

Bestimmung fahrdynamischer Daten auf Schienenfahrzeugen anhand des Verlaufes von Zugfahrten

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Ing. Simon Kapitzke
geboren am 19. April 1970 in Celle

2001

Referent: Prof. em. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Gerhard Voß
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Popp
Tag der Promotion: 7. Dezember 2001

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen und am Institut für Mechanik der Universität Hannover.

Für die Unterstützung und Betreuung meiner Dissertation möchte ich dem ehemaligen Leiter des Instituts für Schienenfahrzeuge, Herrn Prof. em. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Gerhard Voß, besonders herzlich danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Popp danke ich für die sehr freundliche Aufnahme am Institut für Mechanik nach Schließung des Instituts für Schienenfahrzeuge und für die Übernahme des Korreferats.

Allen Mitarbeitern und wissenschaftlichen Hilfskräften der Institute für Schienenfahrzeuge und für Mechanik sei Dank für die vielfältigen Unterstützungen. Besonderer Dank geht an Christian Scholz, Dirk Sanftleben, Friedrich Ehrmann und Martina Heskamp, für die Unterstützung und dem Beistand bei der Anfertigung der Dissertationsschrift.

Simon Kapitzke

Abstract

Kapitzke, Simon:

Bestimmung fahrdynamischer Daten auf Schienenfahrzeugen anhand des Verlaufes von Zugfahrten (BfD)

Anwendungen der Telematik erfassen verkehrsrelevante Daten, verarbeiten sie und verwenden die gewonnenen Informationen zur Verkehrsbeeinflussung, -steuerung und -information.

Diese Arbeit zeigt ein Verfahren auf, mit dem im planmäßigen Betrieb fahrdynamische Daten bestimmt werden können. Die BfD ermittelt für die Telematikanwendung "Energiesparende Fahrweise" die aktuelle Masse und den Luftwiderstand des Zuges. Die Funktionalität des Verfahrens wird veranschaulicht. Anhand praktischer Messungen im Planbetrieb auf einer Fernverkehrslok und einer Güterverkehrslok wird der allgemeine Einsatz des Verfahrens aufgezeigt.

Stichwörter: Telematik, Schienenfahrzeug, fahrzeugseitig

Determination of drive dynamic data on rail vehicles by using the characteristics of the running train (BfD)

Telematic applications capture relevant traffic data, processes it and uses it for traffic influences, steering and information. This work shows a process that can determine drive dynamic data during the regular operation. The BfD determines the current mass and the air resistance of a train for the use of telematic 'energy saving driving'. The function of the process is being illustrated. The common use of the process is illustrated per practical measurements during regular operation of long distance traffic train and freight train.

Keywords: telematic, train, onboard

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
1 Einleitung	3
2 Fahrdynamische Daten	5
2.1 Die wissenschaftlichen Grundlagen der Zugfahrsimulation	5
2.2 Bestimmung fahrdynamischer Daten	9
2.3 Anwendungen der Zugfahrsimulation	11
2.4 Motivation zur Bestimmung fahrdynamischer Daten	13
3 Ansatz zur Bestimmung fahrdynamischer Daten	15
3.1 Anforderungen an die BfD aus der ESF	15
3.2 Entwicklung des Ansatzes zur BfD	18
3.2.1 BfD in der Beschleunigung	19
3.2.2 BfD in der Beharrung	21
3.2.3 BfD im Auslauf	22
3.2.4 BfD bei der Bremsung	23
3.3 Ansatz zur BfD	24
4 Praktische Untersuchungen	27
4.1 Die Messungen auf der InterRegio-Linie 19	29
4.1.1 InterRegio mit der Lok 101 038 als Untersuchungsobjekt	29
4.1.2 Messsignalquellen	30
4.1.3 Messstrecke	31
4.1.4 Begleitete Messfahrten	32
4.2 Analyse der Messungen	32
4.2.1 Beschleunigung	33
4.2.2 Beharrung	40
4.2.3 Rollphase ohne Zug-/ Bremskraft	44
4.3 Fazit für die Umsetzung der BfD	51

