.4 Einstellungen des Advice Systems 207

F Nahverkehrsbetreiber TransAdelaide 209

F.1 Adelaide 209
F.2 Bahnnetz TransAdelaide 209
F.2.1 Gawler Line 211
F.3 Fahrzeuge 212
F.4 Fahrplan und Akzeptanz 213

A Fahrdynamik

Die Fahrdynamik bildet die Grundlage jeder Berechnung oder Simulation von Zugfahrten. Sie beschäftigt sich mit der Längsbewegung des Fahrzeuges im Gleis.

In der Literatur wird die Fahrdynamik ausführlich beschrieben und ihre Grundlagen sowie die Formeln werden hergeleitet, u.a. in [Wende-2003], [Pachl-2002], [SFWBB-2001a] und [Linder-1993].

Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Zusammenhänge kurz zusammengefasst.

A.1 Mechanik

A.1.1 Kräfte und Momente

Die für die Fahrdynamik relevanten Bewegungen sind die Translationsbewegung des Fahrzeuges entlang der Strecke und die Rotationsbewegung der rotierenden Massen (z.B. Rad, Getriebe, Motorwelle).

Die durch die Beschleunigung a eines Körpers der Masse m hervorgerufene Kraft F_t wird mit dem Newtonschen Beschleunigungsgesetz berechnet (Gl. 25).

$$F_t = m \cdot a \qquad \text{Gl. 25}$$

Das bei der Rotationsbewegung auftretende Drehmoment M ist einerseits durch das Trägheitsmoment J und die Winkelbeschleunigung ε (Gl. 26), andererseits durch die am Radumfang auftretende Kraft F_{rot} und den Radius r definiert (Gl. 27). Daraus kann die am Radumfang auftretende Kraft F_{rot} bestimmt werden (Gl. 28).

$$M = J \cdot \varepsilon = J \cdot \frac{a}{r} \qquad \text{Gl. 26}$$

$$M = F_{rot} \cdot r \qquad \text{Gl. 27}$$

$$F_{rot} = \frac{J}{r^2} \cdot a \qquad \text{Gl. 28}$$

Die resultierende Kraft des gesamten Fahrzeuges F_r ist die Summe der translatorischen Kraft F_t und aller rotatorischen Kräfte F_{rot} (Gl. 29).

$$F_r = F_t + \sum F_{rot} = \left(m + \sum \frac{J}{r^2} \right) \cdot a \qquad \text{Gl. 29}$$

Durch Einführung des Massenzuschlages ρ (Gl. 30) bzw. des Massenfaktors ξ (Gl. 31) vereinfacht sich diese Formel (Gl. 32).

$$\rho = \frac{1}{m} \cdot \sum \frac{J}{r^2} \qquad \text{Gl. 30}$$

$$\xi = 1 + \rho \qquad \text{Gl. 31}$$

$$F_r = m \cdot a \cdot \xi \qquad \text{Gl. 32}$$

Zur Bestimmung des Massenfaktors müssen alle bewegten rotatorischen Massen und deren Trägheitsmomente bekannt sein. Der zusammengesetzte Massenfaktor ξ_z eines kompletten Zuges kann bestimmt werden, wenn die Massen m_i und die Massenfaktoren ξ_i der einzelnen Fahrzeuge bekannt sind (Gl. 33).

$$\xi_z = \frac{\sum_i \xi_i \cdot m_i}{\sum_i m_i} \qquad \text{Gl. 33}$$

Zur Abschätzung des Massenfaktors gelten die folgenden Durchschnittswerte (Tabelle 28).

Fahrzeug	Typischer Massenfaktor ξ
Elektrische Lokomotive	1,10 – 1,30
Diesellokomotive	1,05 – 1,20
Wagen	1,02 – 1,12
Kompletter Zug	1,06 – 1,09

Tabelle 28: Massenfaktoren [SFWBB-2001a]

A.1.2 Kräfte am Fahrzeug

Zur Bestimmung des Bewegungszustandes eines Fahrzeuges werden alle am Fahrzeug angreifenden longitudinalen Kräfte ermittelt und zu einer resultierenden Kraft F_r zusammengefasst. Durch diese resultierende Kraft wird das Fahrzeug beschleunigt oder abgebremst.

Die am Fahrzeug angreifenden Kräfte können in zwei Kategorien unterteilt werden. Während die → ***beschleunigenden Kräfte*** unabhängig von der momentanen Geschwindigkeit (auch im Stillstand) immer bestehen, wirken die → ***Widerstandskräfte*** immer entgegen der momentanen Fahrtrichtung abbremsend (in Richtung $v \rightarrow 0$) und können das Fahrzeug unter keinen Umständen antreiben. Die Summe der Widerstandskräfte kann maximal so groß sein, dass sie das Fahrzeug unter Berücksichtigung der beschleunigenden Kräfte zum Stillstand bringen. Im Stillstand sind sie maximal so groß wie die ihnen entgegenwirkenden beschleunigenden Kräfte.

Neben der ***absoluten Kraft*** F_x (in N) wird in der Fahrdynamik häufig mit der ***spezifischen Kraft*** f_x gerechnet, die die absolute Kraft in Beziehung zur Gewichtskraft des Fahrzeuges G (in kN) setzt (Gl. 34). Die Verwendung der spezifischen Kraft ist aber nur dort sinnvoll, wo die Kraft wirklich proportional zur Gewichtskraft ist.

$$f_x = \frac{F_x}{G} \qquad [\text{N/kN}] \qquad \text{Gl. 34}$$

Am Fahrzeug treten folgende Kräfte und Widerstände auf (Bild 62):

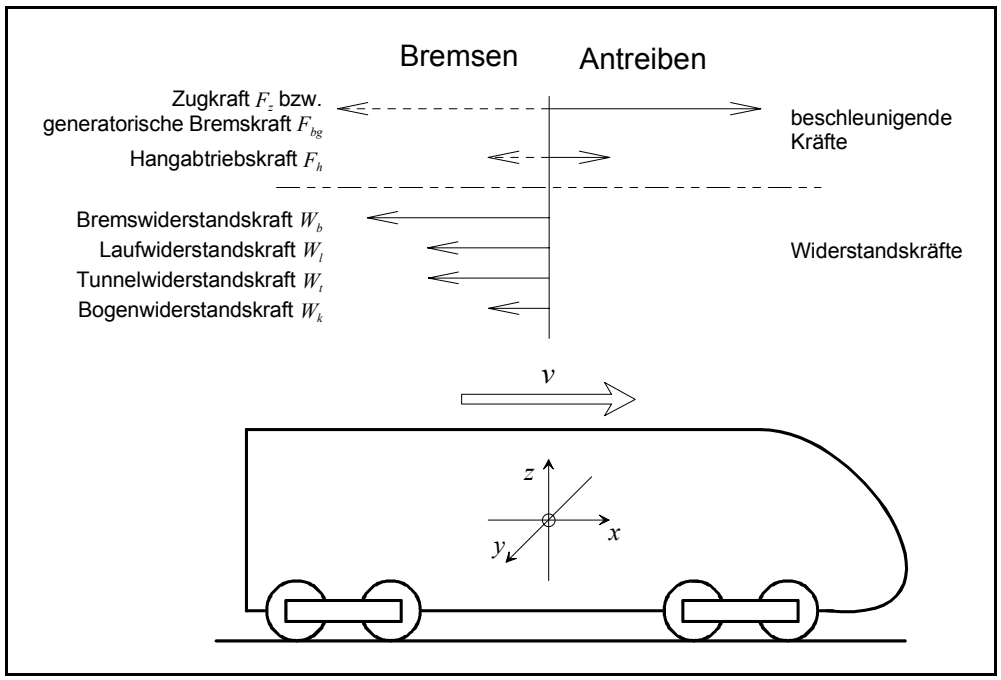


Bild 62: Kräfte am Fahrzeug

- ***Zugkraft*** F_z: Die Zugkraft wird durch den Antrieb (Motor) des Fahrzeuges erzeugt. Sie wirkt im Allgemeinen in Fahrtrichtung und treibt das Fahrzeug an. Wenn der Antrieb im Generatorbetrieb zum Abbremsen des Fahrzeuges verwendet wird, handelt es sich um eine generatorische Bremskraft.
- ***Generatorische Bremskraft*** F_{bg}: Hierbei handelt es sich um die vom Antrieb erzeugte Bremskraft entgegen der Fahrtrichtung. Sie dient zum Abbremsen des Fahrzeuges. Bei Fahrzeugen und Bahnstromnetzen mit Rückspeisemöglichkeit kann ein Teil der bei der generatorischen Bremsung umgesetzten Energie in das Netz zurückgespeist werden.
- ***Bremswiderstandskraft*** W_b: Die Bremswiderstandskraft ist die vom mechanischen Bremssystem aufgebrachte Kraft zur Verringerung der Zuggeschwindigkeit. Im Sinne der Definition gehört die vom Antrieb erzeugte generatorische Bremskraft nicht zur Bremswiderstandskraft, da es sich um eine beschleunigende Kraft handelt.
- ***Hangabtriebskraft*** F_h: Die Hangabtriebskraft ist die in Streckenrichtung wirkende Komponente der Gewichtskraft des Fahrzeuges im Steigungs- oder Gefällebereich. Sie wirkt unabhängig vom momentanen Bewegungszustand und kann das Fahrzeug im Gefälle auch aus dem Stillstand beschleunigen, sofern ihr keine ausreichend große Widerstandskraft entgegenwirkt. In der Literatur wird die Hangabtriebskraft auch als Neigungs- oder Steigungswiderstand bezeichnet.

- ***Laufwiderstandskraft*** W_l: Die Laufwiderstandskraft setzt sich aus dem Rollwiderstand zwischen Rad und Schiene, dem Lagerwiderstand, den dynamischen Widerständen aus den Schwingungswiderständen und dem Luftwiderstand zusammen.
- ***Tunnelwiderstandskraft*** W_t: Die Tunnelwiderstandskraft ist eine zusätzliche Laufwiderstandskraft, hervorgerufen durch den erhöhten Luftwiderstand im Tunnel. Sie ist abhängig von dem Tunnelquerschnitt, der Tunnellänge, dem Fahrzeugquerschnitt und der Geschwindigkeit.
- ***Bogenwiderstandskraft*** W_k: Die Bogenwiderstandskraft wird durch die Reibungskräfte beim Befahren von Gleisbögen erzeugt. Bei Fahrt im geraden Gleis ist sie nicht vorhanden. Die dann wirkenden Reibungskräfte sind in der Laufwiderstandskraft berücksichtigt.

In der Literatur werden Hangabtriebskraft und Bogenwiderstandskraft zusammen auch als ***Streckenwiderstand*** bezeichnet. Da die Hangabtriebskraft aber keine Widerstandskraft im Sinne der Definition ist, werden hier beide getrennt behandelt.

A.1.2.1 Bestimmung der Kräfte am Fahrzeug

Zur Bestimmung der einzelnen Kräfte werden häufig empirische Formeln verwendet, da die mechanische Modellierung zu komplex ist. Diese Näherungsformeln wurden jedoch üblicherweise durch langjährige Beobachtung ermittelt.

A.1.2.2 Zugkraft

Die Zugkraft eines Triebfahrzeuges wird durch zwei Grenzkräfte beschrieben:

- die leistungsbedingte maximale Zugkraft des Triebfahrzeuges, die von der Antriebsleistung und der Motorsteuerung abhängig ist und
- die maximal zwischen Rad und Schiene übertragbare Kraft, die abhängig von der Masse des Triebfahrzeuges und dem momentanen Haftreibungsbeiwert zwischen Rad und Schiene ist.

Analog zur Zugkraft wird die vom Antrieb erzeugte generatorische Bremskraft behandelt. Diese ist jedoch entgegen der Fahrtrichtung gerichtet und verzögert den Zug.

Die leistungsbedingte maximale Zugkraft kann an unterschiedlichen Orten ermittelt werden:

- ***Induzierte Zugkraft*** F_{zi}, gemessen an der Motorwelle:
  Dies ist die Zugkraft, die sich direkt aus der mechanischen Antriebsleistung der Motoren ergibt. Ausgehend vom Drehmoment der rotierenden Maschine(n) wird die induzierte Zugkraft als in Längsrichtung wirkende Kraft am Treibradumfang angegeben, ohne jedoch die Verluste im Getriebe zu berücksichtigen.
- ***Zugkraft am Treibradumfang*** F_{zt}:
  Dies ist die Zugkraft, die real an den Treibrädern wirkt. Im Gegensatz zur induzierten Zugkraft werden hier die Verluste des Getriebes berücksichtigt.

- ***Zugkraft am Zughaken*** F_{ze}:
  Dies ist die Zugkraft, die am Zughaken des Triebfahrzeuges wirkt. Dies entspricht der Zugkraft am Treibradumfang abzüglich des Laufwiderstandes des Triebfahrzeuges. Streckenwiderstände werden per Definition nicht berücksichtigt. Diese sind jedoch bei vielen Betrachtungen nicht zu vernachlässigen, so dass im Folgenden die Zugkraft am Zughaken nicht weiter berücksichtigt wird. Anders verhält es sich, wenn Aussagen zur Längsdynamik im Zug oder zur Zugkraftübertragung am Zughaken gemacht werden sollen. In diesem Fall sind alle Kräfte und Widerstände zu berücksichtigen.

Bestimmung der leistungsbedingten Zugkraft

Für jedes Triebfahrzeug existieren üblicherweise Zugkraft-Geschwindigkeits-Kennlinien, mit denen in Abhängigkeit von der Fahrstufe und der momentanen Geschwindigkeit die Zugkraft bestimmt werden kann (Bild 63).

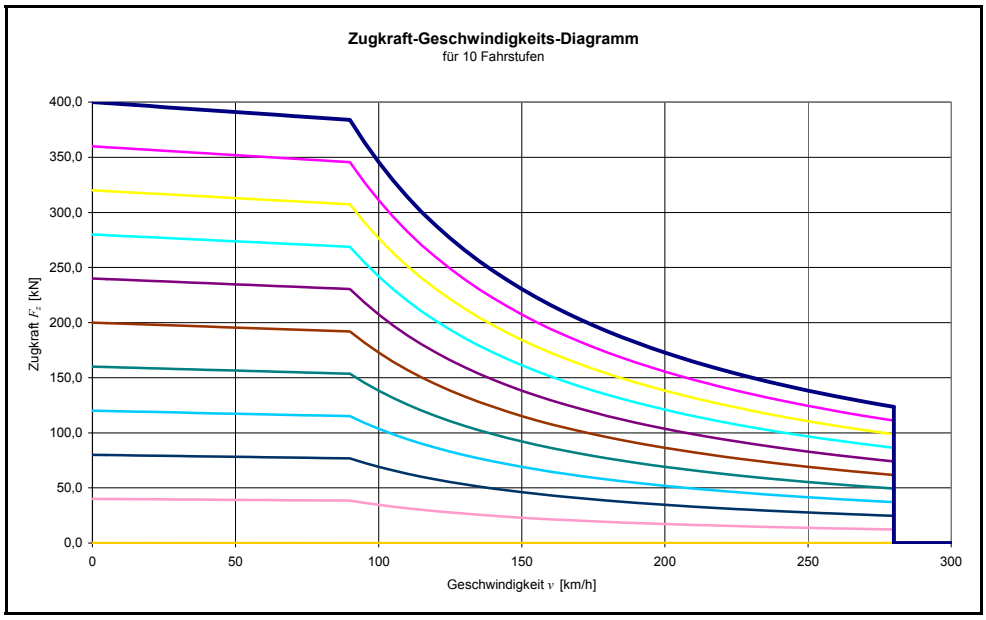


Bild 63: Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm

Wenn man von einer konstanten Leistung P und dem Wirkungsgrad des Abtriebes η_{antr} ausgeht, folgt für die maximale Zugkraft $F_{z,max}$:

$$F_{z,max} = \frac{P}{v} \cdot \eta_{antr} \qquad \text{Gl. 35}$$

Es ist zu beachten, dass die Antriebssteuerung üblicherweise eine von der Fahrstufe abhängige maximale Zugkraft und eine Übergangsgeschwindigkeit $v_{ü}$ berücksichtigt, die verhindert, dass die Zugkraft im unteren Geschwindigkeitsbereich zu groß wird. Bei der Antriebsleistung ist zwischen der → ***Dauerleistung***, der → ***Stundenleistung*** und der → ***Kurzleistung*** zu unterscheiden.

Bestimmung der maximal zwischen Rad und Schiene zu übertragenden Kraft

Beim Rad-Schiene-System müssen Beschleunigungs- und Bremskräfte über die Kontaktfläche von Rad und Schiene übertragen werden. Ab einer gewissen Kraft, der Kraftschlussgrenze $F_{z,r}$, kommt es zum Schleudern bzw. Gleiten. Diese ist abhängig von dem Kraftschlussbeiwert f_{max} und der Gewichtskraft G_r auf den angetriebenen bzw. gebremsten Radsätzen (Gl. 36).

$$F_{z,r} = f_{\max} \cdot G_r \qquad \text{Gl. 36}$$

Der Kraftschlussbeiwert ist unter anderem stark witterungsabhängig und bewegt sich im Bereich von $f_{\max} = 0{,}05$ (ungünstige Witterungsverhältnisse) bis $f_{\max} = 0{,}5$ (günstige Witterungsverhältnisse unter Laborbedingungen).

Die maximal zwischen Rad und Schiene zu übertragende Zugkraft bezieht sich immer auf den Treibradumfang. Deshalb bietet es sich an, auch die leistungsbedingte Zugkraft auf den Treibradumfang zu beziehen.

A.1.2.3 Hangabtriebskraft

Die Hangabtriebskraft ist die in Streckenrichtung wirkende Komponente der Gewichtskraft des Fahrzeuges im Steigungs- oder Gefällebereich (Bild 64).

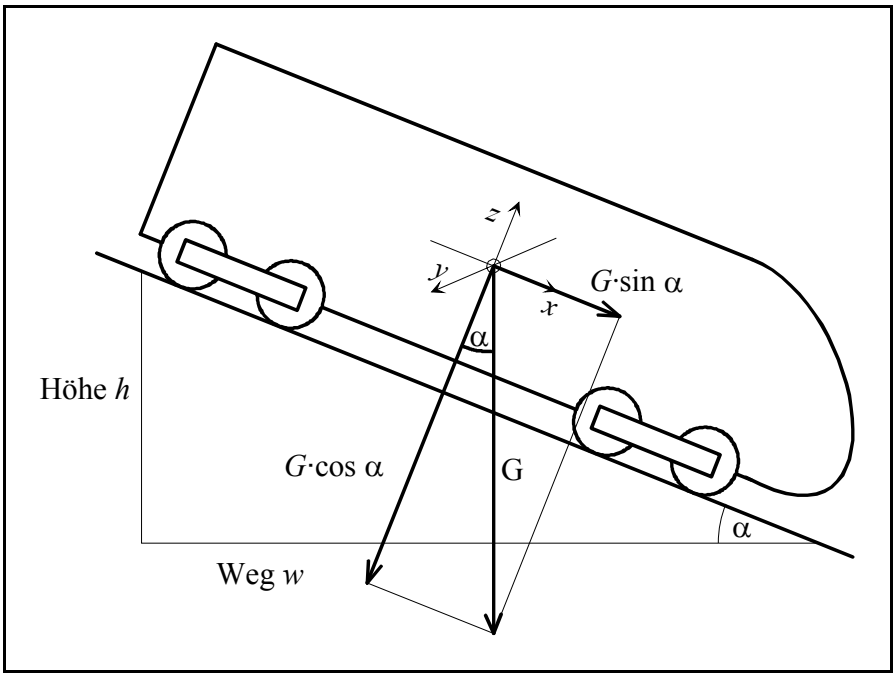


Bild 64: Hangabtriebskraft

Es gilt:

$$F_h = G \cdot \sin \alpha \qquad \text{Gl. 37}$$

Für kleine Winkel α gilt:

$$\sin \alpha \approx \tan \alpha = s = \frac{h}{w} \qquad \text{Gl. 38}$$

$$F_h = G \cdot s \qquad \text{Gl. 39}$$

A.1.2.4 Bremswiderstandskraft

Die Bremswiderstandskraft wird durch die Bremseinrichtungen des Zuges erzeugt. Sie wirkt immer der momentanen Bewegung entgegen, d.h. in Richtung Stillstand. Die vom Antrieb erzeugte generatorische Bremskraft wird hier nicht behandelt, da es sich hier per Definition um eine beschleunigende Kraft handelt.

Bremseinrichtungen sind physikalisch schwer zu beschreiben. Deshalb werden zur Beschreibung der Charakteristik üblicherweise Kennlinienfelder verwendet. Diese entsprechen von der Art den Zugkraftkennlinien, können jedoch andere Charakteristiken aufweisen.

Bei radwirksamen Bremskräften, z.B. den Radbremsen, muss die Kraftschlussgrenze analog zur Zugkraft beachtet werden.