5	Verfahrensbeschreibung der BfD	53
5.1	Datenaufbereitung vor Fahrtbeginn	55
5.2	Messwertverarbeitung	58
5.3	Bestimmung der fahrdynamischen Daten	59
5.3.1	Fahrzustand bestimmen	59
5.3.2	Umsetzung der Massenbestimmung in der Beschleunigung	61
5.3.3	Umsetzung der Massenbestimmung in der Beharrung	62
5.3.4	Umsetzung der Luftwiderstandsbestimmung im Auslauf	63
5.4	Ergebnisverarbeitung	64
6	Anwendung der BfD	66
6.1	Anwendung bei der ESF	66
6.2	Übertragbarkeit der BfD	68
6.2.1	Güterzug mit der Lokomotive der Baureihe 152	69
6.2.2	Allgemeine Betrachtungen	74
7	Fazit und Ausblick	77
8	Zusammenfassung	79
9	Literaturverzeichnis	81
	Anhang A: Abkürzungen aus der DS100	85
	Anhang B: Allgemeine Abkürzungen	86

1 Einleitung

Der Verkehr in den dicht besiedelten Regionen Europas ist durch ein stetiges Wachstum geprägt. Die Menschen verlangen nach immer größerer Mobilität. Der Güterverkehr wächst mit zunehmender Globalisierung, Öffnung der Märkte und der Liberalisierung des Handels. Auf Straßen und Schienen der Bundesrepublik Deutschland haben zwischen den Jahren 1991 und 1998 der Personenverkehr um 6,6 % und der Güterverkehr um 19,7 % zugenommen. Für den Zeitraum bis zum Jahr 2015 prognostiziert das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen für den Personenverkehr einen Zuwachs um rund 20 Prozent und der Güterverkehr wird um etwa 64 Prozent steigen (Basisjahr 1997). [BMVBW-00]

Diese steigende Verkehrsnachfrage ist eine Herausforderung an alle Verkehrssysteme. Mit den wachsenden Verkehren wird auch die Umwelt- und Kostenbelastung der Gesellschaft steigen. Um diesen Effekt einzudämmen oder vielleicht umzukehren müssen die Verkehrssysteme weiterentwickelt und verbessert werden. Der Einsatz moderner Techniken ist daher auch bei der Bahn unumgänglich. [Heinisch]

Die Telematik nimmt eine zunehmende Schlüsselrolle bei der Bahn ein. Informations-, Nachrichten- und Datenverarbeitungssysteme werden miteinander verknüpft und stellen deutliche Verbesserungen im System Bahn dar. Die Anwendungsmöglichkeiten sind vielfältig und werden in folgende Bereiche unterteilt: [Streit-97], [Keller-01]

- Betriebsleitung und -steuerung
- Ressourcen- und Anschlussdisposition
- Kundeninformation und -service
- Vernetzung mit anderen Verkehrsträgern

In der Betriebssteuerung stellt die Energiesparende Fahrweise (ESF), die am Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen der Universität Hannover entwickelt wurde, ein Verfahren zur effizienteren Gestaltung des Schienenverkehrs dar. Durch den Einsatz der ESF wird die Deutsche Bahn AG den Energieverbrauch der ICE Flotte um über 7,5 Prozent senken. Die ersten Triebzüge sind seit dem Frühjahr

2001 für die ESF ertüchtigt und in absehbarer Zeit wird der Einsatz im planmäßigen Betrieb der ICE-Züge erfolgen. [Voß-98]

Die Reduktion des Energieverbrauchs und der ökonomische Vorteil der ESF sind so deutlich, dass die Deutsche Bahn AG diese computergestützte Fahrstrategie auch auf allen Lokomotiven und Steuerwagen zum Einsatz bringen will [DB-98].

Für die Ermittlung der ESF ist es notwendig, den Zug datentechnisch zu modellieren. Dies wird beim Einsatz auf dem ICE mittels einer Datenbank realisiert. Soll die ESF jedoch auf Fahrzeugen eingesetzt werden, von denen die fahrdynamischen Daten des Zuges nicht bekannt sind und somit auch nicht in einer Datenbank vorliegen, würde der Einsatz der ESF daran scheitern. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren vorgestellt, durch dessen Anwendung es möglich ist, die fahrdynamischen Daten onboard zu bestimmen.