A.1.2.5 Bremshundertstel

Die ***Bremshundertstel*** **λ** sind das prozentuale Verhältnis der im Zug wirksamen Bremsmasse m_b zur Gesamtmasse des Zuges m_z (Gl. 40).

$$\lambda = \frac{\sum m_b}{\sum m_z} \cdot 100\,\% \qquad \text{Gl. 40}$$

Die ***Bremsmasse*** ist eine Bewertungsgröße der Bremse und von der jeweiligen Fahrzeugmasse unabhängig. Sie wird in Abhängigkeit von der Bremsbauart und dem Bremssystem nach festgelegten Rahmenbedingungen in Bremsversuchen ermittelt.

Wird die Bremse in unterschiedliche Fahrzeuge eingebaut, bleibt die Bremsmasse gleich, obwohl sich die Fahrzeugmasse ändert. Wird dagegen die Bremsstellung der Bremse verändert, ändert sich die Bremsmasse, obwohl die Fahrzeugmasse gleich bleibt.

Die ***Mindestbremshundertstel*** sind ein Maß für das mindestens erforderliche Bremsvermögen eines Zuges. Sie sind für jeden Zug in der Kopfleiste des Buchfahrplans verzeichnet und abhängig von der Höchstgeschwindigkeit des Zuges, dem verfügbaren Bremsweg, der maßgebenden Neigung der Strecke sowie der Bremsart des Zuges.

A.1.2.6 Laufwiderstandskraft

Die Laufwiderstandskraft wird empirisch ermittelt, da eine analytische Herleitung unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren derzeit nicht möglich ist. Es existiert eine Vielzahl von Formeln zur Bestimmung der Laufwiderstandskraft, die für unterschiedliche Einsatzgebiete optimiert wurden. Im deutschsprachigen Raum werden häufig die Formeln von ***Strahl*** (einzelnes Fahrzeug und Güterzüge), ***Sauthoff*** (Reisezüge), ***Peters*** (ICE-1), ***Rappenglück*** (Hochgeschwindigkeits- und Triebzüge), sowie ***Jentsch und Preysing*** (Güterzüge) verwendet. Sie sind u.a. in [Wende-2003] und [SFWBB-2001a] erläutert. Aus historischen Gründen handelt es sich bei diesen Formeln häufig um Zahlenwertgleichungen, d.h. die Größen müssen exakt in den vorgegebenen Einheiten als Zahlenwert eingesetzt werden.

Da sich die meisten Formeln zur Berechnung der Laufwiderstandskraft aus einem konstanten, einem geschwindigkeitsproportionalen und einem zum Geschwindigkeitsquadrat proportionalen Anteil zusammensetzen, wird hier die dimensionsreine Gleichung nach ***Davis*** verwendet (Gl. 41, Bild 65).

$$W_l = A + B \cdot v + C \cdot (v + dv)^2 \qquad \text{Gl. 41}$$

Die Koeffizienten A, B und C sind fahrzeugspezifisch und können im Auslaufversuch bestimmt werden (→ Abschnitt 5.3.3). Mit dem Koeffizienten dv wird der Windeinfluss berücksichtigt. Die Windkomponente, die der Fahrzeugbewegung entgegenwirkt, wird der Fahrgeschwindigkeit zugeschlagen. Durch den geschwindigkeitsquadratischen Einfluss und durch den von der Windrichtung unabhängigen Einfluss aus Reibung am Fahrzeug sowie aus der Verwirbelung ist der Einfluss durch Wind im Durchschnitt immer negativ. Bei Simulationen wird deshalb meist ein Geschwindigkeitszuwachs von dv = 15 km/h angenommen.

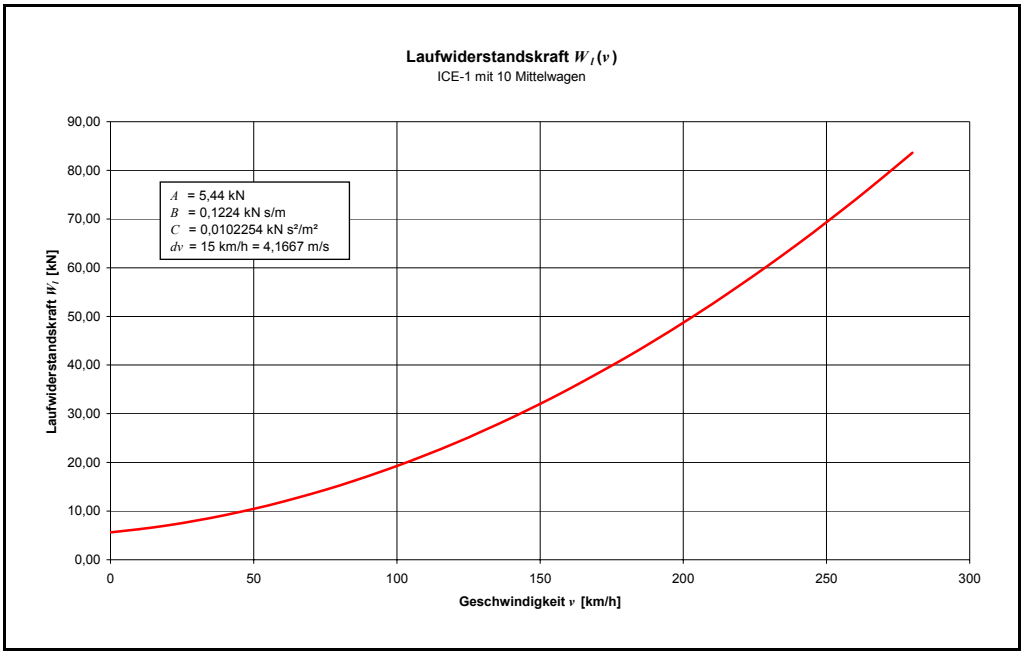


Bild 65: Laufwiderstandskraft [EWSN-1996a]

A.1.2.7 Tunnelwiderstandskraft

Bei Tunneldurchfahrten vergrößert sich der Luftwiderstand erheblich. Dieser Zuwachs muss zusätzlich zum Luftwiderstand auf freier Strecke, der in der Laufwiderstandskraft enthalten ist, berücksichtigt werden. Er ist vom Tunnelquerschnitt, der Tunnellänge dem Fahrzeugquerschnitt und der Geschwindigkeit abhängig.

Die in Simulationen verwendeten Formeln zur Bestimmung der Tunnelwiderstandskraft berücksichtigen meistens weder den Impuls, der bei Einfahrt in den Tunnel entsteht, noch den Einfluss von anderen Fahrzeugen im Tunnel. In der Zugfahrtsimulation des Hochgeschwindigkeitsverkehrs werden bei der DB AG die in [Gackenholz-1973] und [Gackenholz-1974] beschriebenen Formeln verwendet (Bild 66).

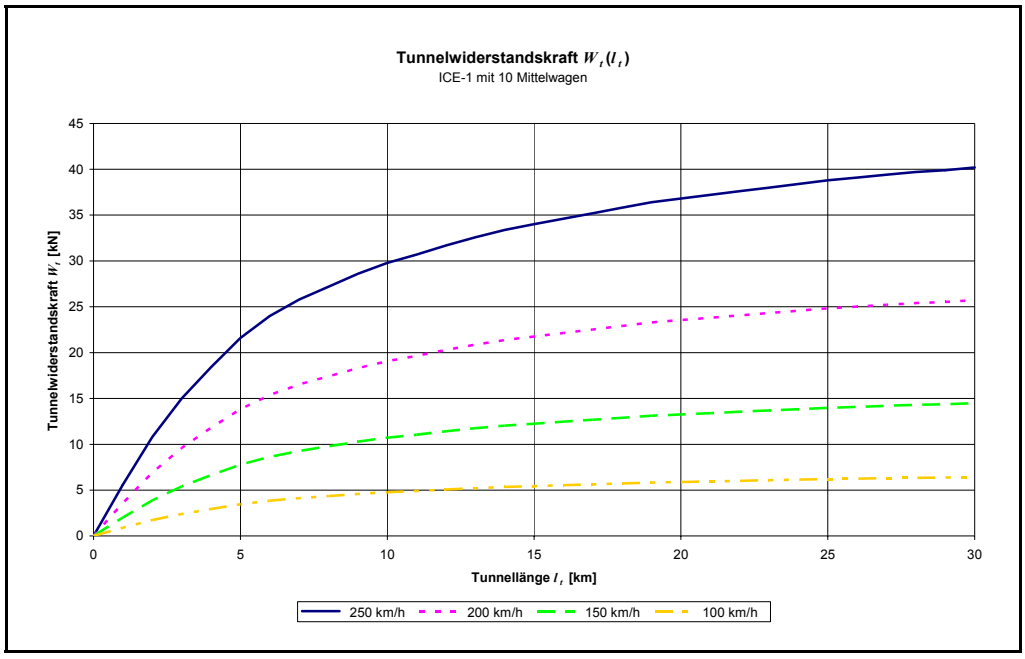


Bild 66: Tunnelwiderstandskraft [EWSN-1996a]

A.1.2.8 Bogenwiderstandskraft

Die Bogenwiderstandskraft kann analytisch nicht hergeleitet werden. Sie wird durch empirische Formeln, z.B. von ***Röckl*** (1876), ***Protopapadakis*** (1937), ***Hanker*** (1952) und ***Schramm*** (1963) u.a. in [Wende-2003] und [SFWBB-2001a] beschrieben.

Obwohl die Formel von Röckl nur wenige Parameter berücksichtigt, wird sie bei der DB AG für die meisten Berechnungen verwendet (Gl. 51, Tabelle 29, Bild 67).

$$w_k = \frac{k}{R - \Delta R} \qquad \text{Gl. 42}$$

Spurweite	R ≤ 300 m		R > 300 m	
	k	ΔR	k	ΔR
Normalspur	0,650 m	55 m	0,500 m	30 m
Meterspur	0,400 m	20 m	0,400 m	20 m
750 mm-Spur	0,300 m	10 m	0,300 m	10 m
600 mm-Spur	0,200 m	5 m	0,200 m	5 m

Tabelle 29: Parameter der spezifischen Bogenwiderstandskraft nach Röckl [Wende-2003]

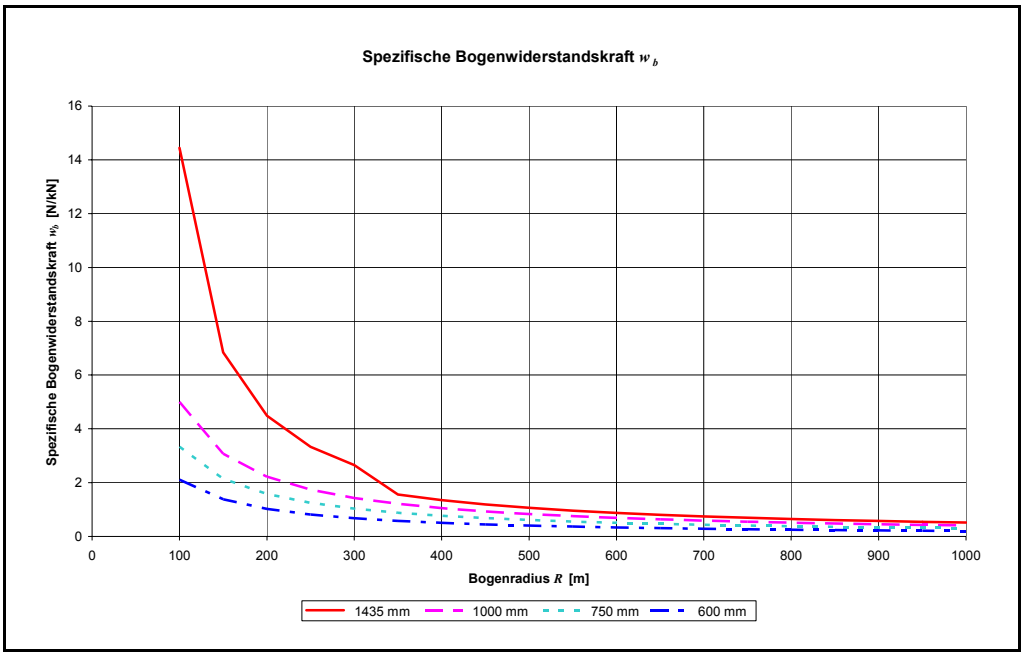


Bild 67: Spezifische Bogenwiderstandskraft

A.1.2.9 Berücksichtigung der Zuglänge

Bei der Bestimmung der ortsabhängigen Kräfte muss die Zuglänge berücksichtigt werden, wenn sich ein charakteristischer Parameter auf der Strecke zwischen Zuganfang und Zugende ändert. Hierzu werden folgende Verfahren angewendet:

- **Massepunktmodell**
  Die Zugmasse wird als Massepunkt entweder am Zuganfang oder besser in Zugmitte angenommen, d.h. die Zuglänge wird vernachlässigt. Dieses Verfahren ist zwar sehr schnell, aber auch ungenau.

- **Modellierung als Mehrmassenkörper**
  Für jeden Wagen des Zuges werden die Kräfte einzeln unter Berücksichtigung der jeweiligen Wagenposition und -masse bestimmt und aufsummiert. Da die Länge des einzelnen Wagens vernachlässigbar ist, kann die Wagenmasse als Massepunkt in Wagenmitte angenommen werden. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass es sehr genau ist und die unterschiedliche Masseverteilung im Zug berücksichtigt. Es ist aber im Verhältnis zum Massepunktmodell sehr rechenaufwändig.

- **Massebandmodell**
  Das Massebandmodell basiert auf der Annahme, dass die Zugmasse konstant über die Zuglänge verteilt ist. Durch eine Analyse der Streckendaten im Bereich des Zuges werden charakteristische Änderungen gesucht und den einzelnen Zugteilen zugeordnet. Dieses Verfahren liegt sowohl in der Qualität als auch im Rechenaufwand zwischen dem Massepunktmodell und der Modellierung als Mehrmassenkörper.

A.1.2.10 Resultierende Kraft

Die resultierende Kraft F_r ist die Differenz zwischen der Summe der beschleunigenden Kräfte und der resultierenden Widerstandskraft.

$$F_{beschl,ges} = F_z + F_h - F_{bg} \qquad \text{Summe der beschleunigenden Kräfte} \qquad \text{Gl. 43}$$

$$W_{ges} = W_b + W_l + W_t + W_k \qquad \text{Summe der Widerstandskräfte} \qquad \text{Gl. 44}$$

Die resultierende Widerstandskraft $W_{ges,res}$ ist durch die maximale Widerstandskraft W_{max} begrenzt (Gl. 45). Die maximale Widerstandskraft ist so zu bestimmen, dass zwischen ihr und der Summe der beschleunigenden Kräfte im Stillstand ein Gleichgewicht herrscht. Damit wird vermieden, dass die Widerstandskraft ein Fahrzeug antreibt.

$$W_{ges,res} = \begin{cases} W_{ges} & \text{für } W_{ges} < W_{max} \\ W_{max} & \text{für } W_{ges} \geq W_{max} \end{cases} \qquad \text{resultierende Widerstandskraft} \qquad \text{Gl. 45}$$

$$0 \leq W_{ges,res} \leq W_{ges} \qquad \text{Bereich der resultierenden Widerstandskraft} \qquad \text{Gl. 46}$$

$$F_r = F_{beschl} - W_{ges,res} \qquad \text{resultierende Kraft} \qquad \text{Gl. 47}$$

Die resultierende Beschleunigung kann aus Gl. 32 und Gl. 47 ermittelt werden (Gl. 48).

$$a = \frac{F_{beschl} - W_{ges,res}}{m \cdot \xi} \qquad \text{resultierende Beschleunigung} \qquad \text{Gl. 48}$$

A.2 Kinematik

A.2.1 Bewegungsgleichungen

Die translatorische Bewegung eines Fahrzeuges lässt sich mit folgenden Formeln beschreiben:

$$s(t) = \mathrm{f}(t) \qquad \text{Ort} \qquad \text{Gl. 49}$$

$$v(t) = \mathrm{f}'(t) = \frac{ds}{dt} = \dot{s} \qquad \text{Geschwindigkeit} \qquad \text{Gl. 50}$$

$$a(t) = \mathrm{f}''(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2} = \ddot{s} \qquad \text{Beschleunigung} \qquad \text{Gl. 51}$$

$$u(t) = \mathrm{f}'''(t) = \frac{da}{dt} = \frac{d^3 s}{dt^3} = \dddot{s} \qquad \text{Ruck} \qquad \text{Gl. 52}$$

Der Ruck hat für fahrdynamische Untersuchungen nur eine untergeordnete Bedeutung und wird nur dort berücksichtigt, wo er einen messbaren Einfluss auf Fahrzeit und/oder Energieverbrauch hat.

A.2.2 Spezielle Bewegungsgleichungen

A.2.2.1 Gleichförmige Bewegung

Die gleichförmige Bewegung beschreibt eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit v_c. Es gilt:

$$a(t) = 0 \qquad \text{Beschleunigung} \qquad \text{Gl. 53}$$

$$v(t) = v_c = const \qquad \text{Geschwindigkeit} \qquad \text{Gl. 54}$$

$$s(t) = s_0 + v_c \cdot t \qquad \text{Ort} \qquad \text{Gl. 55}$$

A.2.2.2 Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung beschreibt eine Bewegung mit einer konstanten Beschleunigung bzw. Verzögerung a_c. Es gilt:

$$a(t) = a_c = const \qquad \text{Beschleunigung} \qquad \text{Gl. 56}$$

$$v(t) = v_0 + a_c \cdot t \qquad \text{Geschwindigkeit} \qquad \text{Gl. 57}$$

$$s(t) = s_0 + v_0 \cdot t + \tfrac{1}{2} a_c \cdot t^2 \qquad \text{Ort} \qquad \text{Gl. 58}$$

Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist die Grundlage der meisten fahrdynamischen Berechnungen und Simulationen. Durch die Kombination von Gl. 57 und Gl. 58 kann die Zeit eliminiert werden. Daraus ergibt sich:

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot a_c \cdot (s_1 - s_0) + v_0^2}$$ Geschwindigkeit am Ende der Beschl. Gl. 59

$$s_1 = s_0 + \frac{v_1^2 - v_0^2}{2 \cdot a_c}$$ Position am Ende der Beschl. Gl. 60

$$a_c = \frac{v_1^2 - v_0^2}{2 \cdot (s_1 - s_0)}$$ Beschleunigung Gl. 61

A.2.3 Fahrdynamische Grenzwerte

Momentangeschwindigkeit, Beschleunigung und Bremsverzögerung sind fahrzeug- und streckenseitig sowie durch Vorschriften begrenzt. Bei der kinematischen Berechnung müssen diese berücksichtigt werden. Die Zugfahrtsimulation kennt hierfür verschiedene Möglichkeiten. In der detaillierten Fahrzeugnachbildung (→ Abschnitt B.2) wird dies häufig durch die Einbindung oder Simulation der realen Fahrzeugkomponenten sowie der realen Überwachungssysteme realisiert. Eine interne Überwachung der Grenzwerte wird meist in der fahrdynamischen Simulation einzelner Fahrzeuge und in der Netzsimulation implementiert.

B Zugfahrtsimulation

Zugfahrtsimulationen dienen u.a. zur rechnerischen Bestimmung von Fahrzeiten und des Ressourcenverbrauchs (Energie-, Fahrzeug- und Personalbedarf, etc.) von Zugfahrten. Sie bieten im Gegensatz zur Betriebsanalyse auf vorhandener Strecke mit vorhandenen Fahrzeugen eine kostengünstige und universelle Möglichkeit, die Betriebsabläufe, die Fahrzeiten und den Energieverbrauch zu ermitteln. Durch die Simulation ist es möglich, unterschiedliche Betriebsabläufe, Fahrzeuggattungen und Fahrweisen zu untersuchen, ohne dass Strecken, Fahrzeuge und Personal real existieren oder eingesetzt werden müssen. Es werden lediglich die Fahrzeugdaten (z.B. Zugkraft-Kennlinie) und die Streckenparameter (z.B. Neigungen) benötigt.

B.1 Arten der Zugfahrtsimulation

Zugfahrtsimulationen werden für unterschiedlichste Aufgaben verwendet, die jeweils spezifische Anforderungen hinsichtlich Umfang und Detaillierung haben. Im Rahmen der Optimierung von Zugfahrten haben die folgenden Arten eine Bedeutung:

- **Detaillierte Fahrzeugnachbildung**
  Eine detaillierte Fahrzeugnachbildung wird verwendet, wenn das ganze Fahrzeug oder einzelne Systeme des Fahrzeuges sehr detailliert untersucht werden müssen. Häufig werden die Simulationen in Echtzeit durchgeführt.
  Die zur Triebfahrzeugführerausbildung verwendeten Simulatoren der DB AG entsprechen weitestgehend diesem Modell. Im Rahmen der Optimierung von Zugfahrten kann diese Art der Simulation z.B. zur Untersuchung und Bewertung der Praxistauglichkeit von Advice Systemen eingesetzt werden.

- **Fahrdynamische Simulation eines einzelnen Zuges**
  Diese klassische Variante der Zugfahrtsimulation (auch ***Single-Train-on-Single-Track-Simulation*** genannt) wird meist zur Simulation von Fahrweisen genutzt. Obwohl nicht alle Fahrzeugkomponenten detailliert nachgebildet werden, werden alle fahrdynamisch relevanten Parameter berücksichtigt. Der berechnete Fahrtverlauf entspricht weitestgehend einer realen Fahrt.
  Zur Berechnung werden meist Mikroschrittverfahren (→ Abschnitt B.2.2) oder das makroskopische Runge-Kutta-Schrittverfahren (→ Abschnitt B.2.1) eingesetzt.