2 Fahrdynamische Daten

Die Wissenschaft um den Fahrwiderstand ist annähernd so alt wie die Eisenbahn selbst. So hat bereits A. Frank, der die Professur mit dem Lehrgebiet Eisenbahnmaschinenwesen an der Technischen Hochschule Hannover im April 1881 antrat, über den Bewegungswiderstand von Eisenbahnfahrzeugen doziert [Frank-89]. Die damals verwendeten Formeln besitzen auch heute im Zeitalter leistungsfähiger Rechner noch Gültigkeit. Verändert haben sich jedoch die fahrdynamischen Eingangsparameter, da sich auch die Fahrzeuge und deren Technik im Laufe der Zeit geändert haben.

Die Bestimmung der fahrdynamischen Daten und deren Zusammenhänge haben zum Ziel, den Fahrverlauf von Schienenfahrzeugen abzubilden, um so Aussagen über die Eigenschaften der Fahrzeuge treffen zu können. Dabei stellen die wissenschaftlichen Formeln die Basis dar und die fahrdynamischen Daten werden als Eingangsparameter für die Berechnungen genutzt, um die Ergebnisse in der Zugfahrsimulation zu erhalten. Unter Fahrdynamik werden in diesem Zusammenhang nur die Kraft- und Bewegungsverhältnisse in Längsrichtung der Bewegungsrichtung der Fahrzeuge verstanden. Da die Qualität der Ergebnisse sowohl von der Formulierung der dynamischen Zusammenhänge als auch von den Eingangsdaten abhängt, muss für die Zugfahrsimulation eine vernünftige Datenbasis geschaffen werden.

2.1 Die wissenschaftlichen Grundlagen der Zugfahrsimulation

Um eine wissenschaftlich fundierte Widerstandsformel aufzustellen, ist es notwendig in ihr alle Anteile des Fahrwiderstandes, gegliedert nach ihrer physikalischen Ursache, darzustellen [Mehlhorn-95], [Voß-87]. In der Literatur werden für die mathematische Beschreibung der Bewegungsvorgänge von Zügen zahlreiche Formeln genannt. Hier werden diejenigen Formeln betrachtet, die derzeit bei der DB zugrunde gelegt werden [DB-83].

Die fahrdynamische Grundgleichung für die Ermittlung des **Fahrwiderstands** eines Zuges setzt sich wie folgt zusammen:

$$W_{Fahr} = Z = W_{Lauf} + W_{Strecke} + W_{Beschl.} \quad \text{Gleichung 2-1}$$

mit: W_{Fahr}	Fahrwiderstand in N
Z	Zug-/Bremskraft in N
W_{Lauf}	Laufwiderstand in N
$W_{Strecke}$	Streckenwiderstand in N
W_{Bschl}	Beschleunigungswiderstand in N

Der **Laufwiderstand** des Zuges ist abhängig von fahrzeugspezifischen Kenngrößen und wird nach folgender Formel ermittelt:

$$W_{Lauf} = W_R + W_V + W_{Luft} \quad \text{Gleichung 2-2}$$

mit: W_R	Rollwiderstand in N
W_V	Dämpfungswiderstand in N
W_{Luft}	Luftwiderstand in N.

Bei den drei Komponenten handelt es sich um den **Rollwiderstand**,

$$W_R = m \cdot g \cdot c_r \quad \text{Gleichung 2-3}$$

mit: m	Masse in kg
g	Fallbeschleunigung ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$)
c_r	Rollwiderstandsbeiwert in –

den geschwindigkeitsabhängigen **Dämpfungswiderstand**

$$W_V = c_d \cdot v \quad \text{Gleichung 2-4}$$

mit: c_d	Dämpfungswiderstandsbeiwert in Ns/m
v	Fahrgeschwindigkeit in m/s

und den **Luftwiderstand**:

$$W_{Luft} = \frac{1}{2} \cdot A_0 \cdot \rho_{Luft} \cdot c_l \cdot (v + v_{Wind})^2 \quad \text{Gleichung 2-5}$$

mit: A_0	Querschnittsfläche in m^2
ρ_{Luft}	spezifische Luftdichte in kg/m^3
c_l	Luftwiderstandsbeiwert in –
v	Fahrgeschwindigkeit in m/s
v_{Wind}	Windgeschwindigkeit in m/s

Die Faktoren des Luftwiderstands werden zur anschaulicheren Rechnung auch in dem **Luftwiderstandsfaktor** wie folgt zusammengefasst:

$$c_2 = \frac{1}{2} \cdot A_0 \cdot \rho_{Luft} \cdot c_l \quad \text{Gleichung 2-6}$$

mit: c_2 Luftwiderstandsfaktor in $N \cdot s^2 / m^2$

Der **Streckenwiderstand** ist abhängig von den Neigungsverhältnissen, der Krümmung sowie der Lage, der Länge und der Form der Tunnel.

$$W_{Strecke} = W_{Neig} + W_{Krü} + W_T \quad \text{Gleichung 2-7}$$

mit: W_{Neig} Neigungswiderstand in N
 $W_{Krü}$ Krümmungswiderstand in N
 W_T Tunnelwiderstand in N

Der durch die Neigung s verursachte **Neigungswiderstand** wird nach der Formel

$$W_{Neig} = m \cdot g \cdot c_s \quad \text{Gleichung 2-8}$$

mit m Masse in kg
 g Fallbeschleunigung ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$)
 c_s Neigung in m/m

berechnet.

Der **Krümmungswiderstand** wird für allgemeine fahrdynamische Berechnungen nach den neutralen Röckl'schen Formeln bestimmt [Keßler-94]:

$$W_{Krü} = \frac{500}{R - 30} \cdot \frac{1}{1000} \cdot m \cdot g \dots\dots \text{für : } R < 300 \text{ m} \quad \text{Gleichung 2-9}$$

$$W_{Krü} = \frac{650}{R - 55} \cdot \frac{1}{1000} \cdot m \cdot g \dots\dots \text{für : } R \geq 300 \text{ m} \quad \text{Gleichung 2-10}$$

mit R Krümmungshalbmesser in m
 m Masse in kg
 g Fallbeschleunigung ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$)

Bei Tunnelfahrten ist zusätzlich zum o.g. Luftwiderstand der **Tunnelwiderstand** wirksam. Der Tunnelwiderstand beinhaltet die Erhöhung des aerodynamischen Widerstands, der durch die Wechselwirkung zwischen Tunnel und Zug entsteht. Untersuchungen haben ergeben, dass der Tunnelwiderstand entsprechend dem Luftwiderstand auf freier Strecke proportional mit dem Staudruck wächst. Daher können die aerodynamischen Verhältnisse im Tunnel durch einen von der Fahrgeschwindigkeit unabhängigen Tunnelzuschlag berücksichtigt werden. [Gackenholtz-74]

$$W_{T.} = \frac{1}{2} \cdot A_0 \cdot \rho_{Luft} \cdot c_l \cdot v^2 \cdot c_t \quad \text{Gleichung 2-11}$$

mit: A_0 Querschnittsfläche in m^2
 ρ_{Luft} spezifische Luftdichte in kg/m^3
 c_l Luftwiderstandsbeiwert in –
 v Fahrgeschwindigkeit in m/s
 c_t Tunnelzuschlagsfaktor in –

Während der Beschleunigungs- und Bremsphase müssen auch die rotierenden Massen beschleunigt bzw. abgebremst werden. Die Berücksichtigung der dazu notwendigen Kräfte erfolgt über den Massefaktor, der aus dem Verhältnis zwischen der Gesamtmasse und der Einsatzmasse der rotierenden Teile bestimmt werden kann.

$$W_{Beschl} = m \cdot (1 + \rho_{rot}) \cdot a_{trans} \quad \text{Gleichung 2-12}$$

mit m Masse in kg
 ρ_{rot} Massefaktor in –
 a_{trans} translatorische Beschleunigung in m/s^2

Für verschiedene fahrdynamische Betrachtungen werden der Strecken- und Beschleunigungswiderstand als Steigungswiderstand zusammengefasst.

$$W_{Steig} = W_{Strecke} + W_{Beschl} \quad \text{Gleichung 2-13}$$

Die translatorische Beschleunigung kann nach der folgenden Gleichung beschrieben werden:

$$a_{trans} = \frac{Z - (W_{Lauf} + W_{Strecke})}{m \cdot (1 + \rho_{rot.})} \quad \text{Gleichung 2-14}$$

mit	Z	Zugkraft in N
	W_{Lauf}	Laufwiderstand in N
	$W_{Strecke}$	Streckenwiderstand in N
	m	Masse in kg
	ρ_{rot}	Massefaktor in –