- **Netzsimulation**
  In der Netzsimulation werden alle Zugfahrten auf einem (Teil-)Netz quasiparallel simuliert. Sie eignet sich besonders, um den Einfluss von Systemen der Leit- und Sicherungstechnik auf den Bahnbetrieb zu simulieren. Die einzelne Zugfahrt wird meist nicht sehr detailliert betrachtet, sondern anhand von wenigen fahrdynamischen Parametern mit einem Makroschrittverfahren näherungsweise simuliert.
  Die Netzsimulation eignet sich sehr gut als Planungsinstrument in der Betriebszentrale zur Optimierung mehrer Zugfahrten im Netz.

B.2 Methoden der fahrdynamischen Berechnung

Die fahrdynamische Berechnung einer Zugfahrt basiert meist auf einer Integration der Bewegungsgleichungen mittels Schrittverfahren. Man unterscheidet Makro- und Mikroschrittverfahren [Wende-2003].

B.2.1 Makroschrittverfahren

Makroschrittverfahren verwenden eine große Schrittweite. Einfache Aufgabenstellungen können mit den Makroschrittverfahren auch ohne Rechentechnik gelöst werden. In [Wende-2003] werden die ***Simpsonsche Regel***, das ***Makrozeitschrittverfahren***, das ***Makrogeschwindigkeitsschrittverfahren*** sowie das ***Runge-Kutta-Schrittverfahren*** vorgestellt, welches im Folgenden kurz beschrieben wird.

Runge-Kutta-Schrittverfahren

Die meisten auf einem Makroschrittverfahren basierenden Simulationssysteme verwenden das Runge-Kutta-Schrittverfahren. Es verbindet eine hohe Genauigkeit mit guter Rechenzeit. Die Schrittweite Δt liegt meist im Bereich von 1 - 30 s.

Der zu simulierende Zeitbereich wird in n Zeitintervalle der Länge Δt aufgeteilt. Jedes Intervall i ($1 < i \leq n$) wird von den Stützstellen i-1 und i begrenzt. Für alle Stützstellen S_i ($0 < i < n+1$) werden die Zeit t_i und die Momentangeschwindigkeit v_i ermittelt.

Aufbauend auf den bekannten Größen t_{i-1} und v_{i-1} am Anfang des Intervalls i werden t_i und v_i am Ende des Intervalls bestimmt (Gl. 62 und Gl. 63).

$$t_i = t_{i-1} + \Delta t \qquad \text{Zeit am Ende des Intervalls} \qquad \text{Gl. 62}$$

$$v_i = v_{i-1} + \Delta v \qquad \text{Geschwindigkeit am Ende des Intervalls} \qquad \text{Gl. 63}$$

Die Geschwindigkeitsänderung Δv wird näherungsweise durch eine gewichtete Mittelwertbildung aus vier Berechnungsschritten bestimmt (Gl. 64 und Gl. 65).

$$\begin{aligned} k_1 &= \Delta t \cdot \mathrm{a}\left(t_i\,, v_i\right) \\ k_2 &= \Delta t \cdot \mathrm{a}\left(t_i + 0{,}5 \cdot \Delta t\,, v_\mathrm{i} + 0{,}5 \cdot k_1\right) \\ k_3 &= \Delta t \cdot \mathrm{a}\left(t_i + 0{,}5 \cdot \Delta t\,, v_\mathrm{i} + 0{,}5 \cdot k_2\right) \\ k_4 &= \Delta t \cdot \mathrm{a}\left(t_i + 0{,}5 \cdot \Delta t\,, v_\mathrm{i} + 0{,}5 \cdot k_3\right) \end{aligned} \qquad \text{Koeffizienten} \qquad \text{Gl. 64}$$

$$\Delta v = \frac{1}{6}\left(k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4\right) \qquad \text{Geschwindigkeitsänderung} \qquad \text{Gl. 65}$$

Die Funktion $\mathrm{a}(t,v)$ liefert die Momentanbeschleunigung zum Zeitpunkt t bei der Momentangeschwindigkeit v.

B.2.2 Mikroschrittverfahren

Zur Nachbildung exakter Zugfahrtverläufe werden Mikroschrittverfahren mit sehr kleinen Intervallen verwendet. Bei Mikroschrittverfahren wird angenommen, dass die Beschleunigung innerhalb des Intervalls konstant ist. Innerhalb des Intervalls werden die Formeln der gleichmäßig beschleunigten Bewegung verwendet (→ Abschnitt A.2.2.2, Gl. 59 - Gl. 61). Durch die Verwendung kleiner Schrittweiten wird eine hinreichende Genauigkeit erreicht.

Man unterscheidet folgende Mikroschrittverfahren:

- **Mikrozeitschrittverfahren (Δ*t*-Verfahren)**
  Basis dieses Verfahrens sind äquidistante Zeitschritte Δ*t*, die meist bei 0,1 s liegen. Mit diesem Verfahren können spezielle fahrdynamische Vorgänge, z.B. das Anfahren und Bremsen, simuliert sowie Kraftstoff- und Energieverbrauchsberechnungen durchgeführt werden.

- **Mikrowegschrittverfahren (Δ*s*-Verfahren)**
  Es werden äquidistante Wegschritte Δ*s* (meist 10 m) verwendet. An besonders markanten Stellen, z.B. an Haltepunkten oder an Neigungsänderungen, können Zwischenschritte berücksichtigt werden.

- **Mikrogeschwindigkeitsschrittverfahren (Δ*v*-Verfahren)**
  Beim Mikrogeschwindigkeitsschrittverfahren werden Intervalle mit gleich bleibenden Geschwindigkeitsschritten Δ*v* (meist 0,1 m/s) berechnet. Bei kleinen Beschleunigungen, d.h. bei Annäherung an die Beharrung, muss auf ein anderes Verfahren gewechselt werden, da ansonsten die Weg- bzw. Geschwindigkeitsschritte zu groß werden oder es gar zu einer Division durch Null kommt.

Alle Mikroschrittverfahren können durch eine Schrittweitenregelung verbessert werden. In Bereichen, in denen sich die Beschleunigung nicht oder nur sehr wenig ändert, kann die Schrittweite vergrößert und an markanten Punkten verkleinert werden. Hierdurch wird eine Verbesserung der Rechenzeit erreicht, ohne dass die Rechenqualität darunter leidet.

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Qualität ist die Kombination des Mikrozeit- und Mikrowegschrittverfahrens. Hierbei werden sowohl maximale Zeit- als auch Wegschritte eingehalten. Es wird das Kriterium erfüllt, das näher an der letzten Stützstelle liegt. Dieses Verfahren eignet sich besonders, wenn einerseits mit einem sehr feinen Mikrozeitschrittverfahren gerechnet werden soll und andererseits die Fahrt in äquidistanten Abschnitten oder an vordefinierten Orten protokolliert werden muss.

C Beispiel zur Optimierung der Fahrweise

Eine Fahrt über einen 5 km langen Abschnitt mit einem Berg in der Mitte der Strecke soll optimiert werden. Hierfür werden zunächst insgesamt 18 potenzielle Fahrphasen ermittelt. Dabei handelt es sich um vier Fahrphasen mit „reduzierter Höchstgeschwindigkeit“, fünf Rollphasen durch „Auslauf vor Bremsung“, fünf Rollphasen „Bergfahrt mit Schwung“ und vier Rollphasen mit einer „Verlängerten Bergfahrt mit Schwung“, bei denen am Ende des Gefälles die Streckenhöchstgeschwindigkeit noch nicht wieder erreicht wird und die Rollphase bis zum Erreichen der Bremsphase andauert (Bild 68, Tabelle 30).

Im nächsten Schritt wird eine Fahrphasen-Ausschlusstabelle bestimmt (Tabelle 31). Daraus ergeben sich die möglichen Kombinationen von Fahrphasen. Für jede Gruppe zusammengehörender Fahrphasen derselben Fahrmethode kann eine Cost-Time-Curve (CTC) erstellt werden (Bild 69). Aus der Aneinanderreihung der jeweils günstigsten Fahrphasen bzw. Fahrphasenkombinationen kann eine gemeinsame CTC gebildet werden. Da die CTC nur im Idealfall eine stetige Funktion ist, ist nicht gewährleistet, dass auch zwischen den Stützstellen geeignete Fahrweisen gefunden werden, die der CTC entsprechen.

Es zeigt sich, dass als Einzelmaßnahme das Coasten gegenüber dem Cruisen normalerweise von Vorteil ist und dass die Kombination von mehreren kleinen Rollphasen gegenüber einer einzigen Rollphase bei gleicher zusätzlicher Fahrzeit zu einem geringeren Energieverbrauch führt.

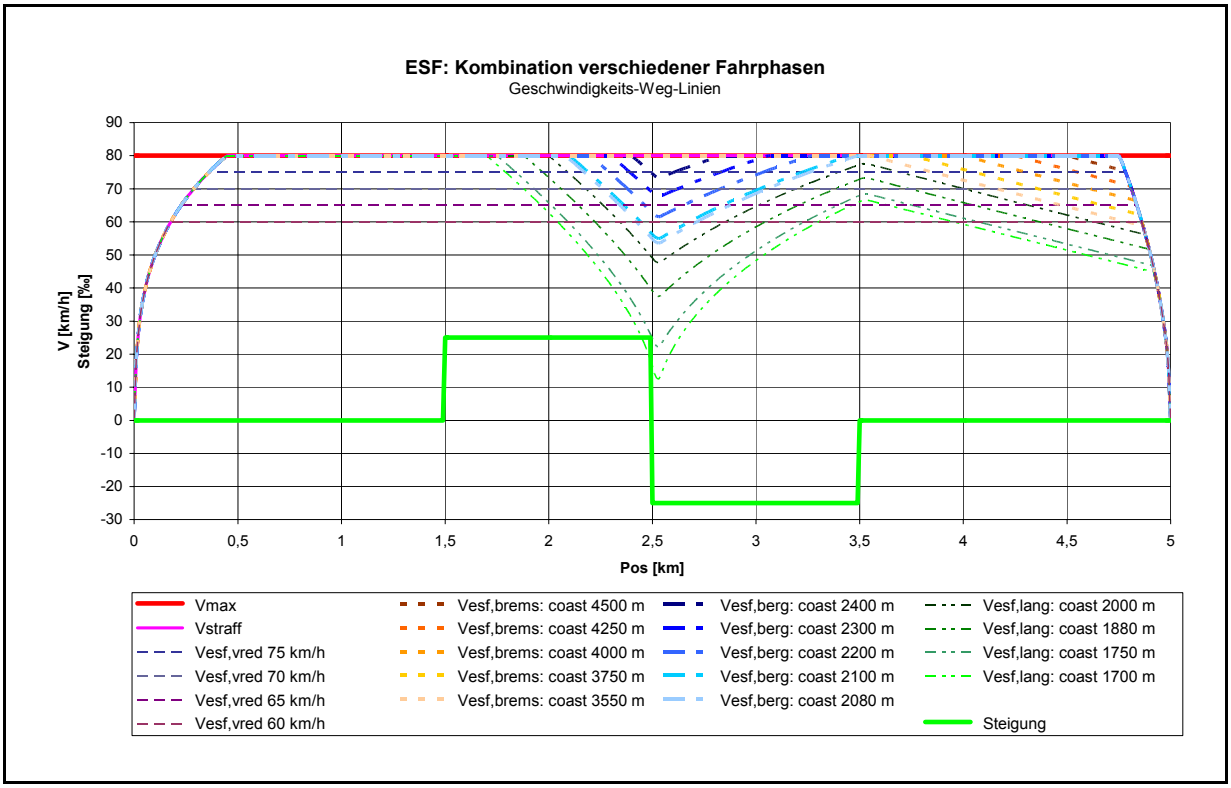


Bild 68: ESF Beispiel: potenzielle Fahrphasen

Name	Typ	Vmax [km/h]	Rollphase von bis [m]	Fahrzeit [s]	Energieverbrauch [kWh]
Straff	Straffe Fahrweise	80	-	247,6	13,39
ESF Vred 75 km/h	Reduzierung Vmax	75	-	260,7 (+13,1)	12,45 (-0,94)
ESF Vred 75 km/h	Reduzierung Vmax	70	-	276,1 (+28,5)	11,54 (-1,85)
ESF Vred 75 km/h	Reduzierung Vmax	65	-	294,2 (+46,6)	10,68 (-2,71)
ESF Vred 75 km/h	Reduzierung Vmax	60	-	315,6 (+68,0)	9,87 (-3,52)
ESF Brems 4500 m	Auslauf vor Bremsung	80	4500 - 4780	248,0 (+0,4)	13,25 (-0,14)
ESF Brems 4250 m	Auslauf vor Bremsung	80	4250 - 4800	249,1 (+1,5)	13,07 (-0,32)
ESF Brems 4000 m	Auslauf vor Bremsung	80	4000 - 4820	250,9 (+3,3)	12,86 (-0,53)
ESF Brems 3750 m	Auslauf vor Bremsung	80	3750 - 4850	253,7 (+6,1)	12,62 (-0,77)
ESF Brems 3550 m	Auslauf vor Bremsung	80	3550 - 4860	256,6 (+9,0)	12,41 (-0,98)
ESF Berg 2400 m	Bergfahrt mit Schwung	80	2400 - 2830	248,5 (+0,9)	13,15 (-0,24)
ESF Berg 2300 m	Bergfahrt mit Schwung	80	2300 - 3060	250,5 (+2,9)	12,90 (-0,49)
ESF Berg 2200 m	Bergfahrt mit Schwung	80	2200 - 3270	253,9 (+6,3)	12,60 (-0,79)
ESF Berg 2100 m	Bergfahrt mit Schwung	80	2100 - 2450	258,9 (+11,3)	12,26 (-1,13)
ESF Berg 2080 m	Bergfahrt mit Schwung	80	2080 - 3490	260,1 (+12,5)	12,19 (-1,20)
ESF Lang 2000 m	Verlängerte Bergfahrt mit Schwung	80	2000 - 4870	277,5 (+29,9)	10,82 (-2,57)
ESF Lang 1880 m	Verlängerte Bergfahrt mit Schwung	80	1880 - 4890	294,8 (+47,2)	10,21 (-3,18)
ESF Lang 1750 m	Verlängerte Bergfahrt mit Schwung	80	1750 - 4910	325,8 (+78,2)	9,54 (-3,85)
ESF Lang 1700 m	Verlängerte Bergfahrt mit Schwung	80	1700 - 4920	349,7 (+102,1)	9,28 (-4,11)

Tabelle 30: ESF Beispiel: potenzielle Fahrphasen

	Vred 75 km/h	Vred 70 km/h	Vred 65 km/h	Vred 60 km/h	Brems 4500 m	Brems 4250 m	Brems 4000 m	Brems 3750 m	Brems 3550 m	Berg 2400 m	Berg 2300 m	Berg 2200 m	Berg 2100 m	Berg 2080 m	Lang 2000 m	Lang 1880 m	Lang 1750 m	Lang 1700 m
Vred 75 km/h	–																	
Vred 70 km/h	–	–																
Vred 65 km/h	–	–	–															
Vred 60 km/h	–	–	–	–														
Brems 4500 m	–	–	–	–	–													
Brems 4250 m	?	–	–	–	–	–												
Brems 4000 m	?	?	–	–	–	–	–											
Brems 3750 m	?	?	?	–	–	–	–	–										
Brems 3550 m	?	?	?	?	–	–	–	–	–									
Berg 2400 m	?	–	–	–	X	X	X	X	X	–								
Berg 2300 m	?	?	–	–	X	X	X	X	X	–	–							
Berg 2200 m	?	?	?	–	X	X	X	X	X	–	–	–						
Berg 2100 m	?	?	?	?	X	X	X	X	X	–	–	–	–					
Berg 2080 m	?	?	?	?	X	X	X	X	X	–	–	–	–	–				
Lang 2000 m	?	?	?	?	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–			
Lang 1880 m	?	?	?	?	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
Lang 1750 m	?	?	?	?	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Lang 1700 m	?	?	?	?	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Tabelle 31: ESF Beispiel: Fahrphasen-Ausschlusstabelle[1]

[1] Symbole: X Kombination möglich
- Kombination nicht möglich
? Kombination nur möglich, wenn der Übergang zwischen den Phasen neu berechnet wird

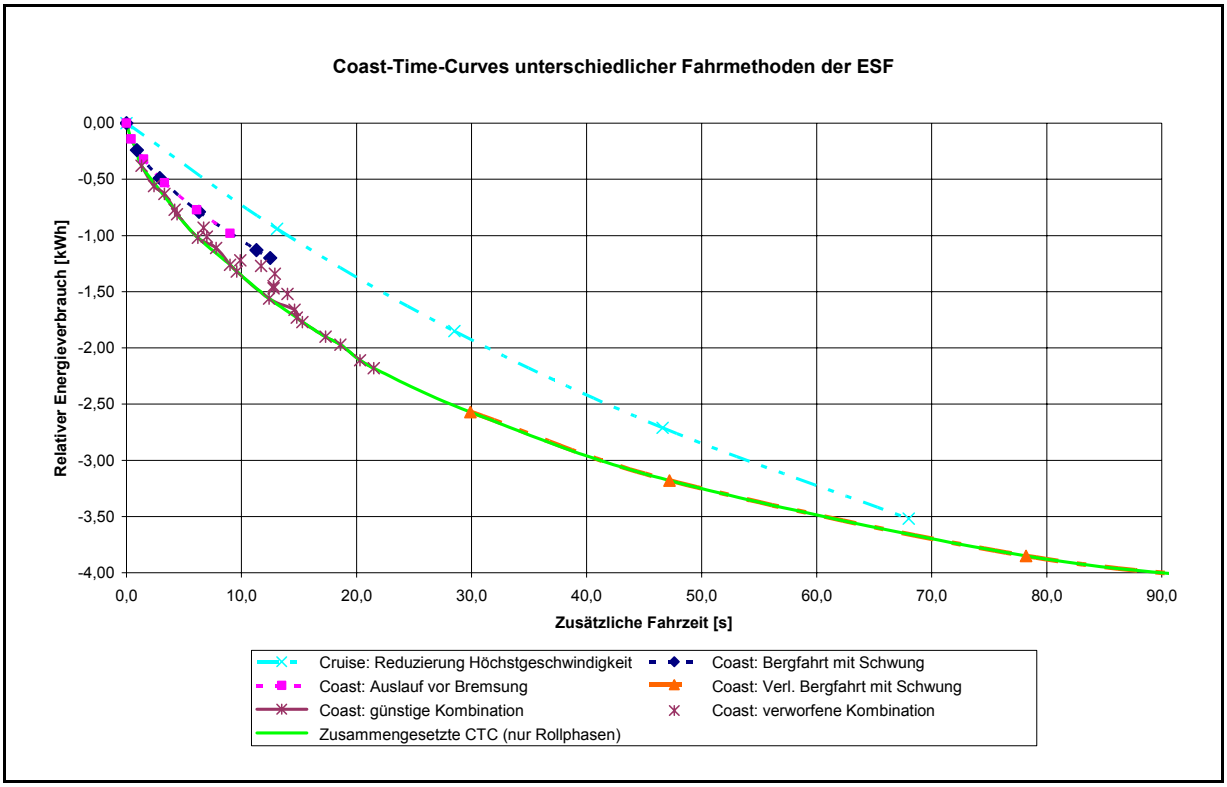


Bild 69: Cost-Time-Curves unterschiedlicher Fahrmethoden der ESF

Zur Bestimmung der optimalen Fahrweise bei vorgegebener Fahrzeitreserve muss anhand der potenziellen Fahrphasen unter Berücksichtigung der Fahrphasen-Ausschlusstabelle die Kombination bzw. die einzelne Fahrphase gefunden werden, bei der die zur Verfügung stehende Fahrzeitreserve nicht überschritten und die minimale Energie verbraucht wird.

Wenn dieses Verfahren im Online-Betrieb verwendet werden soll, ist ggf. eine zusätzliche Übergangs-Fahrphase zu berücksichtigen, um das Fahrzeug vom momentanen (realen) Fahrzustand auf einen der vorher theoretisch berechneten Fahrzustände zu bringen (→ Abschnitt 3.3.4.3).

D Beispielsimulation Ortungsfehler

Das folgende Beispiel verdeutlicht die Wirkung von vor- und nachlaufendem Ortungsfehler auf den Fahrtverlauf der energiesparsamen Fahrweise [SFWBB-2001b]. Es wird von einer ebenen und nicht gekrümmten Strecke von 20 km Länge ausgegangen. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 160 km/h. Es wird ein ICE-1 mit 10 Mittelwagen simuliert. Zur Simulation wurde das Zugfahrtsimulationssystem ZuSi V1.71 verwendet[1].

Zunächst werden die straffe Fahrweise und die energiesparsame Fahrweise ohne Ortungsfehler simuliert (Tabelle 32).