Aus diesen Gleichungen gehen die fahrzeugspezifischen fahrdynamischen Daten hervor, die in der folgenden Tabelle 2.1 zusammengefasst aufgeführt sind:

- Masse m in kg
- Massefaktor ρ_{rot} in –
- Luftwiderstandsfaktor c_2 in $N \cdot s^2/m$
- Dämpfungswiderstandsbeiwert c_d in Ns/m
- Rollwiderstandsbeiwert c_r in –

Tabelle 2.1: Fahrzeugspezifische fahrdynamische Daten

2.2 Bestimmung fahrdynamischer Daten

Die fahrdynamischen Daten sind die Eingangsgrößen für die Rechnungen zur Zugfahrtsimulation und müssen für die zu lösende Aufgabe jeweils bestimmt werden. Bei der typischen Anwendung der Fahrtsimulation in der Fahrplanerstellung werden die Züge aus einer Datenbank modelliert. Dabei wird bewusst in Kauf genommen, dass die Fahrzeuge nicht einzeln nachgebildet werden, sondern der Zug pauschal nach Art, Gattung, Anhängelast und Zuglänge charakterisiert wird und die fahrdynamischen Daten entsprechend zugeordnet werden [DB-83]. Die Informationen der Datenbank wurden mittels Messungen bei Versuchsfahrten generiert. Dabei sind viele Werte auch Erfahrungswerte, die teilweise in den verschiedenen Quellen differieren [DB-92], [Vollmer-89], [DB-83]. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn für Fahrzeuge keine Messungen vorgenommen und die Laufwiderstandsbeiwerte abgeschätzt wurden.

Für die in Kapitel 2.1 beschriebenen Zusammenhänge werden verschiedene Fahrzeugdaten für die Berechnungen benötigt, die sich auf verschiedene Art und Weise ermitteln lassen. Bei der klassischen Untersuchung eines Fahrzeugs gibt es verschiedene Versuchsanordnungen, um die jeweiligen Fahrzeugeigenschaften zu bestimmen.

Der Rollwiderstandsbeiwert und der Massefaktor lassen sich durch den Auslaufversuch mit konstanter Steigung ermitteln. Dabei wird das zu untersuchende Fahrzeug mit einer niedrigen Geschwindigkeit angeschoben und rollt bergauf. Beim Vorbeirollen an einem ortsfesten Punkt wird die Geschwindigkeit gemessen. Die Entfernung zum höchsten erreichten Punkt wird festgehalten. Beim anschließenden Bergabrollen wird die Geschwindigkeit wiederum an dem ortsfesten Punkt gemessen. Mittels einer Energiebetrachtung lassen sich dann Rollwiderstandsbeiwert und Massefaktor bestimmen. Wird dieser Versuch in der waagerechten Ebene durchgeführt, so lässt sich der Rollwiderstandsbeiwert vereinfacht über die Länge des Auslaufs bestimmen [Mehlhorn-95, S.17f]. Alternativ kann der Rollwiderstandsbeiwert auch durch den Schleppversuch ermittelt werden. Dabei wird das Fahrzeug mit konstanter und niedriger Geschwindigkeit im ebenen Gleis gezogen, und die übertragene Zugkraft, mit der man dann auf den Rollwiderstandsbeiwert schließen kann, wird gemessen [ORE-91].

Der Luftwiderstandsbeiwert lässt sich durch den Auslaufversuch bestimmen. Dabei sollte ein möglichst großer Geschwindigkeitsbereich erfasst werden. Ein gerades und ebenes Gleis, Windstille und ein gutes Gleisbett bei den Messungen stellen für die Messungen die idealen Bedingungen dar. Ermittelt wird dann der Luftwiderstandsbeiwert, indem die Beschleunigungen über der Zeit aufgezeichnet werden. Anschließend lässt sich über ein geeignetes Regressionsverfahren und die Anwendung der fahrdynamischen Grundgleichungen der Luftwiderstandsbeiwert formulieren. [ORE-91]

Die Bestimmung des Dämpfungswiderstandsbeiwertes ist schwierig, da er nur sehr klein ist und in der Ungenauigkeit der Messungen untergeht. Prinzipiell lässt er sich auch aus den beschriebenen Auslaufversuchen ermitteln. [ORE-91], [Peters-90]

Die Fahrzeugmasse wird dabei üblicherweise mit einer Waage bestimmt. Die Bestimmung der aktuellen Zugmasse, die von der Beladung und Besetzung des Zuges

abhängig ist, lässt sich durch den Federweg bzw. Federluftdruck bei den Sekundärfedern realisieren. [VoßH-98]

2.3 Anwendungen der Zugfahrsimulation

Die Formulierung der Fahrdynamik und der Eingangsgrößen der Fahrdynamik stellt die Voraussetzung für die Zugfahrsimulation dar. Sie findet bei der Bahn vielfältige Anwendungsgebiete mit unterschiedlichen Anforderungen und Zielsetzungen. Im Folgenden werden die wesentlichen Anwendungsbereiche der Fahrzeitrechnung und deren Eigenschaften aufgezeigt. Dabei weichen die verschiedenen Arten der Zugfahrsimulation durch die unterschiedliche Formulierung der Eingangsparameter und die mehr oder minder detaillierte Anwendung der Fahrdynamik voneinander ab.

Die wissenschaftliche Zugfahrsimulation

Das Ziel bei der wissenschaftlichen Vorgehensweise ist es, eine möglichst exakte Modellierung und Formulierung der Vorgänge bei einer Zugsbewegung zu realisieren. Hier werden alle Eingangsgrößen möglichst genau und detailliert ermittelt und in der Fahrsimulation exakt verwendet. Auf dieses Verfahren bauen die praktischen Anwendungen auf, weshalb es somit die Bezugsbasis der unterschiedlichen praktischen Anwendungen bildet.

Zugfahrsimulation in der Zugsicherung

Bei den unterschiedlichen Zugsicherungssystemen wird an definierten Orten oder kontinuierlich die Fahrgeschwindigkeit erfasst und auf deren Sicherheit kontrolliert. Dabei werden für einen Zug in dessen Sicherungskonzept Geschwindigkeiten vorgegeben, die nicht überschritten werden dürfen. Bei der Bestimmung dieser Geschwindigkeiten werden innerhalb der fahrdynamischen Ansätze die Zusammenhänge so formuliert, dass sie sicher eingehalten werden können. Mit der Fahrdynamik wird hier im Wesentlichen das zuverlässige Anhalten vor Gefahrenpunkten und die sichere Geschwindigkeitsreduzierung auf ein niedrigeres Geschwindigkeitsniveau überwacht.

Die Fahrplankonstruktion

In der Fahrplankonstruktion gilt es, die Fahrzeit wiederkehrender Zugfahrten für einen Fahrplanzeitraum so festzulegen, dass ein möglichst guter Kompromiss zwischen Zuverlässigkeit der Zugfahrten, die sich in der Pünktlichkeit widerspiegelt, und der Leistungsfähigkeit, die sich in der Planreisezeit niederschlägt, gefunden wird. Es ist also notwendig, für planmäßig gleiche Zugfahrten die sich ändernden Randbedingungen durch Pauschalwerte so vorzugeben, dass die Ziele der Fahrplanerstellung erreicht werden. So wird beispielsweise der Wind, der sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und variierenden Richtungen zeigt, pauschal als direkter Gegenwind mit 15 km/h berücksichtigt. Die folgende Liste führt die Abweichungen von der wissenschaftlichen Vorgehensweise auf. [Keßler-94]

- Die Zugmasse wird mit der maximalen Planlast definiert
- Die Triebfahrzeugleistung wird mit 10 bis 25 % unter der Zugkraft-Geschwindigkeits -Kennlinie der Konstantleistung angesetzt
- Beim Luftwiderstand wird von einem konstanten Gegenwind mit der Geschwindigkeit von 15 km/h ausgegangen
- Die Fahrzeit wird abhängig von der Bespannung, der Anhängelast, der Höchstgeschwindigkeit und der Zuggattung pauschal mit 3 bis 6 % Zuschlag versehen.
- Der Bremsvorgang wird mit konstanter Verzögerung gerechnet