Ergebnis der Simulation:

Streckenlänge: 20 km
Fahrzeit (soll): 600 s

	Straffe Fahrweise	Energiesparsame Fahrweise	
Fahrzeit	552,3 s	600,0 s	(+8,6 %)
Bruttobezug	479,8 kWh	350,1 kWh	(-27,0 %)
Rückspeisung	123,5 kWh	70,5 kWh	(-42,9 %)
Gesamtverbrauch	356,3 kWh	279,6 kWh	(-21,5 %)

Tabelle 32: Fahrzeiten und Energieverbrauch bei straffer und energiesparsamer Fahrweise

Bei den hier durchgeführten Simulationen wird zu jeder vollen Minute in Abhängigkeit von der momentanen fehlerbehafteten Position und der Momentangeschwindigkeit eine Optimierung durchgeführt. Folgende Ortungsfehler wurden untersucht (Tabelle 33):

Simulation	Ortungsfehler
1	0 (kein Fehler)
2	absolut: 500 m vorlaufend
3	absolut: 500 m nachlaufend
4	relativ: 5 % vorlaufend
5	relativ: 5 % nachlaufend

Tabelle 33: Untersuchte Ortungsfehler

Zur Verdeutlichung der Problematik wurden bewusst hohe Ortungsfehler angenommen.

Die folgende Tabelle 34 zeigt chronologisch für alle untersuchten Ortungsfehler die von ESF berechneten Fahrempfehlungen für diese Strecke. Bild 70 enthält die dazugehörigen Fahrschaulinien.

[1] Das Zugfahrtsimulationssystem ZuSi wurde im Rahmen einer Studien- und einer Diplomarbeit [Linder-1993], [Linder-1994] am Fachgebiet „Schienenfahrzeuge“ der TU Berlin erstellt und danach am Fachgebiet „Schienenfahrwege und Bahnbetrieb“ im Rahmen diverser Projekte weiterentwickelt und um Methoden der energiesparsamen Fahrweise erweitert. Es basiert auf einem kombinierten Zeit- und Wegschrittverfahren und kann sowohl in Echtzeit als auch im Batch-Betrieb einzelne Zugfahrten simulieren.

In der Tabelle werden für jede Optimierung die Zeit, die Position, die Geschwindigkeit, die Fahrweise, die aktuelle Reservezeit und die empfohlenen Ausrollphasen dargestellt. Dabei wird sowohl die aktuelle als auch die mit dem Ortungsfehler behaftete Position angegeben. Die Fahrweise, die angegebene Reservezeit und die empfohlenen Ausrollphasen wurden ausgehend von der aktuellen Ortungsposition bestimmt.

Simulation	1	2	3	4	5
Ortungsfehler	0	absolut: 500m vorlaufend	absolut: 500m nachlaufend	relativ: 5 % vorlaufend	relativ: 5 % nachlaufend
1. Optimierung					
Zeit [s]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Position: real (mit Ortungsfehler)	0,000 (0,000)	0,000 (0,500)	0,000 (-0,500)	0,000 (0,000)	0,000 (0,000)
Geschwindigkeit [km/h]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
aktuelle Fahrweise	Stand	Stand	Stand	Stand	Stand
Fahrzeitreserve [s]	47,7	93,2	47,7	47,7	47,7
empfohlene Ausrollphasen [km]	5,760 - 18,830	4,510 - 18,910	5,760 - 18,830	5,760 - 18,830	5,760 - 18,830
2. Optimierung					
Zeit [s]	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Position: real (aus Ortung)	0,858 (0,858)	0,858 (1,358)	0,858 (0,358)	0,858 (0,901)	0,858 (0,815)
Geschwindigkeit [km/h]	99,3	99,3	99,3	99,3	99,3
aktuelle Fahrweise	beschl.	beschl.	beschl.	beschl.	beschl.
Fahrzeitreserve [s]	47,4	63,9	25,6	49,2	45,9
empfohlene Ausrollphasen [km]	5,760 - 18,830	4,510 - 18,910	8,760 - 18,610	5,760 - 18,830	6,010 - 18,810
3. Optimierung					
Zeit [s]	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
Position: real (aus Ortung)	3,031 (3,031)	3,031 (3,531)	3,031 (2,531)	3,031 (3,182)	3,031 (2,879)
Geschwindigkeit [km/h]	156,2	156,2	156,2	156,2	156,2
aktuelle Fahrweise	beschl.	beschl.	beschl.	beschl.	beschl.
Fahrzeitreserve [s]	47,6	58,9	35,8	51,1	43,9
empfohlene Ausrollphasen [km]	5,760 - 18,830	4,510 - 18,910	7,260 - 18,720	5,510 - 18,850	6,260 - 18,790

Tabelle 34: Fahrempfehlungen für Simulationen auf der Beispielstrecke mit und ohne Ortungsfehler

Simulation	1	2	3	4	5
Ortungsfehler	0	absolut: 500m vorlaufend	absolut: 500m nachlaufend	relativ: 5 % vorlaufend	relativ: 5 % nachlaufend
4. Optimierung					
Zeit [s]	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0
Position: real (aus Ortung)	5,694 (5,694)	5,662 (6,162)	5,694 (5,194)	5,690 (5,974)	5,694 (5,410)
Geschwindigkeit [km/h]	160,0	154,0	160,0	157,8	160,0
aktuelle Fahrweise	Vmax	rollen	Vmax	rollen	Vmax
Fahrzeitreserve [s]	47,5	58,1	36,3	53,8	41,0
empfohlene Ausrollphasen [km]	5,760 - 18,830	weiter bis 18,920	7,260 - 18,720	weiter bis 18,860	6,510 - 18,770
5. Optimierung					
Zeit [s]	240,0	240,0	240,0	240,0	240,0
Position: real (aus Ortung)	8,284 (8,284)	8,156 (8,656)	8,355 (7,855)	8,244 (8,656)	8,336 (7,919)
Geschwindigkeit [km/h]	150,9	145,4	157,3	148,8	154,8
aktuelle Fahrweise	rollen	rollen	rollen	rollen	rollen
Fahrzeitreserve [s]	45,8	54,1	36,1	54,1	37,5
empfohlene Ausrollphasen [km]	weiter bis 18,830	weiter bis 18,920	weiter bis 18,730	weiter bis 18,850	beschl. bis 8,240, dann 8,260 - 18,640
6. Optimierung					
Zeit [s]	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Position: real (aus Ortung)	10,728 (10,728)	10,511 (11,011)	10,902 (10,402)	10,655 (11,187)	10,940 (10,393)
Geschwindigkeit [km/h]	142,4	137,3	148,4	140,5	152,1
aktuelle Fahrweise	rollen	rollen	rollen	rollen	rollen
Fahrzeitreserve [s]	40,7	47,2	33,5	51,1	33,3
empfohlene Ausrollphasen [km]	weiter bis 18,830	weiter bis 18,920	weiter bis 18,730	weiter bis 18,840	weiter bis 18,650
7. Optimierung					
Zeit [s]	360,0	360,0	360,0	360,0	360,0
Position: real (aus Ortung)	13,036 (13,036)	12,738 (13,238)	13,306 (12,806)	12,932 (13,579)	13,402 (12,732)
Geschwindigkeit [km/h]	134,6	129,9	140,2	132,9	143,5
aktuelle Fahrweise	rollen	rollen	rollen	rollen	rollen
Fahrzeitreserve [s]	32,7	37,2	27,5	44,8	25,9
empfohlene Ausrollphasen [km]	weiter bis 18,830	weiter bis 18,920	weiter bis 18,730	weiter bis 18,830	weiter bis 18,660

Tabelle 34: Fahrempfehlungen für Simulationen auf der Beispielstrecke mit und ohne Ortungsfehler (Fortsetzung)

Simulation	1	2	3	4	5
Ortungsfehler	0	absolut: 500m vorlaufend	absolut: 500m nachlaufend	relativ: 5 % vorlaufend	relativ: 5 % nachlaufend
8. Optimierung					
Zeit [s]	420,0	420,0	420,0	420,0	420,0
Position: real (aus Ortung)	15,219 (15,219)	14,845 (15,345)	15,578 (15,078)	15,087 (15,841)	15,728 (14,942)
Geschwindigkeit [km/h]	127,4	123,0	132,5	125,7	135,7
aktuelle Fahrweise	rollen	rollen	rollen	rollen	rollen
Fahrzeitreserve [s]	21,7	24,7	18,6	35,9	15,7
Empfohlene Ausrollphasen [km]	weiter bis 18,830	weiter bis 18,920	weiter bis 18,730	weiter bis 18,820	beschl. bis 16,230, dann 16,260 - 17,920
9. Optimierung					
Zeit [s]	480,0	480,0	480,0	480,0	480,0
Position: real (aus Ortung)	17,285 (17,285)	16,840 (17,340)	17,727 (17,227)	17,127 (17,983)	18,257 (17,344)
Geschwindigkeit [km/h]	120,6	116,5	125,4	119,1	140,9
aktuelle Fahrweise	rollen	rollen	rollen	rollen	bremsen
Fahrzeitreserve [s]	8,3	9,5	7,0	24,2	9,7
Empfohlene Ausrollphasen [km]	weiter bis 18,830	weiter bis 18,920	weiter bis 18,730	weiter bis 18,820	-
10. Optimierung					
Zeit [s]	540,0	540,0	540,0	540,0	540,0
Position: real (aus Ortung)	19,208 (19,208)	18,747 (19,247)	19,551 (19,051)	19,111 (20,067)	19,815 (18,824)
Geschwindigkeit [km/h]	94,6	119,4	70,8	100,2	45,3
aktuelle Fahrweise	bremsen	bremsen	bremsen	bremsen	bremsen
Fahrzeitreserve [s]	-0,2	1,3	-5,7	60,0	-13,2
empfohlene Ausrollphasen [km]	-	-	-	-	-
Gesamtergebnisse					
Fahrzeit [s]	600,0	615,4	585,1	603,5	569,0
Bruttobezug [kWh]	350,1	355,2	370,0	383,6	462,2
Rückspeisung [kWh]	70,5	77,0	78,3	90,1	120,5
Gesamtverbrauch [kWh]	279,6	278,2	291,7	293,5	341,7

Tabelle 34: Fahrempfehlungen für Simulationen auf der Beispielstrecke mit und ohne Ortungsfehler (Fortsetzung)

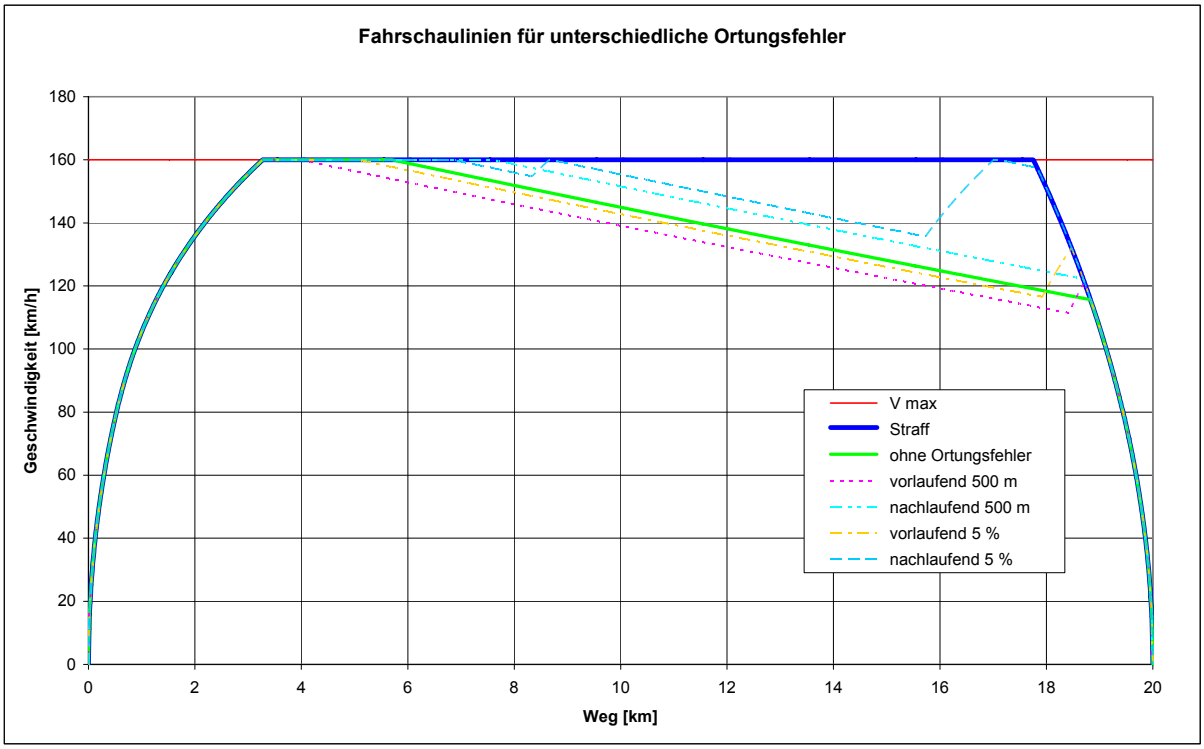


Bild 70: Fahrschaulinien für unterschiedliche Ortungsfehler

Anhand der dargestellten Fahrschaulinien können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Je „tiefer“ die Fahrschaulinie der Rollphase liegt, desto länger ist die Fahrzeit für diese Zugfahrt, da die Rollphase früher beginnt und dadurch auch die Geschwindigkeit zum Ende der Rollphase geringer ist, wodurch sich die Fahrzeit erhöht. Oberhalb der Fahrschaulinie für die energiesparsame Fahrweise ohne Ortungsfehler ergeben sich Verfrühungen und unterhalb Verspätungen.
- Bei vorlaufendem Ortungssignal wird die Rollphase vor Einleitung der Bremsung beendet. Die verwendeten Algorithmen führen bei Überschreitung des berechneten Roll-Endpunktes zu einer Beschleunigung, falls noch nicht gebremst werden muss. Dadurch schließt sich bei den Fahrschaulinien für die vorlaufenden Ortungssignale am Ende jeder Rollphase eine kurze Beschleunigungsphase an.
- Bei nachlaufendem Ortungssignal mit relativem Fehler treten Zwischenbeschleunigungsphasen auf. Diese Phasen werden nach neuen Optimierungen notwendig, wenn festgestellt wird, dass die noch vorhandene Reservezeit für die vorgesehene Ausrollphase nicht ausreicht. Bei nachlaufendem Ortungssignal mit absolutem Fehler tritt dieser Effekt nicht auf, da zwischen den einzelnen Zwischenoptimierungen der Fehler konstant bleibt und somit auch die ermittelten Rollphasen nicht angepasst werden müssen.

E Datenbedarf eines Advice Systems

Der Datenbedarf eines Advice Systems ist vom verwendeten Algorithmus und den zusätzlichen Funktionen abhängig. Die hier dargestellten Informationen sind nur beispielhaft und orientieren sich an einem Advice System für den Nahverkehr.

Folgende Kategorien von Daten werden innerhalb des Advice Systems benötigt:

- Fahrzeugdaten,
- Streckendaten,
- Fahrplandaten und
- Einstellungen des Advice Systems.

Die Übersicht beschränkt sich auf das Advice System selbst, zur Offline-Simulation werden häufig mehr Daten benötigt.

E.1 Fahrzeugdaten

Die Fahrzeugdaten lassen sich in typspezifische und in fahrzeugspezifische Daten einteilen. Die typspezifischen Daten gelten für alle Fahrzeuge dieses Typs (Tabelle 35), während die fahrzeugspezifischen Daten nur für ein einzelnes Fahrzeug gelten (Tabelle 36). Die fahrzeugspezifischen Daten können bei Bedarf um die typspezifischen Daten erweitert werden, die einzeln optional angegeben werden können und dann die jeweiligen typspezifischen Daten überschreiben.

Kategorie	Datum	Beschreibung
Allgemeine Informationen	Fahrzeugtyp	Fahrzeugtyp als Zeichenkette oder als Nummer.
	Fahrzeuglänge	Kann zur fahrdynamischen Berechnung und zur Bestimmung des Haltepunktes wichtig sein.
	ID des Haltepunktes	Bestimmt den Haltepunkt für diesen Fahrzeugtyp. In den Streckendaten werden für jede Station die Haltepunkte für alle IDs verzeichnet.
	Kalibrierfaktor Odometer	Aktueller fahrzeugspezifischer Kalibrierfaktor des Odometers.
	Reaktionszeit Betriebsbremsung	Reaktionszeit, bis nach dem Einleiten der Betriebsbremsung die Bremsverzögerung anliegt.
Massen	Leermasse	Leermasse des betriebsbereiten Fahrzeuges ohne Beladung, aber mit Betriebsstoffen.
	Maximale Beladung	Maximale Zuladung unter Berücksichtigung aller Sitz- und Stehplätze.
	Typische Beladung	Dient zur Berechnung der Fahrdynamik, wenn keine genaue Auslastung bekannt ist.
	Rotierende Massen	Berücksichtigt rot. Massen bei der Beschleunigung.

Tabelle 35: Typspezifische Fahrzeugdaten

Kategorie	Datum	Beschreibung
Fahrdynamik	Höchstgeschwindigkeit	Fahrzeugseitige Höchstgeschwindigkeit.
	Max. Verzögerung	Maximale Betriebsbremsverzögerung.
	Mittlere Verzögerung	Die mittlere Betriebsbremsverzögerung ist Grundlage zur Berechnung des Bremseinsatzpunktes.
	Laufwiderstands-beiwerte[1]	Die Koeffizienten A, B, C und dv der Davis-Formel (→ Anhang A.1.2.6) dienen zur Bestimmung des Laufwiderstandes. Ggf. ist auch ein eigener Koeffizientensatz für Tunnel zu berücksichtigen.
Kräfte[2]	Maximale Zugkraft	Dient zur Beschränkung der Zugkraft im unteren Geschwindigkeitsbereich.
	Maximale Bremskraft	Dient zur Bestimmung der zurückgespeisten Energie bei generatorischer Bremse.
	Zug- und Bremskraftkennlinie	Wird normalerweise durch ein Feld mit geschwindigkeitsabhängigen Records angegeben. Diese Records beinhalten die Geschwindigkeit, die maximale Zugkraft, die maximale generatorische Bremskraft und ggf. auch die maximale sowie die mittlere Bremsverzögerung.

Tabelle 35: Typspezifische Fahrzeugdaten (Fortsetzung)

Kategorie	Datum	Beschreibung
Allgemeine Informationen	Fahrzeugnummer	Eindeutige Nummer des Fahrzeuges (z.B. IBIS Fahrzeugnummer).
	Kalibrierfaktor Odometer	Aktueller fahrzeugspezifischer Kalibrierfaktor des Odometers.
	Reaktionszeit Betriebsbremsung	Reaktionszeit, bis nach dem Einleiten der Betriebsbremse die Bremsverzögerung anliegt.

Tabelle 36: Fahrzeugspezifische Fahrzeugdaten

E.2 Streckendaten

Die Streckendaten werden hier in der sog. ***Single Track Darstellung*** beschrieben, d.h. es handelt sich um die Daten eines Richtungsgleises einer einzelnen Linie. Streckenabzweigungen, Weichen und alle Elemente, die keinen direkten Einfluss auf die Fahrdynamik haben, werden nicht betrachtet (Tabelle 37). Diese vereinfachte Darstellung genügt zur Berechnung einer Fahrempfehlung. Für komplexe Bahnnetze mit Streckenabschnitten, die von mehreren Linien befahren werden und für Systeme mit Berücksichtigung von Streckensignalen ist jedoch ein komplexeres Datenmodell nötig. Vorschläge zur Modellierung der Infrastruktur mittels eines Knoten-Kanten-Modells werden in der Literatur beschrieben [Hürlimann-2002], [RailML-2003] und [Schultz-1999].

---

[1] Auf die Laufwiderstandsbeiwerte kann verzichtet werden, wenn diese onboard automatisch bestimmt werden oder sie indirekt durch ein streckenspezifisches Ausrollvermögen spezifiziert werden.

[2] Die Kräfte werden onboard nur dann benötigt, wenn dort fahrdynamische Berechnungen durchgeführt werden. Bei Advice Systemen des Nahverkehrs ist dies häufig nicht notwendig.

Kategorie	Datum	Beschreibung
Allgemeine Informationen	Streckennummer	Eindeutige Nummer der Strecke (z.B. IBIS Liniennummer).
	Höchstgeschwindigkeit	Allgemeine Streckenhöchstgeschwindigkeit.
	Richtung bzw. Richtungsgleis	Eindeutige Kennzeichnung der Fahrtrichtung, auf die sich die Informationen beziehen.
	Anfangs- und Endposition	Absolute Position von Anfangs- und Endpunkt der Strecke; ggf. auch Streckenlänge.
Stationsdaten (diese müssen für jede Station angegeben werden)	Kurzbezeichnung	Kurzbezeichnung der Station (z.B. drei Zeichen).
	Stationsname	Vollständiger Name der Station.
	Stationsnummer	Eindeutige Nummer der Station (z.B. IBIS Stations-nummer).
	Referenzposition (Absolutwert)	Kilometrierung des Referenzpunktes der Station. Diese Position ist festgelegt. Alle anderen Positionsangaben der Station beziehen sich auf diesen Wert.
	Position Bahnsteig-anfang und -ende	Relative Position bezüglich des Referenzpunktes.
	Bahnsteighöchst-geschwindigkeit	Ggf. Angabe der reduzierten Höchstgeschwindigkeit im Bahnsteigbereich.
	Gleisnummer	Ggf. Bahnsteig-Gleisnummer.
	Position Fangbereich-anfang und -ende	Wenn das Fahrzeug innerhalb des Fangbereichs zum Stehen kommt, wird dies als Stationshalt erkannt.[1]
Segmentdaten (für jedes Segment zwischen zwei Stationen)	Flag zur Kalibrierung des Wegimpulszählers	Flag, das angibt, ob dieses Segment zur Kalibrierung des Wegimpulszählers herangezogen werden soll.
	Minimale Rollgeschwindigkeit	Segmentspezifische minimale Rollgeschwindigkeit zur Vermeidung einer Fehlschaltung einer zeitgesteuerten Ampelbevorrechtigung.
Strecken-geometrie (jeweils mit Angabe der Position)[2]	Höchstgeschwindigkeit	Änderung der zulässigen Streckengeschwindigkeit; ggf. mit Angabe, ob bei einer Erhöhung der Strecken-geschwindigkeit die Durchfahrt des Zugschlusses abgewartet werden muss.
	Gradient	Änderung der Neigung.
	Streckenkrümmung	Änderung der Streckenkrümmung bzw. des Radius.
	Tunnel	Tunnelanfang und -ende; ggf. durch weitere Angaben ergänzt.
Fahrtrouten[3]	Fahrtroutennummer	Eindeutige Nummer der Fahrtroute.
	Anfangs- und Endstation der Fahrt	Referenz auf Anfangs- und Endstation.
	Haltestationen	Ggf. Angabe von allen Zwischenstationen, an denen gehalten werden soll.

Tabelle 37: Streckendaten

[1] Kann ggf. durch intelligente Algorithmen und die Kenntnis des Bahnsteigbereichs onboard ermittelt werden.

[2] Auf die Streckengeometrie kann teilweise verzichtet werden, wenn stattdessen ein streckenspezifisches Ausrollvermögen angegeben wird.

[3] Die Fahrtrouten können alternativ auch bei den Fahrplänen angegeben werden.

E.3 Fahrplandaten

Die Modellierung des Fahrplans ist sehr komplex, wenn einerseits alle geplanten Fahrten einer Periode auf dem gesamten Netz berücksichtigt werden müssen und andererseits Taktfahrten sowie wochentagabhängige Fahrten als solche erkannt und verarbeitet werden sollen. Möglichkeiten zur Modellierung dieser Zusammenhänge werden u.a. in [RailML-2003] beschrieben.

Bei einfachen Betriebsformen kann ein relationales Modell verwendet werden. Darin werden sowohl relative als auch absolute Fahrpläne verwaltet. Ein relativer Fahrplan definiert den Laufweg sowie alle Fahr- und Haltezeiten einer Fahrt, ohne jedoch die absolute Abfahrtszeit festzulegen. Für jede Linie können mehrere Fahrplantypen definiert werden. Der absolute Fahrplan ist tagesabhängig und definiert jeweils die Abfolge von Fahrten mit einem Bezug auf einen relativen Fahrplan und die zugehörige Abfahrtsstation und -zeit.

Unabhängig von der internen Modellierung werden für die Ermittlung einer Fahrempfehlung bestimmte Daten benötigt (Tabelle 38).

Kategorie	Datum	Beschreibung
Laufweg	Streckendaten	Referenz auf Streckendaten (→ Tabelle 37).
	Anfangsstation	Referenz auf die verkehrliche Anfangsstation.
	Endstation	Referenz auf die verkehrliche Endstation.
Stationsdaten (diese müssen für jede Station angegeben werden)	Station	Referenz auf die Infrastrukturdaten der Station (→ Tabelle 37).
	Gleisnummer	Nummer des Gleises, an der normalerweise gehalten bzw. durchgefahren wird.
	Modus der Station	Flag, ob gehalten oder durchgefahren wird.
	Betr. Ankunftszeit	Betriebliche Ankunftszeit (sekundengenau)
	Betr. Abfahrtszeit	Betriebliche Abfahrtszeit (sekundengenau)
	Min. Haltezeit	Minimale Haltezeit.
	Verk. Ankunftszeit[1]	Verkehrliche Ankunftszeit lt. veröffentlichtem Fahrplan.
	Verk. Abfahrtszeit[1]	Verkehrliche Abfahrtszeit lt. veröffentlichtem Fahrplan.
Segmentdaten (für jedes Segment zwischen zwei Stationen)	Minimale Fahrzeit	Minimale Fahrzeit bei straffer Fahrweise.
	Geplante Fahrzeit	Fahrzeit lt. Fahrplan
	Modus der Fahrempfehlung	Flag, ob auf dem Segment eine Fahrempfehlung gegeben werden soll.
Segmentspezifisches Ausrollvermögen[2]	Ausroll-Tripels	Menge von Tripels zur Charakterisierung des segmentspezifischen Ausrollvermögens: • Distanz vom Rolleinsatzpunkt zum Haltepunkt, • Geschwindigkeit am Rolleinsatzpunkt und • durchschnittliche Rollverzögerung.

Tabelle 38: Fahrplandaten

[1] Durch die optionale Angabe kann die Abfahrt beschleunigt werden, wenn der Fahrgastwechsel vollzogen ist und die verkehrliche, nicht jedoch die vorgesehene betriebliche, Abfahrtszeit erreicht ist.

[2] Nur wenn die Fahrdynamik nicht vollständig online berechnet wird (→ Abschnitt 3.3.6.2).

E.4 Einstellungen des Advice Systems

Advice Systeme können meist durch Konfigurationsdaten an die spezifischen Bedürfnisse des Betriebs angepasst werden. Die konfigurierbaren Parameter sind abhängig von der Art und der Implementierung des jeweiligen Advice Systems.

Anhand der Konfigurationsdaten des Advice Systems Siemens METROMISER wird das mögliche Spektrum an Einstellungen verdeutlicht (Tabelle 39).

Kategorie	Datum	Beschreibung
Gültigkeit	Fahrzeugnummern	Alle Fahrzeugnummern, für die diese Konfigurationsdaten gelten.
Parameter zur Bestimmung der ESF	Min. Fahrzeit berücksichtigen	Flag, ob die minimale Fahrzeit zzgl. einem Fahrzeitaufschlag berücksichtigt werden soll, auch wenn das Fahrzeug deutlich verspätet ist.
	Fahrzeitzuschlag	Fahrzeitzuschlag zur minimalen Fahrzeit.
	Erlaubte Verspätung	Bei einer Abfahrt innerhalb dieser akzeptierten Verspätung wird noch die gesamte geplante Fahrzeitreserve für die ESF genutzt.
	Zusätzliche erlaubte Verspätung während des Rollens	Wenn das Fahrzeug schlechter als angenommen rollt, wird diese zusätzliche Verspätung akzeptiert, ohne dass die Rollempfehlung zurückgenommen wird.
	Minimale Rollgeschwindigkeit	Beim Unterschreiten dieser Geschwindigkeit wird die Rollempfehlung zurückgenommen.
	Minimale Geschwindigkeit bei Rolleinsatz	Bei Einsatz des Rollens muss diese Geschwindigkeit überschritten sein.
	Min. Zeit Rollen	Minimale Anzeigezeit einer Rollempfehlung.
	Reaktionszeit	Fahrerreaktionszeit
	Fahrempfehlung	Flag, ob Fahrempfehlungen angezeigt werden sollen.
Fahrtaufzeichnung	Aktivitätsaufzeichnung	Aufzeichnung von Ankunfts- und Abfahrtszeiten, Fahrempfehlungen und Fahrerreaktion.
	Volle Aufzeichnung	Aufzeichnung von allen fahrdynamischen Daten im Sekundenraster.
IBIS-Einstellungen	div.	Diverse Einstellungen zu IBIS-Telegrammen, falls das System in einer IBIS-Umgebung verwendet wird.
Fahrplan	Fahrplan-Modus	Modus des Fahrplans: • absolut, • relativ bei der Abfahrt am der Startstation, • relativ bei jedem Segment und • automatisch (mit Angabe des zeitlichen Bereichs).
	Betriebsschluss	Uhrzeit zur Erkennung des Wochentagswechsels.
Infrastruktur	Fangbereich	Default-Fangbereich zur Erkennung eines Stationshaltes, wenn kein spezifischer Bereich angegeben ist.
Ausrollvermögen	Modus des Lernens und Speicherns	Lernen: Nie, immer, wenn gültig; Sichern: Nie, immer, wenn gültig; Entladen: Nie, immer, wenn Änderungen vorliegen.
System	Passwort	Systempasswort zur Konfiguration am Gerät.

Tabelle 39: Konfigurationsdaten des Systems Siemens METROMISER

F Nahverkehrsbetreiber TransAdelaide

F.1 Adelaide

Adelaide ist die Hauptstadt von Südaustralien, liegt am Golf Saint Vincent und hat ca. 1 Mio. Einwohner (Bild 71). Der öffentliche Personennahverkehr wird überwiegend vom städtischen Betreiber ***TransAdelaide*** mit Bussen, Bahnen und einer historischen Tram-Linie erbracht.

Bild 71: Umgebungsplan Adelaide [Encarta-2002]

F.2 Bahnnetz TransAdelaide

Das Bahnnetz umfasst sechs Linien, wobei es sich um vier Hauptlinien und zwei eingleisige Stichstrecken handelt (Bild 72, Tabelle 40). Die gesamte Streckenlänge ist ca. 142 km, die längste Linie hat eine Länge von ca. 42 km. Die Spurweite beträgt 1600 mm. Auf einem kleinen Abschnitt teilt sich TransAdelaide das Gleis mit dem normalspurigen Fernverkehr. Dort ist ein Dreischienengleis verlegt.

Das Betriebsprogramms und das Verkehrsaufkommens entspricht weitestgehend dem einer klassischen S-Bahn, obwohl Dieseltriebzüge eingesetzt werden, deren Beschleunigungsvermögen im Verhältnis zu elektrischen S-Bahnzügen etwas geringer ist.

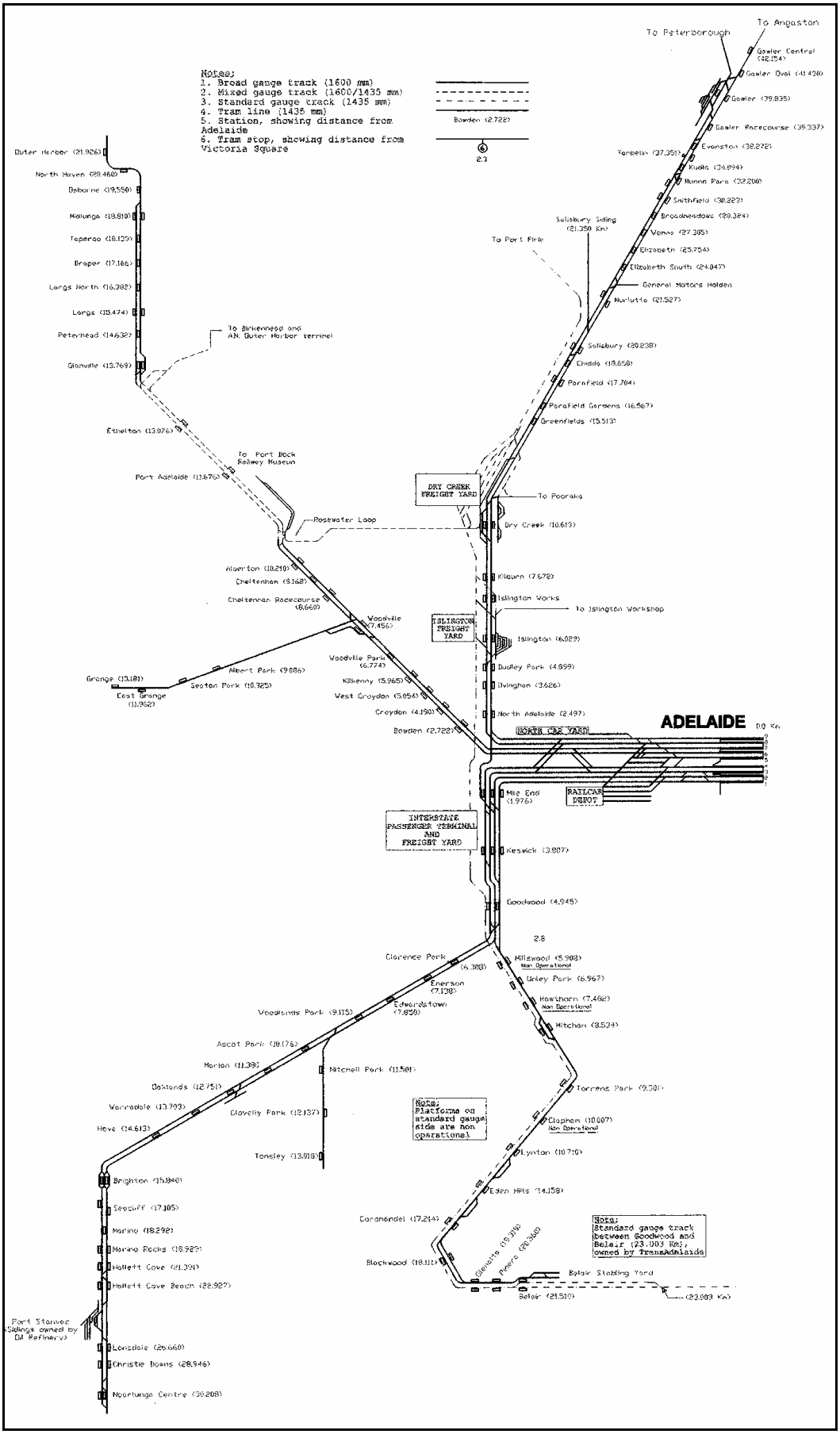


Bild 72: Gleisplan des Bahnnetzes TransAdelaide [TransAdelaide-1997]

Strecke	Von	Nach	Länge [km]
Belair Line	Adelaide (AD)	Belair (BL)	21,5
Noarlunga Line	Adelaide (AD)	Noarlunga Centre (NC)	30,3
Tonsley Line	Adelaide (AD)	Tonsley (TS)	13,0
Outer Harbor Line	Adelaide (AD)	Outer Harbor (OH)	22,0
Grange Line	Adelaide (AD)	Grange (GG)	13,2
Gawler Line	Adelaide (AD)	Gawler Central (GC)	42,2
Summe			142,2

Tabelle 40: Bahnstrecken TransAdelaide

F.2.1 Gawler Line

Die in [Siegmann-2002] durchgeführten Tests wurden auf der Gawler Line durchgeführt. Es handelt sich um die längste Strecke auf dem Netz von TransAdelaide. Sie hat eine Länge von 42.2 km. Im normalen Betrieb werden 25 Stationen bedient. Überwiegend ist die Strecke zweispurig, lediglich auf dem letzten Stück von Gawler nach Gawler Central ist sie einspurig ohne Ausweichmöglichkeit. Die Streckenhöchstgeschwindigkeit beträgt 90 km/h. Die Strecke ist relativ flach und gerade (Bild 73).

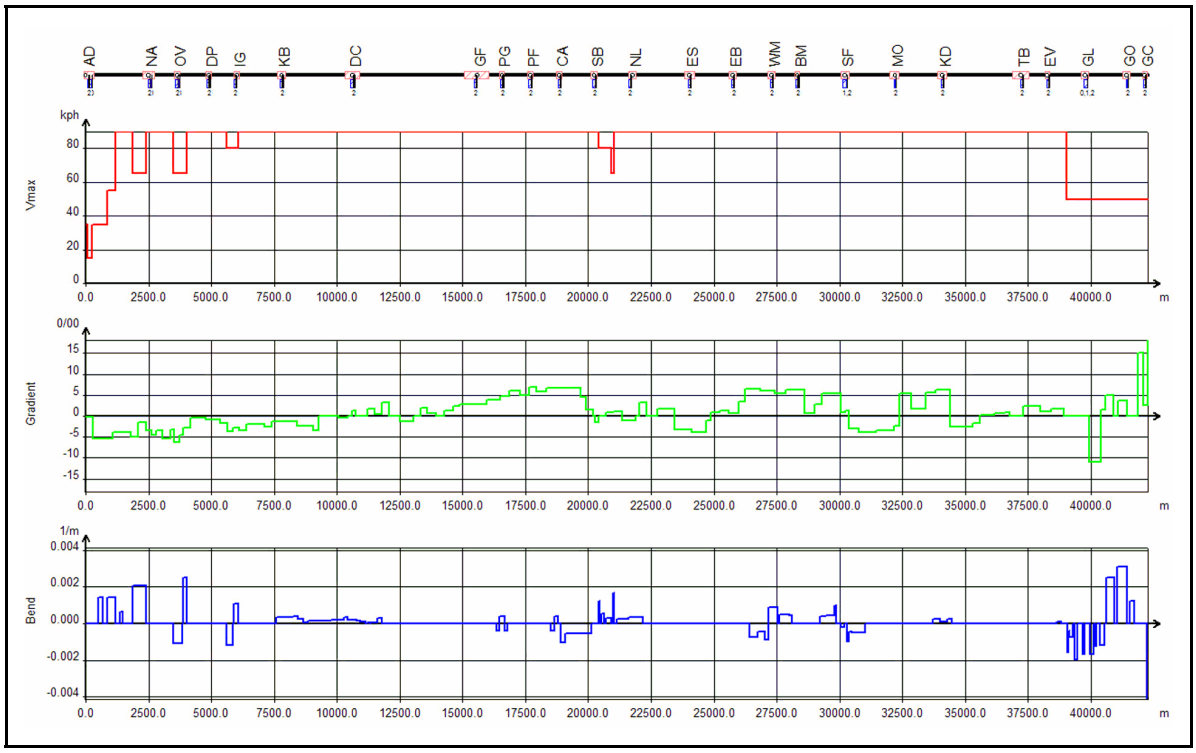


Bild 73: Streckendaten Gawler Line: Fahrtrichtung von Adelaide nach Gawler

F.3 Fahrzeuge

Es werden Triebzüge des australischen Herstellers Comeng aus zwei Generationen eingesetzt. Die ältere Class 2000/2100 hat einen dieselhydraulischen Antrieb. Die Fahrzeuge der Class 2000 sind auf beiden Drehgestellen angetrieben, während die Fahrzeuge der Class 2100 nicht angetriebene Steuerwagen sind. Beide Fahrzeugtypen haben jeweils nur einen Führerstand, d.h. sie müssen betrieblich als Einheit verkehren. Es gibt Einheiten mit zwei Fahrzeugen (Class 2000 Unit: C2000 + C2100) und Einheiten aus drei Fahrzeugen (Class 2000 Set: C2100 + C2000 + C2100). Aus diesen Einheiten können Zugverbände mit bis zu sechs Fahrzeugen gebildet werden.

Die Fahrzeuge der neueren Class 3000/3100 werden dieselelektrisch angetrieben. Class 3000 und Class 3100 sind antriebstechnisch nahezu identisch. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Fahrzeuge der Class 3000 auf beiden Seiten einen Führerstand haben, während die Fahrzeuge der Class 3100 nur an einem Ende einen Führerstand besitzen. Die Fahrzeuge der Class 3100 können betrieblich also nur im Zugverband eingesetzt werden. Obwohl Fahrzeuge der Class 3100 normalerweise mit den Enden ohne Führerstand zusammengekuppelt als Einheit auftreten, kann ein einzelnes Fahrzeug der Class 3100 auch mit einem Fahrzeug der Class 3000 betrieblich eingesetzt werden (Bild 74). Je Fahrzeug erzeugt ein Dieselmotor den Strom zur Versorgung von zwei elektrischen Fahrmotoren im Antriebsdrehgestell. Das zweite Drehgestell ist nicht angetrieben. Es können einzelne Fahrzeuge der Class 3000 sowie beliebige Zugkonfigurationen aus Fahrzeugen der Class 3000 und der Class 3100 mit bis zu sechs Fahrzeugen eingesetzt werden.

Die betriebliche Bildung von gemischten Zügen aus Einheiten der Class 2000 und Einheiten der Class 3000 ist nicht möglich.

Bild 74: Zweiteiliger Zug: Class 3000/3100 [Siegmann-2002]

Der Fahrzeugbestand Mitte 2002 liegt bei 62 Zügen bzw. 100 Fahrzeugen (Tabelle 41). Die Hauptverkehrslast wird von Fahrzeugen der Class 3000/3100 erbracht. Es ist geplant, die Fahrzeuge der Class 2000 durch weiterentwickelte Fahrzeuge der Class 3000 in den nächsten Jahren zu ersetzen.