Zugfahrtsimulation Online (ZFSimOn) bei der Energiesparenden Fahrweise (ESF)

Bei der ZFSimOn der ESF wird entsprechend der Fahrzeitrechnung vorgegangen und zusätzlich der Energieumsatz berechnet. Der nicht genutzte Anteil des pauschalen Fahrzeitzuschlages von 3 bis 6 % wird bei diesem Verfahren für die Strategien der ESF genutzt, um damit Energie einzusparen. Dabei werden für die Zugfahrt Auslaufabschnitte vorausberechnet, die energieoptimal kombiniert werden. Für diese Vorausberechnung müssen die fahrdynamischen Eigenschaften hinreichend bekannt sein, um Verspätungen ausschließen zu können. [Sanftleben-99a]

Zugfahrtsimulation in den Betriebsleitzentralen

In der zentralen Betriebsleitung und den dezentralen Betriebsleitungen werden die Arbeiten immer stärker rechnerunterstützt durchgeführt. Dabei ist auch die Zugfahrtsimulation eine Basisfunktion, um bei Konfliktsituationen im Netz eine Entscheidungshilfe zu bieten. Diese Zugfahrtsimulation entspricht der Fahrplankonstruktion [Breu-92]

2.4 Motivation zur Bestimmung fahrdynamischer Daten

Bei den Bahnen finden immer mehr rechnergestützte Systeme Einzug, die den Betriebsablauf unterstützen und verbessern. Dabei wird die Datenverarbeitung für die Planung, Erfassung und Prognose der Betriebsabläufe eingesetzt. Mit zunehmenden Leistungsanforderungen an die Bahnen müssen auch die Datenverarbeitungssysteme immer qualifiziertere Ergebnisse liefern.

Die Energiesparende Fahrweise erschließt mit einer intelligenten, energieoptimierten Fahrweise ein nennenswertes Energieeinsparpotential. Die ESF hat auf dem ICE das wirtschaftlich nutzbare Energieeinsparpotential von 7,5 % in einem viermonatigen Praxiseinsatz aufgezeigt [Voß-98a].

Die ESF wird auf dem Fahrzeug durchgeführt, wo ein Rechner die Fahrempfehlung mittels der Zugfahrtsimulation Online bestimmt. Dabei benötigt die Zugfahrtsimulation für die Ermittlung der optimalen Fahrstrategie einerseits die Ist-Daten, die sich aus Zugposition, Zeitpunkt und Fahrgeschwindigkeit zusammensetzen, und andererseits die Soll-Daten, die fahrzeugspezifische, streckenspezifische und fahrplanspezifische Daten beinhalten. Bei den fahrzeugspezifischen Daten wird für die Qualität in der Zugfahrtrechnung gefordert, dass „die Zugmasse bekannt ist, dass der Luftwiderstand hinreichend genau bestimmt werden kann und dass die übrigen Daten zumindest pauschal vorgegeben werden können.“ [Sanftleben-99a, S.40]

Beim ICE gibt der Triebfahrzeugführer die fahrzeugspezifischen Daten durch die Auswahl der sogenannten „Triebfahrzeug-Baureihen-Variante“ vor. Diese enthält unter anderem Angaben zur Stromartausrüstung, zur Höchstgeschwindigkeit und zur Konfiguration mit Zugmasse und Luftwiderstand des aktuellen Triebzuges [TLC-99].

Durch diese Eingabe werden mit der Software aus der gespeicherten Datenbank die relevanten Fahrzeugdaten ausgewählt und der ZFSimOn bereitgestellt. Diese Vorgehensweise ist beim ICE-Verkehr hinreichend genau, effektiv und kostengünstig, da für die ICE-Flotte eine umfangreiche und sehr genaue Datenbasis existiert, die in umfassenden praktischen Versuchsprogrammen erstellt wurde. Soll die ESF jedoch auch großflächig bei den Bahnen zum Einsatz kommen, stellt sich das Problem, dass für eine Vielzahl der Fahrzeuge keine ausreichend abgesicherte Datenbasis vorhanden ist. Bei den Zügen, die sich aus fahrdynamisch ausreichend beschriebenen Wagen zusammensetzen, stellt die Dateneingabe bei inhomogenen Wagentypen (z.B. Güterzüge, Autozüge) eine für den Betrieb nicht praktikable Lösung dar, weil in diesen Fällen jeder Wagen einzeln bei der ESF Software eingegeben oder entsprechende Datenschnittstellen zu stationären Systemen geschaffen werden müssten. Weiterhin ist der Luftwiderstand bei offenen Güterwagen deutlich abhängig von der Art der Beladung [Vollmer-89]. Ebenso variiert die Zugmasse in Abhängigkeit von der Beladung bzw. der Besetzung des Zuges.