Zugtyp	Bestand	Zugkonfiguration	Fahrzeugbestand			
			C3000	C3100	C2000	C2100
C3000	30	C3000	30			
C3100 Unit	20	C3100 - C3100		40		
C2000 Unit	6	C2000 - C2100			6	6
C2000 Set	6	C2100 - C2000 - C2100			6	12
Summe	**62**		**30**	**40**	**12**	**18**

Tabelle 41: Fahrzeugbestand TransAdelaide, Stand Mitte 2002

Die fahrdynamischen Parameter unterschiedlicher Zugkonfigurationen wurden in [Siegmann-2003] durch Ausrollversuche ermittelt (Tabelle 42). Zur Auswertung der Messfahrten wurde das in Abschnitt 5.3.3 beschriebene Verfahren verwendet.

Zugtyp	Wagenanzahl	Länge [m]	Sitzplatzkapazität	Leermasse [t]	Rotierende Massen [t]	Max. Zuladung [t]	Mittlere Zuladung [t]	Gesamtmasse [t]	Antriebsleistung [kW]	W_l Koeffizient A [kN]	W_l Koeffizient B [kN/(km/h)]	W_l Koeffizient C [kN/(km/h)²]
1 · C3000	1	26,2	106	48,2	3,5	8,0	5,3	57,0	260	0,371	0,01615	0,0003837
2 · C3000 oder 1 · C3100 Unit	2	52,4	220	94,9	7,0	16,5	11,0	112,8	520	0,741	0,0323	0,0005756
3 · C3000 oder 1 · C3000 + 1 · C3100 Unit	3	78,5	329	142,5	10,5	24,6	16,4	169,4	780	1,112	0,04846	0,0007675
4 · C3000 oder 2 · C3100 Unit	4	104,7	442	189,2	14,0	33,2	22,1	225,3	1040	1,483	0,06461	0,0009593
1 · C2000 Unit	2	51,0	170	110,0	9,0	12,8	8,5	127,5	760	1,222	0,04000	0,0007767
1 · C2000 Set	3	76,5	276	152,0	12,0	20,7	13,8	177,8	760	1,833	0,06000	0,001036
2 · C2000 Unit	4	102,0	340	220,0	18,0	25,5	17,0	255,0	1520	2,444	0,08000	0,001294

Tabelle 42: Fahrdynamische Daten von verschiedenen Zugkonfigurationen [Siegmann-2003]

F.4 Fahrplan und Akzeptanz

TransAdelaide hat einen ungewöhnlich komplexen Fahrplan mit einer Vielzahl von verschiedenen relativen Fahrzeiten und Stationshalten. Es gibt Fahrten, die an jeder Station halten und Expresszüge, die nur auf Teilen der Strecke halten. Bei den Expresszügen gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Haltemustern. Weiterhin verkehren viele Fahrten nur auf einer verkürzten Linie. Dennoch werden alle Stationen, entsprechend des Bedarfs, häufig angefahren. Die Akzeptanz des Systems ist bei den Kunden sehr hoch, die Züge sind meist gut ausgelastet.

Literatur

Bei den mit „unveröffentlicht“ gekennzeichneten Quellen handelt es sich um Studien, die nicht veröffentlicht wurden. Teilweise sind sie vertraulich, einige können jedoch beim Verfasser oder beim Auftraggeber eingesehen werden.

[Benjamin-1987] Benjamin, B.R., Long, A.M., Milroy, I.P., Payne, R.L., Pudney, P.J.: „Control of Railway Vehicles for Energy Conservation and Improved Timekeeping“, South Australian Institute of Technology, Adelaide, 1987

[Burkhardt-2001] Burkhardt, M.: „Erstellung eines Modells zur Wirtschaftlichkeitsberechnung von Systemen zur Realisierung der energiesparsamen Fahrweise bei Bahnsystemen“, Studienarbeit, Fachgebiet Energie- und Rohstoffwirtschaft, TU Berlin, 2001, unveröffentlicht

[EBO-1992] Deutsche Bundesbahn / Deutsche Reichsbahn: „Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung EBO“ vom 27. Mai 1967, Ausgabe 1992

[EiB-2003] Homepage der Auszubildenden zum „Eisenbahner im Betriebsdienst“ der DB Cargo in München: „http://www.eib-t.de“, Stand 03.06.2003, München, 2003

[Encarta-2002] Microsoft Corporation: „Microsoft Encarta Professional 2003“, digitale Enzyklopädie auf DVD, Redmond, WA, USA, 2002

[EWG-1991] Rat der Europäischen Gemeinschaften: „Richtlinie 91/440/EWG des Rates vom 29. Juli 1991 zur Entwicklung der Eisenbahnunternehmen der Gemeinschaft“, ABl. L 237 vom 24.08.1991, S. 25ff, 1991

[EWSN-1996a] Fachgebiet Eisenbahnwesen und spurgebundener Nahverkehr: „Bericht über theoretische Untersuchungen zur energieoptimalen Fahrweise des ICE mittels fahrdynamischer Simulation“, Bericht Nr. 91/96 im Auftrag der Deutschen Bahn AG, Fachgebiet Eisenbahnwesen und spurgebundener Nahverkehr (ab 1997: Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb), TU Berlin, 1996, unveröffentlicht

[EWSN-1996b] Fachgebiet Eisenbahnwesen und spurgebundener Nahverkehr: „Voruntersuchungen zum Projekt ESF II“, Fachgebiet Eisenbahnwesen und spurgebundener Nahverkehr (ab 1997: Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb), TU Berlin, 1996, unveröffentlicht

[Fenner-1998] Fenner, W., Naumann, P.: „Verkehrssicherungstechnik: Sichern und Überwachen von Fahrwegen und Fahrgeschwindigkeiten im Schienenverkehr“, Hrsg.: Siemens Aktiengesellschaft, Berlin und München, Publicis MCD Verlag, Erlangen und München, 1998

[Forsythe-1957] Forsythe, G.E.: „Generation and use of orthogonal polynomials for data-fitting with a digital computer“, Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, vol. 5, nr. 2, pp. 74-88, Philadelphia, 1957

[Gackenholz-1973] Gackenholz, L.: „Beitrag zur Ermittlung des aerodynamischen Verhältnisse in langen Eisenbahntunneln bei schnellen Zugdurchfahrten“, Dissertation, Technische Universität Hannover, 1973

[Gackenholz-1974] Gackenholz, L.: „Der Luftwiderstand der Züge im Tunnel“, ZEV Glasers Analen 98 (1974), H. 3, S. 79ff., Georg Siemens Verlagsbuchhandlung, Berlin/Bielefeld, 1974

[Hauptmann-2000] Hauptmann, D.: „Automatische und diskriminierungsfreie Ermittlung von Fahrplantrassen in beliebig großen Netzen spurgeführter Verkehrssysteme“, Dissertation, Wissenschaftliche Arbeit Nr. 54 des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Universität Hannover, Hestra-Verlag GmbH & Co. KG, Darmstadt, 2000

[Hausmann-2000] Hausmann, A., Steinbügl, J.: „Grundlagen des Bahnbetriebs“, DB-Fachbuch Band 4/10, Eisenbahn-Fachverlag, Heidelberg - Mainz, 2000

[Hecht-2001] Hecht, M., Salz, D.: „Dieseltriebwagen für Regionalverkehr – Geräuschverhalten und Grenzwerte“, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau 50 (2001), H. 10, S. 575ff., Hestra-Verlag GmbH & Co. KG, Darmstadt, 2001

[Howlett-1995] Howlett, P.G., Pudney, P.J.: „Energy-Efficient Train Control“, Springer-Verlag Limited, London, 1995

[HPW-1995] Häni-Prolectron AG: „Integriertes Bordinformationssystem IBIS2 - Infrarot Informationssystem IRIS2 - Kurzbeschreibung", Version 1.0, Stand 02/1995, Bronschhofen (CH), 1995

[HPW-2001] Häni-Prolectron AG: „IBISplus Depot Daten Manager (DDM) Anwenderbeschreibung“, Version 1.5, Bronschhofen (CH), 2001

[HuberK-2000] Huber, K.: „Elektronischer Buchfahrplan und La bei der Deutschen Bahn“, eb - Elektrische Bahnen, H. 4/2000, S. 115ff, Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München, 2000

[HuberT-2000] Huber, T., Bleser, L.: „Der Anwendungsmanager - Eine IT-Architektur auf den Fahrzeugen der DB AG“, Signal + Draht (92), H. 6/2000, S. 10ff., Tetzlaff Verlag GmbH & Co. KG, Hamburg, 2000

[Hürlimann-2002] Hürlimann, D.: „Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnwesen“, Dissertation, Schriftenreihe 125, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2002

[ISB-1995] Institut für Schienenfahrzeuge und Maschinelle Bahnanlagen: „Studie über energiewirtschaftliches Fahren des ICE“, Bericht Nr. 1-95 im Auftrag der Deutschen Bahn AG, Institut für Schienenfahrzeuge und Maschinelle Bahnanlagen, Universität Hannover, 1995, unveröffentlicht

[ISB-1998a] Institut für Schienenfahrzeuge und Maschinelle Bahnanlagen: „Bestimmung Fahrdynamischer Daten“, Bericht Nr. 4-98 im Auftrag der Deutschen Bahn AG, Institut für Schienenfahrzeuge und Maschinelle Bahnanlagen, Universität Hannover, 1998, unveröffentlicht

[ISB-1998b] Institut für Schienenfahrzeuge und Maschinelle Bahnanlagen: „Entwicklung eines fahrzeuginternen Ortungssystems - Projekt Energiesparsame Fahrweise II“, Bericht Nr. 8-98 im Auftrag der Deutschen Bahn AG, Institut für Schienenfahrzeuge und Maschinelle Bahnanlagen, Universität Hannover, 1998, unveröffentlicht

[ISB-1998c] Institut für Schienenfahrzeuge und Maschinelle Bahnanlagen: „Energiesparsame Fahrweise II - Energiesparsame Fahrweisen für Dieseltraktion“, Bericht Nr. 9-98 im Auftrag der Deutschen Bahn AG, Institut für Schienenfahrzeuge und Maschinelle Bahnanlagen, Universität Hannover, 1998, unveröffentlicht

[Kaminsky-2001] Kaminsky, R.: „Pufferzeiten in Netzen des spurgeführten Verkehrs in Abhängigkeit von Zugfolge und Infrastruktur“, Dissertation, Wissenschaftliche Arbeit Nr. 56 des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Universität Hannover, Hestra-Verlag GmbH & Co. KG, Darmstadt, 2001

[Kapitzke-2002] Kapitzke, S.: „Bestimmung fahrdynamischer Daten auf Schienenfahrzeugen anhand des Verlaufes von Zugfahrten“, Dissertation, Institut für Mechanik, Universität Hannover, VDI Reihe 12, Nr. 501, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002

[Krempl-2003] Krempl, S.: „Überwachung per Mobilfunk“, c’t magazin für computer technik, H. 10/2003, S. 102ff., Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Hannover, 2003

[Lexikon-1983] „Lexikon der Eisenbahn“, 7. Auflage, Transpress, VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin, 1983

[Linder-1993] Linder, U.: „Rechnerische Zugfahrtsimulation“, Studienarbeit, Fachgebiet Spurgebundene Fahrzeuge, Institut für Fahrzeugtechnik, TU Berlin, 1993, unveröffentlicht

[Linder-1994] Linder, U.: „Rechnerische Zugfahrtsimulation“, Diplomarbeit, Fachgebiet Spurgebundene Fahrzeuge, Institut für Straßen- und Schienenverkehr, TU Berlin, 1994, unveröffentlicht

[Milroy-2000] Milroy, I.P.: „METROMISER Proposal for TransAdelaide“, ICT - International Control Technology, Adelaide, Australien, 2000, unveröffentlicht

[Müller-2002] Müller, R.: „Entwicklung von Algorithmen zur hochgenauen Abbildung des Bremsvorganges von Zügen in der Fahrt-verlaufssimulation“, Dissertation, Wissenschaftliche Arbeit Nr. 57 des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Universität Hannover, Hestra-Verlag GmbH & Co. KG, Darmstadt, 2002

[Murr-1991] Murr, E.: „Systembeschreibung der Linienzugbeeinflussung (LZB) der Deutschen Bundesbahn“, Eisenbahn Ingenieur Kalender ’91, Tetzlaff Verlag GmbH, Hamburg, 1991

[Naumann-2002] Naumann, P.; Pachl, J.: „Leit- und Sicherungstechnik im Bahnbetrieb: Fachlexikon“, Band 2, Tetzlaff Verlag GmbH, Hamburg, 2002

[Pachl-2000] Pachl, J.: „Zugbeeinflussungssysteme europäischer Bahnen“, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau 49 (2000), H. 11, S. 725ff., Hestra-Verlag GmbH & Co. KG, Darmstadt, 2000

[Pachl-2002] Pachl, J.: „Systemtechnik des Schienenverkehrs“, 3. Auflage, B.G. Teubner Verlag, Stuttgart - Leipzig - Wiesbaden, 2002

[Pflug-1997] Pflug, G.: „Die Kilometrierung der Bahnstrecken“, EI - Der Eisenbahningenieur (48), H. 12/1997, S. 42ff., Tetzlaff Verlag & Co. KG, Hamburg, 1997

[Pudney-1985] Pudney, P.J.: „Energy Conservation on Suburban Railcars“, School of Mathematics an Computer Studies, South Australian Institute of Technology, Adelaide, 1985

[Pudney-1989] Pudney, P.J., Benjamin, B.R.: „Energy Efficient Running Times for Rail Timetables“, South Australian Institute of Technology, Adelaide, 1989

[RailML-2003] Initiative RailML.org: „Website zur Vorstellung der Initiative und der RailML-Spezifikationen“, http://www.railml.org, Dresden, 2003

[Rick-2003] Rick, F., Venter, G., Grimm, R.: „Zug- und Bremskraftermittlung mittels Online-Fahrwiderstandsmessung“, eb - Elektrische Bahnen, H. 3/2003, S. 120ff, Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München, 2003

[Röbke-Doerr-2003] Röbke-Doerr, P.: „Navigation mit Satelliten“, c’t magazin für computer technik, H. 01/2003, S. 150ff., Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Hannover, 2003

[Sanftleben-2000] Sanftleben, D.: „Konzeption der Zugfahrtsimulation für den Einsatz im Onlinebetrieb“, Dissertation, Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen, Universität Hannover, Shaker Verlag, Aachen, 2000

[Schall03-1990] Bundesbahn Zentralamt München: „Richtlinie zur Berechnung der Schallimmission von Schienenwegen - Ausgabe 1990 - Schall 03“, Amtsblatt der Deutschen Bundesbahn Nr. 14 vom 4. April 1990, lfd. Nr. 133, Drucksachenzentrale der Deutschen Bundesbahn, Karlsruhe, 1990

[Schnabel-1982] Schnabel, H.: „Triebfahrzeugdienst“, Transpress Handbuch, VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin, 1982

[Schüler-Hainsch-1991] Schüler-Hainsch, E.: „Verfahren zur Optimierung des Energieverbrauchs von Zugfahrten“, Dissertation, Fachgebiet Eisenbahnwesen und spurgebundener Nahverkehr, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrswegebau, TU Berlin, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12 „Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik“, 1991, Nr. 157

[Schultz-1999] Schultz, S.: „Entwurf und Implementierung einer Strecken- und Infrastruktur-Datenbank für Schienenverkehrsnetze“, Diplomarbeit, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Institut für Straßen- und Schienenverkehr, TU Berlin, 1999, unveröffentlicht

[SFWBB-1999] Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb: „Bericht über Simulationen zur Bestimmung des Energieverbrauchs eines U-Bahn-Zuges“, Bericht Nr. 127/1999 im Auftrag der Siemens AG VT 28, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, TU Berlin, 1999, unveröffentlicht

[SFWBB-2001a] Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb: „Skript Vorlesung: Bahnbetrieb“, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Institut für Land- und Seeverkehr, TU Berlin, 2001

[SFWBB-2001b] Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb: „Untersuchungen zur Fahrzeugortung für Energiesparsame Fahrweisen (ESF)“, Bericht Nr. 128/99 im Auftrag der Deutschen Bahn AG, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, TU Berlin, aktualisiert 2001, unveröffentlicht

[SFWBB-2001c] Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb: „Abschätzung des netzweiten Einsparpotenzials bei Anwendung der energiesparsamen Fahrweise (ESF)“, Bericht Nr. S9/00 im Auftrag der Deutschen Bahn AG, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, TU Berlin, 2001, unveröffentlicht

[SFWBB-2001d] Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb: „Evaluation of Metromiser-Testing in Buenos Aires (TBA)“, Report No. S25/01 im Auftrag der Siemens AG TS RA, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, TU Berlin, 2001, unveröffentlicht

[SFWBB-2001e] Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb: „Evaluation of Metromiser-Testing in San Diego“, Report No. S26/01 im Auftrag der Siemens AG TS RA, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, TU Berlin, 2001, unveröffentlicht

[SFWBB-2001f] Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb: „Evaluation of Metromiser-Testing in Rio de Janeiro“, Report No. S27/01 im Auftrag der Siemens AG TS RA, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, TU Berlin, 2001, unveröffentlicht

[SFWBB-2002] Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb: „Skript Vorlesung: Informationssysteme im öffentlichen Personenverkehr“, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, Institut für Land- und Seeverkehr, TU Berlin, 2002

[Siegmann-2002] Siegmann, J., Linder, U., Schultz, S.: „Metromiser-Trials on the Gawler Line (TransAdelaide)“, Report No. M01/2002, im Auftrag der Siemens AG TS RA, Berlin, 2002, unveröffentlicht

[Siegmann-2003] Siegmann, J., Linder, U., Schultz, S.: „Evaluation of Metromiser use on the TransAdelaide train network“, Report No. M02/2002, im Auftrag der Siemens AG TS RA, Berlin, 2003, unveröffentlicht

[Siemens-2000] Siemens AG: „Sparen beim Fahren“, Verkehrstechnik Express 1/2000, S. 10, Publicis MCD Verlag, Erlangen, 2000

[Siemens-2002] Siemens AG: „METROMISER optimiert das Fahrverhalten im Nahverkehr“, Produktprospekt Siemens METROMISER, Bestell-Nr. A19100-V200-B753-V2, http://www.metromiser.de, Braunschweig, 2002

[Sonntag-2003] Sonntag, H.: „Zukunft ESF, EBuLa, Anwendungsmanager“, Telefongespräch mit H. Sonntag (Projektleiter ESF; DB AG) am 19.05.2003, Frankfurt a. M., 2003

[TransAdelaide-1997] TransAdelaide: „Drawing 307-A2-97-023; 10th June 1997“, Adelaide, 1997

[VÖV-1984] VÖV-Schrift: „Integriertes Bordinformationssystem (IBIS)“, VÖV Nr. 04.05.4, VDV Nr. 300, Ausgabe 06/1984, Änderung / Ergänzung 1 08/1987, Ergänzung 2 07/1991, Köln, 1984-1991

[W3C-1998] World Wide Web Consortium (W3C): „Extensible Markup Language (XML) 1.0“, Empfehlung vom 10. Februar 1998, http://www.w3c.org/TR/1998/REC-xml-19980210, 1998

[Wende-2003] Wende, D.: „Fahrdynamik des Schienenverkehrs“, 1. Auflage, B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2003

Abkürzungen

AFB	Automatische Fahr- und Bremssteuerung
ATO	Automatic Train Operation (vollautomatisches Fahren)
ATP	Automatic Train Protection (Zugbeeinflussung)
Bf	Bahnhof
CTC	Cost-Time-Curve
DB AG	Deutsche Bahn AG
DCFM	Discounted-Cash-Flow-Methode
DGPS	Differential Global Positioning System
EBA	Eisenbahn-Bundesamt
EBuLa	Elektronischer Buchfahrplan mit Langsamfahrstellen
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
ERTMS	European Rail Traffic Management System
ESF	Energiesparsame Fahrweise
ETCS	European Train Control System
EVC	European Vital Computer
FFB	Funk-Fahr-Betrieb
GSM-R	Global System for Mobile Communication – Rail
IBIS	Integriertes Bordinformationssystem
Indusi	Induktive Zugsicherung
IV	Individualverkehr
La	Langsamfahrstelle
LAN	Local Area Network (lokales Netzwerk)
LZB	Linienzugbeeinflussung
MFA	Multifunktionsanzeige
PFW	Praktizierte Fahrweise
PZB	Punktförmige Zugbeeinflussung
RailML	Markup Language for Railway Applications
SFW	Straffe Fahrweise
Sifa	Sicherheitsfahrschaltung
TEMA	Traktionsenergie Mess- und Abrechnungssystem

Tf	Triebfahrzeugführer
Tfz	Triebfahrzeug
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (ex. VÖV)
VÖV	Verband öffentlicher Verkehrsunternehmen (jetzt VDV)
W3C	World Wide Web Consortium
WLAN	Wireless Local Area Network (drahtloses lokales Netzwerk)
XML	Extensible Markup Language
XSD	XML Schema Definition Language

Formelzeichen / Einheiten

Die Basis-SI-Einheiten[1] sind Meter (m), Kilogramm (kg), Sekunde (s), Ampere (A), Kelvin (K), Mol (mol) und Candela (cd). Aus diesen Basiseinheiten setzen sich alle anderen Einheiten zusammen. Diese können einen eigenen Einheitennamen bekommen.

Im Eisenbahnwesen wurden traditionell häufig nationale Einheiten anstatt der SI-Einheiten verwendet. Inzwischen setzen sich jedoch die SI-Einheiten durch. Gelegentlich werden im Eisenbahnwesen dennoch andere Dimensionen verwendet, so wird z.B. üblicherweise mit Tonnen (t) anstatt Kilogramm (kg) sowie Kilonewton (kN) anstatt Newton (N) gerechnet (Tabelle 43).

Größe	Formel-zeichen	SI-Einheit	Eigener Einheitenname	Sonstige gebräuchliche Einheiten
Arbeit	W	$\mathrm{J} = \mathrm{kg}\,\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}$	Joule	kJ = 10^3 J MJ = 10^6 J kWh = 3,6 · 10^6 J MWh = 3,6 · 10^9 J
Beschleunigung	a	$\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}$		
Drehmoment	M	$\mathrm{Nm} = \mathrm{kg}\,\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}$		
Energie	W	$\mathrm{J} = \mathrm{kg}\,\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}$	Joule	kJ = 10^3 J MJ = 10^6 J kWh = 3,6 · 10^6 J MWh = 3,6 · 10^9 J
Geschwindigkeit	v	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$		$\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$ = 3,6 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$
Kraft	F	$\mathrm{N} = \mathrm{kg}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	Newton	kN = 10^3 N
Leistung	P	$\mathrm{W} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}} = \mathrm{kg}\,\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^3}$	Watt	kW = 10^3 W
Masse	m	kg	Kilogramm	t = 10^3 kg
Radius	r	m	Meter	mm = 10^{-3} m
Trägheitsmoment	J	$\mathrm{kg\,m^2} = \mathrm{N\,m\,s^2}$		
Winkelbeschleunigung	ε	$\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}^2}$		
Winkelgeschwindigkeit	ω	$\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}}$		

Tabelle 43: Formelzeichen und Einheiten

[1] „SI“: französisch „Le Système International d’Unités“. Internationales Einheitensystem

Glossar

Die Erklärungen der im Glossar aufgeführten Begriffe stammen aus eigenen Recherchen oder sind abgeleitet aus den Standardwerken [Lexikon-1983], [Naumann-2002] und [Pachl-2002].

10-Meter-Impuls

Der sog. 10-Meter-Impuls wird von der zentralen Weg- und Geschwindigkeitsmessung des ICE-1 erzeugt. Hierzu werden Wegimpulszähler an einem ungebremsten Laufradsatz in einem Mittelwagen und an drei angetriebenen Achsen eines Triebkopfes verwendet. Daraus wird u.a. alle 10 Meter ein Impuls generiert, der verschiedenen Systemen als Basis zur Ortung des Fahrzeuges dient. Durch die maßgebliche Verwendung des ungebremsten Laufradsatzes kann der negative Einfluss von Antriebs- und Bremsschlupf weitestgehend unterdrückt werden, so dass eine Ortungsabweichung von durchschnittlich 0,15 % erreicht werden kann [ISB-1998b].

Advice System

Ein Advice System ist ein System zur Unterstützung des Triebfahrzeugführers oder einer ATO bei der Wahl der Fahrweise. Advice Systeme berücksichtigen hierfür die Fahrzeug- und Streckendaten, den Fahrplan und ggf. die aktuelle Betriebslage. Ziel der Optimierung kann eine Reduzierung des Energieverbrauchs, des Verschleißes oder der örtlichen Lärmbelastung, die Erhöhung der Pünktlichkeit oder die Erhöhung der Streckenleistungsfähigkeit sein.

Automatic Train Operation (ATO)

Automatic Train Operation bezeichnet eine Betriebsart, bei der der Zugbetrieb vollautomatisch und ohne Einfluss eines Tf geregelt wird. Teilweise ist dieser noch auf dem Fahrzeug, hat jedoch andere Aufgaben. Die ATO basiert auf einer kontinuierlichen Zugbeeinflussung mit genauer Selbstortung (z.B. der → *Linienzugbeeinflussung*), einer → *Automatischen Fahr- und Bremssteuerung*, einer Zugvollständigkeitsüberwachung sowie einer Zentrale, die dem Fahrzeug den Fahrplan zuweist.

Automatische Fahr- und Bremssteuerung (AFB)

Die automatische Fahr- und Bremssteuerung ist ein fahrzeuggestütztes Automatisierungssystem, das das Fahren und Bremsen des Zuges selbstständig nach den Vorgaben einer kontinuierlichen Zugbeeinflussung mit genauer Selbstortung (z.B. der → *Linienzugbeeinflussung*) regelt. Die AFB ist nicht signaltechnisch sicher auszulegen, da die LZB die Fahrt überwacht und ggf. eine Zwangsbremsung einleitet.

Bahnhof

Ein Bahnhof ist eine Bahnanlage mit mindestens einer Weiche, wo Züge beginnen, enden, ausweichen oder wenden dürfen. Bahnhöfe mit Verkehrsaufgaben sind z.B. Personen- und Güterbahnhöfe. Zu den Bahnhöfen ohne Verkehrsaufgaben gehören u.a. Betriebs- und Rangierbahnhöfe.

Beschleunigende Kraft

Eine beschleunigende Kraft ist eine auf das Fahrzeug wirkende Kraft, die das Fahrzeug beschleunigen, aber auch abbremsen kann. Sie wirkt immer mit ihrem vollen Betrag in die entsprechende Richtung. Im Gegensatz dazu steht die → *Widerstandskraft*.

Betriebsleittechnik

Die Betriebsleittechnik fasst alle technischen Einrichtungen zusammen, die an der betriebslenkenden Stelle über den Prozesszustand informieren und von dieser Stelle, meist unter Nutzung der Sicherungstechnik, die Einflussnahme auf den Prozessablauf gestatten. Zur Betriebsleittechnik gehören u.a. die Zugnummermelde- und Zuglaufüberwachungsanlagen, die Komponenten zur Konflikterkennung sowie alle Systeme zur Dispositionshilfe. Neuerdings werden teilweise auch die Systeme der Sicherungstechnik der Betriebsleittechnik zugeordnet.

Betriebsstelle

Betriebsstellen sind alle → *Bahnhöfe*, → *Haltepunkte*, → *Haltestellen*, Block-, Abzweig-, Anschluss- und Deckungsstellen sowie alle weiteren Stellen in Bahnhöfen und auf der freien Strecke, die der unmittelbaren Regelung und Sicherung der Zug- und Rangierfahrten dienen. Betriebsstellen sind meist im Bahnnetz eindeutig benannt.

Bogenwiderstandskraft

Die Bogenwiderstandskraft W_k wird durch die Reibungskräfte beim Befahren von Gleisbögen erzeugt. Bei Fahrt im geraden Gleis ist sie nicht vorhanden. Die dann wirkenden Reibungskräfte sind in der Laufwiderstandskraft berücksichtigt. Sie wirkt immer in Richtung $v \rightarrow 0$, d.h. gegen die Fahrtrichtung. In der Literatur wird die Bogenwiderstandskraft auch als Krümmungs- oder Kurvenwiderstand bezeichnet.

Bremshundertstel

Die Bremshundertstel sind das prozentuale Verhältnis der im Zug wirksamen → *Bremsmasse* zur Gesamtmasse.

Bremsmasse

Die Bremsmasse ist eine Bewertungsgröße der Bremse und von der jeweiligen Fahrzeugmasse unabhängig. Sie wird in Abhängigkeit von der Bremsbauart und dem Bremssystem nach festgelegten Rahmenbedingungen in Bremsversuchen ermittelt.

Bremswiderstandskraft

Die Bremswiderstandskraft W_b ist die vom Bremssystem aufgebrachte Widerstandskraft zur Verringerung der Zuggeschwindigkeit. Im Sinne der Definition gehört die vom Antrieb erzeugte → *generatorische Bremskraft* nicht zur Bremswiderstandskraft, da es sich um eine beschleunigende Kraft handelt.

Dauerleistung

Die Dauerleistung (Nennleistung) ist die Leistung eines Triebfahrzeuges, die, solange kein System ausgefallen ist, dauerhaft vom Antrieb aufgebracht werden kann, ohne dass es zu einer Überlastung kommt. Im Gegensatz dazu stehen die → *Kurzleistung* und die → *Stundenleistung*.

EBuLa

Der **E**lektronische **Bu**chfahrplan mit **La**ngsamfahrstellen (EBuLa) integriert den Buchfahrplan der aktuellen Fahrplanperiode und die tagesaktuellen Langsamfahrstellen in ein gemeinsames System. Dabei wird der Periodenfahrplan auf einer CD-ROM abgelegt, während die tagesaktuellen Änderungen mittels einer Flash-Karte vom Tf vor Fahrtantritt manuell integriert werden. Er ersetzt die auf jedem Tfz mitgeführten gedruckten Fahrzeiten- und Geschwindigkeitshefte und die tagesaktuellen La-Blätter.

Energiesparsame Fahrweise (ESF)

Bei der energiesparsamen Fahrweise werden gezielt die im Fahrplan berücksichtigten Fahrzeitregel- und Bauzuschläge für Maßnahmen zur Reduktion des Traktionsenergieverbrauchs genutzt, indem z.B. die Geschwindigkeit örtlich reduziert wird oder partiell gerollt wird. Die im Fahrplan berücksichtigten Fahrzeitzuschläge dienen vornehmlich zum Ausgleich von betrieblichen oder durch Baumaßnahmen hervorgerufenen Verspätungen und betragen üblicherweise 5 bis 12 % der minimalen Fahrzeit. Bei pünktlicher oder nur wenig verspäteter Abfahrt kann der verbleibende Fahrzeitzuschlag nun für die energiesparsame Fahrweise verwendet werden.

Fahrdynamik

Die Fahrdynamik beschäftigt sich mit der Längsbewegung des Fahrzeuges im Gleis. Fahrzeugbewegungen und Kräfte quer oder vertikal zur Gleisachse sind gegenüber der Längsbewegung relativ klein und werden nur indirekt betrachtet, sofern sie einen Einfluss auf die Längsbewegung haben.

Fahrdynamische Aufzeichnung

Unter einer fahrdynamischen Aufzeichnung wird die regelmäßige Aufzeichnung von mindestens zwei der drei grundlegenden kinematischen Größen Zeit, Ort und Geschwindigkeit einer Fahrzeugbewegung auf einem Datenaufzeichnungsgerät (auch Logger genannt) verstanden.

Generatorische Bremskraft

Die generatorische Bremskraft F_{bg} ist die vom Antrieb im Generatorbetrieb aufgebrachte Kraft entgegen der Fahrtrichtung. Sie dient zum Abbremsen des Fahrzeuges. Bei Fahrzeugen und Bahnstromnetzen mit Rückspeisemöglichkeit kann ein Teil der bei der generatorischen Bremsung umgesetzten Energie in das Netz zurückgespeist werden (→ *Rekupationsbremse*).

Haltepunkt

Ein Haltepunkt ist eine Bahnanlage der freien Strecke ohne Weichen, wo Züge planmäßig halten, beginnen oder enden dürfen. Im Zusammenhang mit dem Halt an einer → *Station* wird der Begriff auch für den exakten Ort des Anhaltens verwendet.

Haltestelle

Eine Haltestelle ist eine Abzweig-, Überleit- oder Anschlussstelle, die mit einem → *Haltepunkt* örtlich verbunden ist. Im Nahverkehr wird der Begriff häufig in der Bedeutung des Begriffs → *Station* verwendet.

Hangabtriebskraft

Die Hangabtriebskraft F_h ist die in Streckenrichtung wirkende Komponente der Gewichtskraft des Fahrzeuges im Steigungs- oder Gefällebereich. Es handelt sich um eine → *beschleunigende Kraft*. In der Literatur wird die Hangabtriebskraft auch als Neigungs- oder Steigungswiderstand bezeichnet.

IBIS

Das Integrierte Bordinformationssystem (IBIS) ist ein Informations- und Kommunikationssystem für den Einsatz in Fahrzeugen des öffentlichen Personen-Nahverkehrs (Bus und Bahn). Die Grundfunktionalität des IBIS-Systems, der Wagenbus (VDV-300) und die Wagenbustelegramme sind vom VDV standardisiert. Zu den Aufgaben von IBIS gehören u.a. die Ortung, die Steuerung von Haltestellen- und Zugzielanzeigern, die Steuerung von Fahrscheinentwertern oder -verkaufsautomaten sowie die Steuerung der Kommunikation mit der Betriebsleitzentrale.

Induktive Zugsicherung (Indusi)

Indusi ist die Systembezeichnung für die bei der DB AG verwendete Realisierungsform einer punktförmigen → *Zugbeeinflussung* mit Informationsübertragung durch ein induktives Resonanzsystem.

Kurzleistung

Die Kurzleistung (Minutenleistung) ist die Leistung eines Triebfahrzeuges, die kurzzeitig (z.B. zur Anfahrt) aufgebracht werden kann. Bei E-Traktion kann der Motor üblicherweise kurzzeitig um 80 – 90 % über der → *Dauerleistung* belastet werden, ohne dass das Isolationsmaterial der Motorwicklung aufgrund der schnell steigenden Temperatur Schaden nimmt.

Laufwiderstandskraft

Die Laufwiderstandskraft W_l setzt sich aus dem Rollwiderstand zwischen Rad und Schiene, dem Lagerwiderstand, den dynamischen Widerständen aus den Schwingungswiderständen und dem Luftwiderstand zusammen. Sie wirkt immer in Richtung $v \rightarrow 0$, d.h. gegen die Fahrtrichtung. Im Tunnel ist zusätzlich zur Laufwiderstandskraft die → *Tunnelwiderstandskraft* zu berücksichtigen.

Linienzugbeeinflussung

Die Linienzugbeeinflussung (LZB) ist eine Form der kontinuierlichen → *Zugbeeinflussung* bei der ein im Gleis verlegter Linienleiter als Kommunikations- und Ortungsmedium von Fahrzeug und Zentrale verwendet wird.

Massenfaktor

Der dimensionslose Massenfaktor ξ dient zur Berücksichtigung der bei der translatorischen Beschleunigung des Fahrzeuges mit zu beschleunigenden rotatorischen Massen (z.B. Rad, Getriebe, Motorwelle) als Faktor zur Gesamtmasse des Fahrzeuges. Es handelt sich um die Summe aus dem Faktor 1 und dem → *Massenzuschlag*.

Massenzuschlag

Der dimensionslose Massenzuschlag ρ dient zur Berücksichtigung der bei der translatorischen Beschleunigung des Fahrzeuges mit zu beschleunigenden rotatorischen Massen (z.B. Rad, Getriebe, Motorwelle). Er setzt die zusätzlichen rotatorischen Massen ins Verhältnis zur Masse des Fahrzeuges.

Ortungskomponente

Eine Ortungskomponente ist ein Teil des → *Ortungssystems* zur Bestimmung des momentanen Ortes eines Fahrzeuges. Aus der Ortungskomponente selbst kann der Ort häufig noch nicht bestimmt werden. Erst aus der Verknüpfung mit anderen Ortungskomponenten und einem Streckenatlas kann dies zuverlässig geschehen. Absolute Ortungskomponenten liefern eine absolute Position auf dem Bahnnetz (z.B. Ortungsbaken) oder eine geografische Position (z.B. GPS), während relative Ortungskomponenten eine Veränderung der Position auf dem Bahnnetz angeben (z.B. Wegimpulszähler).

Ortungssystem

Als Ortungssystem wird das komplette System zur Bestimmung des momentanen Ortes eines Fahrzeuges bezeichnet. Dabei handelt es sich üblicherweise um eine Softwarekomponente auf dem Bordcomputer, die ausgehend von verschiedenen → *Ortungskomponenten* (z.B. Wegimpulszähler, Radar, GPS) und einem digitalen Streckenatlas kontinuierlich oder auf Anfrage den Ort des Fahrzeuges auf dem Bahnnetz und ggf. seine Geschwindigkeit und Beschleunigung berechnet.

Reisegeschwindigkeit

Die Reisegeschwindigkeit gibt die durchschnittliche Geschwindigkeit von Anfangs- zum Endpunkt des Reisenden bzw. des Gutes an. Sie berücksichtigt neben der reinen Fahrzeit auch Wege- und Wartezeiten.

Rekupationsbremse

Die Rekupationsbremse ist ein Antriebssystem eines Fahrzeuges, das in der Lage ist, auch im Generatorbetrieb als Bremse zu wirken (→ *Generatorische Bremskraft*).

Sicherheit

Sicherheit ist nach DIN 31004 das Freisein von Gefährdung. Gefahr ist ein Zustand, aus dem Schaden entstehen kann. Bei öffentlichen Bahnen bezieht sich der Sicherheitsbegriff auf Personen und Sachen gleichermaßen, d.h. es kann nur eine einheitliche Sicherheitsanforderung für alle Transportgüter auf öffentlichen Bahnen geben. Im Zusammenhang mit Sicherungsanlagen wird auch der Begriff signaltechnische Sicherheit verwendet. Eine Anlage wird als signaltechnisch sicher betrachtet, wenn sie mit ausreichend großer Wahrscheinlichkeit verhindert, dass anlagentechnische Defekte oder Bedienungsfehler zu Betriebsgefährdungen führen.

Sicherheitsfahrschaltung (Sifa)

Bei der Sifa handelt es sich um eine elektromechanische oder elektronische Einrichtung zur Überwachung der Diensttauglichkeit des Tf beim Führen eines Tfz. Der Tf muss während der Fahrt eine Hand- oder Fußtaste (Sifa-Taster) in regelmäßigen Abständen (z.B. 30 oder 60 s) kurzzeitig betätigen. Bei Nahverkehrsbetrieben wird anstelle der Taste gelegentlich ein Fußpedal verwendet, das ständig in der Mittelstellung zu halten ist. Bei Nichtbeachtung wird nach einer akustischen Vorwarnung eine Zwangsbremsung eingeleitet.

Sicherheitsnachweis

Ein Sicherheitsnachweis ist Bestandteil des Zulassungsverfahrens einer signaltechnisch sicher auszuführenden Anlage. Im Sicherheitsnachweis ist der Zulassungsbehörde (in Deutschland das Eisenbahn-Bundesamt) glaubhaft und nachvollziehbar zu belegen, dass die betreffende Anlage unter den gegebenen Einsatzbedingungen die an sie gestellten Forderungen hinsichtlich der Sicherheit im erforderlichen Umfang erfüllt. Dabei ist das ausfallbedingt zu aktivierende Ersatzsystem einzubeziehen.

Sicherungstechnik

Die Sicherungstechnik fasst alle Systeme zur Sicherung des Zugverkehrs zusammen. Hierzu gehören u.a. die Abstandsregelung zwischen zwei Zugfahrten auf derselben Strecke in derselben Richtung (Zugfolge), die Verhinderung von Flankenfahrten, das Absichern von Durchrutschwegen und die Verhinderung der Einfahrt zweier Züge aus beiden Richtungen in eine eingleisige Strecke. Die Erlaubnis, in einen oder mehrere Fahrwegsabschnitte einzufahren, wird dem Tf üblicherweise über ortsfeste Signale oder fahrzeugseitige Einrichtungen (Führerraumsignalisierung) erteilt.

Spitze Fahrweise

Eine spitze Fahrweise liegt vor, wenn das Fahrzeug aus dem Stillstand mit maximaler Zugkraft beschleunigt und ohne Beharrungs- und Auslaufphase mit der vorgesehenen Betriebsbremsverzögerung bis zum Stillstand abbremst.

Station

Eine Station ist ein → *Bahnhof*, ein → *Haltepunkt* oder eine → *Haltestelle* mit Verkehrsaufgaben.

Straffe Fahrweise (SFW)

Bei der straffen Fahrweise beschleunigt das Fahrzeug mit maximaler Zugkraft auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit und hält diese, bis es mit der vorgesehenen Betriebsbremsverzögerung abbremst. Auf eine örtliche Änderung der zulässigen Streckenhöchstgeschwindigkeit reagiert das Fahrzeug jeweils mit maximaler Zugkraft bzw. vorgesehener Betriebsbremsverzögerung. Ausrollphasen werden nicht berücksichtigt.
Die straffe Fahrweise führt zur kürzesten Fahrzeit, mit der ein Fahrzeug eine Strecke unter Berücksichtigung seiner Leistungsfähigkeit und der Streckenparameter befahren kann.

Streckenwiderstand

Als Streckenwiderstand wird in der Literatur häufig die Summe aus → *Hangabtriebskraft* und → *Bogenwiderstandskraft* bezeichnet.

Stundenleistung

Die Stundenleistung ist die gegenüber der → *Dauerleistung* erhöhte Leistung eines Triebfahrzeuges, die für einen längeren Zeitraum (z.B. zur Überwindung von Steigungen) aufgebracht werden kann, ohne dass es zu einer Überlastung kommt.

Tunnelwiderstandskraft

Die Tunnelwiderstandskraft W_t ist eine zusätzliche → *Laufwiderstandskraft*, hervorgerufen durch den erhöhten Luftwiderstand im Tunnel. Sie ist abhängig vom Tunnelquerschnitt, der Tunnellänge, dem Fahrzeugquerschnitt und der Geschwindigkeit.

Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit ist, ähnlich der → *Zuverlässigkeit*, die Fähigkeit einer Anlage oder eines Systems, während seiner vorgesehenen Nutzungsdauer ausfallfrei zu funktionieren, bezieht sich jedoch auf reparierbare bzw. erneuerbare Systeme. Der Grund des Ausfalls ist für die Verfügbarkeit unerheblich. Bezieht sich die Verfügbarkeit auf ein ganzes System, ist es außerdem gleichgültig, ob die zu Ausfällen führenden Fehler in der eigentlichen Anlage oder durch den Ausfall des Ersatzsystems ihren Ursprung haben. Die Anlage oder das System muss unter den vorgesehenen Einsatzbedingungen betrieben sowie sachkundig bedient werden und zu Beginn der Betrachtung fehlerfrei sein.

Widerstandskraft

Eine Widerstandskraft ist eine Kraft, die immer in Richtung $v \rightarrow 0$ wirkt, also entgegen der momentanen Fahrtrichtung. Sie kann ein Fahrzeug niemals antreiben. Sie wirkt nicht immer mit ihrem vollen Betrag, sondern ist im Stillstand maximal so groß, dass sie den beschleunigenden Kräften entgegenwirkt und das Fahrzeug im Stillstand hält. Im Gegensatz dazu steht die → *beschleunigende Kraft*.

Beispiel: Selbst bei voll angezogenen Bremsen ist die Bremswiderstandskraft maximal so groß, dass sie das Fahrzeug entgegen der Hangabtriebskraft im Gefälle im Stillstand hält.

Zugbeeinflussung

Die Zugbeeinflussung (auch Automatic Train Protection – ATP) genannt) ist ein Sicherungssystem, bei dem Informationen über die zulässige Fahrweise vom Stellwerk über den Fahrweg (z.B. Indusi, Balise) oder ein geeignetes Kommunikationssystem (z.B. LZB, Funk) zum Fahrzeug übertragen werden, um dort bei einer Abweichung von der erlaubten Fahrweise eine Zwangsbremsung auszulösen.

Zugkraft

Die Zugkraft F_z wird durch den Antrieb des Fahrzeuges erzeugt und dient zur Beschleunigung und zur Überwindung der Lauf- und Streckenwiderstände. Die Zugkraft verläuft im Allgemeinen in Richtung der Fahrtrichtung. Wenn die vom Antrieb erzeugte Kraft entgegen der Fahrtrichtung wirkt, spricht man von einer → *generatorischen Bremskraft*.

Zuverlässigkeit

Als Zuverlässigkeit wird im Bahnbetrieb die Fähigkeit einer Anlage oder eines Systems betrachtet, während seiner vorgesehenen Nutzungsdauer ausfallfrei zu funktionieren. Hierzu muss die Anlage oder das System jedoch unter den vorgesehenen Einsatzbedingungen betrieben sowie sachkundig bedient werden und zu Beginn der Betrachtung fehlerfrei sein. Die Zuverlässigkeit bezieht sich auf Systeme, die nicht reparierbar- bzw. erneuerbar sind, ansonsten wird der Begriff → *Verfügbarkeit* verwendet.

Stichwortverzeichnis

10-Meter-Impuls....63, 71, **227**
Advice System..25, 39, 54, 59, 60, 61, 62, 67, 78, 79, 91, 98, 124, **227**
  Akzeptanz..36, 93, 111, 113, 114, 136, 154, 155, 158, 161
  ATO....39, 91, 94, 96, 108
  Aufbau....96
  Bewertung....123, 136, 140, 149, 153, 156, 189
  Datenbedarf....203
  Entwicklung....98, 119
  Erwartungshaltung....110, 112, 120, 153
  Hardware....77, 96, 109, 116, 120, 126, 146
  Projektierung....115, 118, 145, 150, 163
  realisierte....114
  Serienbetrieb....156, 163, 165
  Software....73, 77, 96, 99, 107, 109, 115, 119
  Systemeinführung..110, 111, 112, 149, 155, 163, 165
  Triebfahrzeugführer....*Siehe* Triebfahrzeugführer
  Voraussetzungen....73, 80, 114, 153
Antriebssteuerung....25, 27, 37, 55, 59, 60
Anwendungsmanager....78
Auslauf vor Bremsung....43, 50, 55
Ausrollen....*Siehe* Coasten
Automatic Train Operation....25, 36, 37, 94, **227**
Automatic Train Protection....*Siehe* Zugbeeinflussung
Automatische Fahr- und Bremssteuerung....36, 92, **227**
Bahn 2000....82
Bahnhof....**227**
Bahnkilometer....62
Bahnreform....1
Bahnübergang....34
Balise....16, 18, 64
Bauzuschlag....23, 84
Beförderungsgeschwindigkeit....23
Beförderungszeit....23
Bergfahrt mit Schwung....43, 50
Beschleunigende Kraft....176, **228**
Betriebsbremsverzögerung....5, 33, 55, 204
Betriebsleittechnik....*Siehe* Leittechnik
Betriebsstelle....21, 52, 123, **228**
Betriebssystem....80, 98, 99, 101, 109, 116, 120, 126
Bewegung
  gleichförmige....187
  gleichmäßig beschleunigte....56, 124, 129, 187, 191
  translatorische....187
Bewegungsgleichungen....187
Bildfahrplan....21
Bogenwiderstandskraft....178, 183, **228**
Bonussystem....36
Bordcomputer....77, 78, 80, 96, 98, 109, 115, 116, 142, 154, 161, 170
Bremseinsatzpunkt....33, 43, 56
Bremshundertstel....93, 181, **228**
Bremskraft....25, 27, 28, 32, 41, 130, 204
  generatorisch....31, 177, 178, 181, 204, **229**
Bremsmasse....181, **228**
Bremssteuerung....25, 32, 60
Bremsverzögerung....33, 44, 55, 203, 204
Bremswegabstand, absoluter....19
Bremswiderstandskraft....177, 181, **228**
Buchfahrplan....7, 21, 77, 81, 108
Cashflow....139, 140, 143
Coasten....41, 44, 169, 193
Coasting-Surface....57, 58
Cost-Time-Curve....44, 81, 84, 193
Cruisen....41, 42, 169, 193
Daten
  aktuelle betriebliche....74, 76, 91, 103
  Aufbereitung....102, 142
  aufgezeichnete....74, 76
  Format....103, 104
  Handling....92, 102, 103
  periodenabhängig....73, 76, 102, 103
  quasistatisch....73, 76, 102
  tagesaktuell....74, 76, 77, 91, 92, 102, 103
Datenart....73, 76
Datenversorgung....73, 74, 76, 103, 105, 106, 119, 120, 153, 154, 163, 164
  automatisiert....75, 119
  Just-in-Time....75
  manuell....74, 119
Dauerleistung....28, 179, **229**
Davis, Laufwiderstandkraft-Formel....131, 132, 133, 182, 204
Dienstfahrplan....21
Discounted-Cash-Flow-Methode 139, 140, 144, 161, 162, 165
EBuLa....21, 77, 78, 79, 114, **229**
Echtzeit....39, 49, 85, 96, 99, 101, 122, 171, 189

Eisenbahn-Infrastruktur-Unternehmen 1, 2
Eisenbahn-Verkehrs-Unternehmen 1, 2, 25, 110, 111, 113, 120
Energiesparsame Fahrweise ... 5, 6, 38, 41, 78, 160, 171, **229**
Algorithmen 48, 55, 84
Fahrstufenkombinationsverfahren 48
Güterverkehr 54
ICE 114
LOK 114
Nahverkehr 41, 44, 49, 55, 73, 115, 203
Personen-Fernverkehr . 41, 49, 50, 69, 73, 85, 94, 170
Traktion 59
Erfolgsgarantie 143, 147
Ertrag 139
EURO-Balise 16, 18, 64
EURO-Cab 17
EURO-Loop 17, 18
European Rail Traffic Management System ... 16, 20, 170
European Train Control System 14, 16, 20, 64, 82, 93, 170
European Vital Computer 17
EURO-Radio 17, 18
Fahr- und Bremsstufen 10, 11, 25, 27, 31, 39, 48, 61, 89, 91, 95, 98, 179
Fahrdynamik 3, 10, 11, 114, 169, 175, 190, 204, **229**
Fahrdynamische Aufzeichnung 121, 136, 157, **229**
Fahrdynamische Simulation 189
Fahren auf Sicht 12, 111
Fahrgeschwindigkeit 2, 23
Fahrmethode 3, 42, 50, 193, 196
Fahrphase 3, 50, 51, 52, 53, 55, 193
Fahrplan 2, 5, 7, 21, 25, 33, 35, 36, 37, 54, 73, 74, 77, 79, 80, 81, 84, 91, 93, 103, 104, 108, 111, 115, 116, 118, 136, 163, 164, 170, 206, 213
öffentlicher 22
Fahrplanoptimierung 84, 170
Fahrschaulinie 3, 24, 128, 201
Fahrsperre 14, 18
Fahrstrategie 3, 49
Fahrtverlauf 32, 123, 129
Fahrweise 3
Fahrzeit 5, 23
Fahrzeitenheft 21
Fahrzeitermittlung 24
Fahrzeitreserve 44, 80, 85, 170
Fahrzeitzuschlag 23, 207
Fahrzeugnachbildung 189
Fahrzeugortung ..... *Siehe* Ortung
Fahrzeugsteuerung 10, 25, 92, 96, 108
Fahrzustand 3, 50, 52
Framework 99, 101
Führerraumsignalisierung 13, 15, 18
Funk-Fahr-Betrieb 64
Galileo 65
Geschwindigkeitsheft 21, 108
Geschwindigkeitsschrittverfahren ..... *Siehe* Mikrogeschwindigkeitsschrittverfahren
Gewinn 139
GLONASS 65
GPS 61, 65, 67, 71, 123
GSM-R 17, 19, 20, 66, 75, 106
Haltepunkt 33, 56, 66, 203, **230**
Haltestelle **230**
Hangabtriebskraft 177, 180, **230**
Hanker, Bogenwiderstandkraft-Formel 183
Hardware Abstraction Layer 99, 101
Hilfsbetriebe 28, 59, 60
Höchstgeschwindigkeit 23
IBIS 7, 79, 105, 106, 116, 119, 207, **230**
Individualverkehr 34, 111
Induktive Zugsicherung ..... Siehe Indusi
Indusi 14, **230**
Jentsch und Preysing, Laufwiderstandkraft-Formel 182
Kinematik 187
Knotenleistungsfähigkeit 7, 87, 120
Kohlepfennig 36
Kommunikation . 14, 19, 35, 63, 74, 75, 79, 84, 91, 92, 93, 94, 96, 98, 101, 104, 105, 107, 119, 120, 142, 163
Kosten 139
Kraftschlussbeiwert 180
Kraftschlussgrenze 180
Kreiselstabilisierte Plattform 66
Krümmungswiderstand ..... *Siehe* Bogenwiderstandskraft
Kurvenwiderstand ..... *Siehe* Bogenwiderstandskraft
Kurzleistung 28, 179, **230**
Lärm 2, 8, 87
Laufwiderstandskraft 11, 121, 178, 182, 204, **230**
Least-Square-Fit 47, 132
Leistung am Fahrdraht 29
Leittechnik 19, 20, 82, 84, 85, 91, 170, 189, **228**
Linienleiter 14, 17, 63

Linienzugbeeinflussung 14, 17, 18, 37, 63, 67, 71, 72, 75, 93, **231**
LZB ..... *Siehe* Linienzugbeeinflussung
Makrogeschwindigkeitsschrittverfahren 190
Makrozeitschrittverfahren 190
Massebandmodell 185
Massenfaktor 175, **231**
Massenzuschlag 175, **231**
Massepunktmodell 184
Mehrmassenkörper 184
Messfehler 71, 122, 124, 126, 127
METROMISER ..... *Siehe* Siemens METROMISER
Mikrogeschwindigkeitsschrittverfahren 191
Mikrowegschrittverfahren 191
Mikrozeitschrittverfahren 191
Mindestbremshundertstel 181
Minutenleistung ..... *Siehe* Kurzleistung
Multifunktionsanzeige 15
Nebenbetriebe 28, 59, 60
Neigungswiderstand ..... *Siehe* Hangabtriebskraft
Nennleistung ..... *Siehe* Dauerleistung
Netzsimulation 188, 189
Offline-Verfahren 49
On Board Unit .. *Siehe* Siemens METROMISER On Board Unit
Online-Verfahren 49, 52
Optimierungsziele 6, 87, 89, 120
Ortung 16, 61, 73, 102, 120, 134
  makroskopisch 62
  mikroskopisch 62
Ortungsfehler 53, 197
  makroskopisch 68
  mikroskopisch 68, 69
  nachlaufend 69
  vorlaufend 69
Ortungskomponenten 61, 62, 66, 67, **231**
Ortungssystem 102, **231**
Peters, Laufwiderstandkraft-Formel 182
Planmäßige Fahrzeit 23
Praktizierte Fahrweise 5, 134, 159
Pre-Sales-Aktivitäten 149, 151
Probebetrieb 115, 150, 165
Protopapadakis, Bogenwiderstandkraft-Formel 183
Pünktlichkeit 2, 7, 70, 81, 87, 89, 111, 115, 120, 123, 134, 135, 141, 153, 156
Radar 61, 66
Rappenglück, Laufwiderstandkraft-Formel 182
Reaktionszeit 34, 36, 53, 55, 95, 203, 204, 207
Rechenzeit 49, 53, 70, 190, 191
Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit 42, 50, 51, 55, 59
Regelfahrzeit 23, 24
Regelzuschlag 23, 24, 84
Reine Fahrzeit 23, 24
Reisegeschwindigkeit 2, 23, **231**
Reisezeit 23
Rekupationsbremse 27, 30, **231**
Restbeschleunigung durch Schwerkraft 44, 50
Resultierende Kraft 175, 185
Röckl, Bogenwiderstandkraft-Formel 183
Rotationsbewegung 175
Runge-Kutta-Schrittverfahren 189, 190
Satellitenortung 65
Sauthoff, Laufwiderstandkraft-Formel 182
Schall 03 87
Schramm, Bogenwiderstandkraft-Formel 183
Schulung 41, 87, 113, 142, 145, 150, 155, **163**
Sensitivitätsanalyse 140, 141, 147, 154
Sicherheit 12, **232**
Sicherheitsfahrschaltung 35, **232**
Sicherheitsnachweis 39, 64, 95, **108**, 120, **232**
Sicherungstechnik 12, 93, 170, 189, **232**
Siemens METROMISER 80, 113, 115, 136, 149, 150, 154, 157, 160, 163, 207
  On Board Unit 115, 116
  Time Table Optimiser 115, 118, 133
Sifa ..... *Siehe* Sicherheitsfahrschaltung
Signaltechnische Sicherheit ..... *Siehe* Sicherheit
Simpsonsche Regel 190
Single-Train-on-Single-Track-Simulation ..... *Siehe* Fahrdynamische Simulation
Sonderzuschlag ..... *Siehe* Bauzuschlag
Spitze Fahrweise 5, **232**
Station 23, 205, 206, **232**
Steigungswiderstand ..... *Siehe* Hangabtriebskraft
Straffe Fahrweise 5, 23, 134, **233**
Strahl, Laufwiderstandkraft-Formel 182
Streckenatlas 61, **62**, 64, 65, 66, 68, 102
Streckenleistungsfähigkeit 7, 87, 120
Streckenwiderstand 178, **233**
Stundenleistung 28, 179, **233**

TEKNIS METROMISER 61, 115, 150, 153, 155
Testbetrieb 112, 113, 120, 149, 151, **155**, 164
Time Table Optimiser ..... *Siehe* Siemens METROMISER Time Table Optimiser
Traktion
dieselelektrisch 60, 212
dieselhydraulisch 61, 115, 212
elektrisch 27, 28, 47, 59
TransAdelaide 115, 149, 153, 155, 157, 160, 209
Translationsbewegung 175
Trassenpreissystem 1
Triebfahrzeugführer 8, 35, 39, 92, 111
Tunnelwiderstandskraft 178, 183, **233**
Türfreigabe 66, 98, 105
Umlaufzeit 23
Umsatzsteigerung 147
UMTS 66, 106
Universität Südaustralien 115
Verfügbarkeit 67, 73, **233**
Verschleiß 2, 7, 41, 87, 120, 141, 169
Vorschaubereich 15, 36, 91
Voruntersuchungen 149, **154**
Wartung **107**, 142, 145, 146, 163, 164
Wegimpulsgeber ..... *Siehe* Wegimpulszähler
Wegimpulszähler 61, 63, 66, 71, 105, 106, 124, 125, 205
Wegschrittverfahren ..... *Siehe* Mikrowegschrittverfahren
Weiterentwicklung 156, 168
Wendezeit 23
Widerstandskraft 176, **233**
resultierende 185
Wireless Local Area Network 75, 163
Wirkungsgrad 28, 30, 31, 60
Wirtschaftlichkeit **139**
Auszahlungen 142, 145
Betrieb 140
Bewertung 148
Einzahlungen 141, 145
Finanzierungsparameter 143
Rechnung 140
Systementwickung 144
WLAN ..... *Siehe* Wireless Local Area Network
Zeitschrittverfahren ..... *Siehe* Mikrozeitschrittverfahren
Zielbremsung **33**, 37
Zinssatz 140, 143
Zugabfertigung **33**, 37
Zugbeeinflussung 13, 25, 35, **234**
kontinuierlich 13, 14, 36, 37
punktförmig 13, 14, 16, 18
Zugfahrtsimulation 24, 48, 121, 188, **189**
Zugfolge 12, 24, **81**, 232
Zugkraft 25, 28, 177, 178, **234**
am Treibradumfang 178
am Zughaken 179
Induzierte 178
Kennlinie 27, 61, 179, 201
Zuglänge 33, **184**
Zugvollständigkeitsprüfung 19
Zulässige Geschwindigkeit 23
Zusatznutzen 139, 140, 141, 142, 154
Zuverlässigkeit **234**

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand aus meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb der Technischen Universität Berlin.

Allen, die mich bei dieser Arbeit unterstützt und motiviert haben, mir Materialien überlassen oder Informationen zur Verfügung gestellt haben, möchte ich an dieser Stelle herzlich danken.

Zu besonderem Dank bin ich verpflichtet bei

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil **J. Siegmann**, Leiter des Fachgebietes „Schienenfahrwege und Bahnbetrieb“ der Technischen Universität Berlin,
für die Gewährung der Promotionsmöglichkeit und für eine intensive Betreuung der Arbeit mit wichtigen und konstruktiven Diskussionen und wertvollen Ratschlägen.

Herrn em. Prof. Dr.-Ing. **W. Herbst** (†), ehemaliger Leiter des Fachgebietes „Eisenbahnwesen und spurgebundener Nahverkehr“ der Technischen Universität Berlin,
für die Anregungen zu meinem Dissertationsthema und die wissenschaftliche Betreuung meines beruflichen Werdegangs.

Herrn Prof. Dr.-Ing. **P. Mnich**, Leiter des Fachgebietes „Betriebssysteme elektrischer Bahnen“ der Technischen Universität Berlin,
für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Herrn em. Prof. Dipl.-Ing. **H. Brändli**, ehemaliger Leiter der Gruppe „Öffentlicher Verkehr und Eisenbahnbau“ der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich,
für die Erstellung des Zweitgutachtens und die kritische Durchsicht und Bewertung der Arbeit.

Herrn Dipl.-Ing. **L. Hübner** und Herrn Dipl.-Ing. **R. Waßmann**, meinen langjährigen Kollegen am Fachgebiet „Schienenfahrwege und Bahnbetrieb“ der Technischen Universität Berlin,
für vielfältige Ratschläge und Korrekturen sowie dem engagierten Beistand in der Endphase der Arbeit.

Allen anderen **Mitarbeitern** und **studentischen Hilfskräften** am Fachgebiet „Schienenfahrwege und Bahnbetrieb“ der Technischen Universität Berlin,
für hilfreiche Unterstützung und gute Zusammenarbeit währen der letzten acht Jahre.

Ganz besonders großer Dank gebührt Stefanie, Julian, Mareike und Annika für ihr Verständnis und ihre Geduld, sowie meinem Bruder Michael und meinen Eltern Helga und Werner für die vielfältige Unterstützung.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Ulrich Linder
Geburtsdatum und -ort	28.02.1968 in Heilbronn

Schulbildung

1974 – 1977	Rosenau-Grundschule in Heilbronn
1977 – 1980	Conrad-Grundschule in Berlin
1980 – 1987	Werner-von-Siemens-Oberschule in Berlin Abschluss: Abitur

Studium

1987 – 1994	Studium der Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Berlin
1987	Grundpraktikum bei der Siemens AG
1990	Vordiplom
1994	Fachpraktikum bei der Hamburger Hochbahn AG
1994	Diplom
1995 – 2003	Promotionsstudium an der Technischen Universität Berlin

Berufstätigkeit

1987 – 1995	Div. freiberufliche sowie studentische Tätigkeiten: Softwareentwicklung; Consulting Bahnbetrieb; Projektbearbeitung Mess- und Prüftechnik
1996 – 2002	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb der Technischen Universität Berlin
seit 2003	Freiberuflicher Ingenieur Beratung und Entwicklung in der Bahntechnik