Hier zeigt sich, dass die Bestimmung der fahrdynamischen Daten von Schienenfahrzeugen für die ESF bei einer Vielzahl von Verkehren auf den Schienen noch nicht gelöst ist.

Ziel dieser Arbeit ist es ein Verfahren zu entwickeln, das in der Lage ist, die fahrdynamischen Daten (s. Tabelle 2.1) des aktuellen Zuges auf dem Fahrzeug zu bestimmen. Dieses Verfahren soll der ESF die Informationen zur Fahrzeugmasse und zum Luftwiderstand liefern können, wenn diese Daten nicht hinreichend genau vorliegen oder wenn der Zugriff auf Datenbanken zu aufwendig ist.

3 Ansatz zur Bestimmung fahrdynamischer Daten

Für die Bestimmung fahrdynamischer Daten (BfD) sind verschiedene Vorgehensweisen denkbar. So wäre zum Beispiel durch eine Kommunikation zwischen Triebfahrzeug und intelligenten Wagen Austausch der fahrdynamischen Daten möglich. [Voß-01] Hier wird jedoch sehr schnell deutlich, dass die nötige Technik noch nicht vorhanden ist. Weiterhin wäre auch ein optisches System denkbar, bei dem die Oberflächenstruktur des Zuges erfasst und daraus der aerodynamische Widerstand bestimmt wird. Diese Idee wird jedoch am Aufwand scheitern und ist in der Machbarkeit fraglich.

Bei der Entwicklung einer praxisnahen Bestimmung fahrdynamischer Daten sollte ein Verfahren angewandt werden, welches die vorhandenen Informationen des Triebfahrzeugs nutzt und onboard die Bestimmung der fahrdynamischen Daten realisiert. Dieser Ansatz ermöglicht die Umsetzung des Verfahrens mit vertretbarem Aufwand. Für die Untersuchungen wurde daher die moderne Lok der Baureihe 101 der Deutschen Bahn AG ausgewählt. (s. Kapitel 4)

3.1 Anforderungen an die BfD aus der ESF

Die Motivation ein Verfahren zur Bestimmung der fahrdynamischen Fahrzeugdaten zu entwickeln kommt aus der ESF. Die ESF benötigt die Fahrzeugdaten in einer hinreichend genauen Qualität, die von der BfD erreicht werden muss.

Bei der Realisierung der ESF wurden die Qualitätsanforderungen an die Fahrzeugdaten nicht quantifiziert, da mit den vorhandenen Fahrzeugdaten für den ICE die ESF qualitativ gute Ergebnisse liefert [Sanftleben-99a], [TLC-99]. Insbesondere die Vorgabe der Pünktlichkeit wird zuverlässig eingehalten. Somit gilt für die Anforderung an die Qualität der Fahrzeugdaten die Qualität der Daten beim ICE-Verkehr als ausreichende Referenz. Durch diese Vorgehensweise wird die BfD den Anforderungen der ESF genügen.

Die Qualitätsanforderungen bei der Formulierung der Masse lassen sich aus der möglichen Variation der Besetzung im ICE herleiten. Bei einem ICE mit 10 Mittelwagen

variiert die Masse zwischen 670 t unbesetzt und 730 t besetzt, was zeigt, dass die Werte in einem Bereich von $\pm 5\%$ liegen können und dabei die Funktionstüchtigkeit des ESF-Systems gegeben ist.

Die notwendige Qualität des Luftwiderstands wird durch die Betrachtung der Windinflüsse verdeutlicht. So ist beim ICE-Verkehr die ESF auch bei den verschiedenen Windgeschwindigkeiten, die zusätzlich auf das Fahrzeug wirken, zuverlässig. Die Schwankungen der Windgeschwindigkeiten veranschaulicht die Abbildung 3.1.

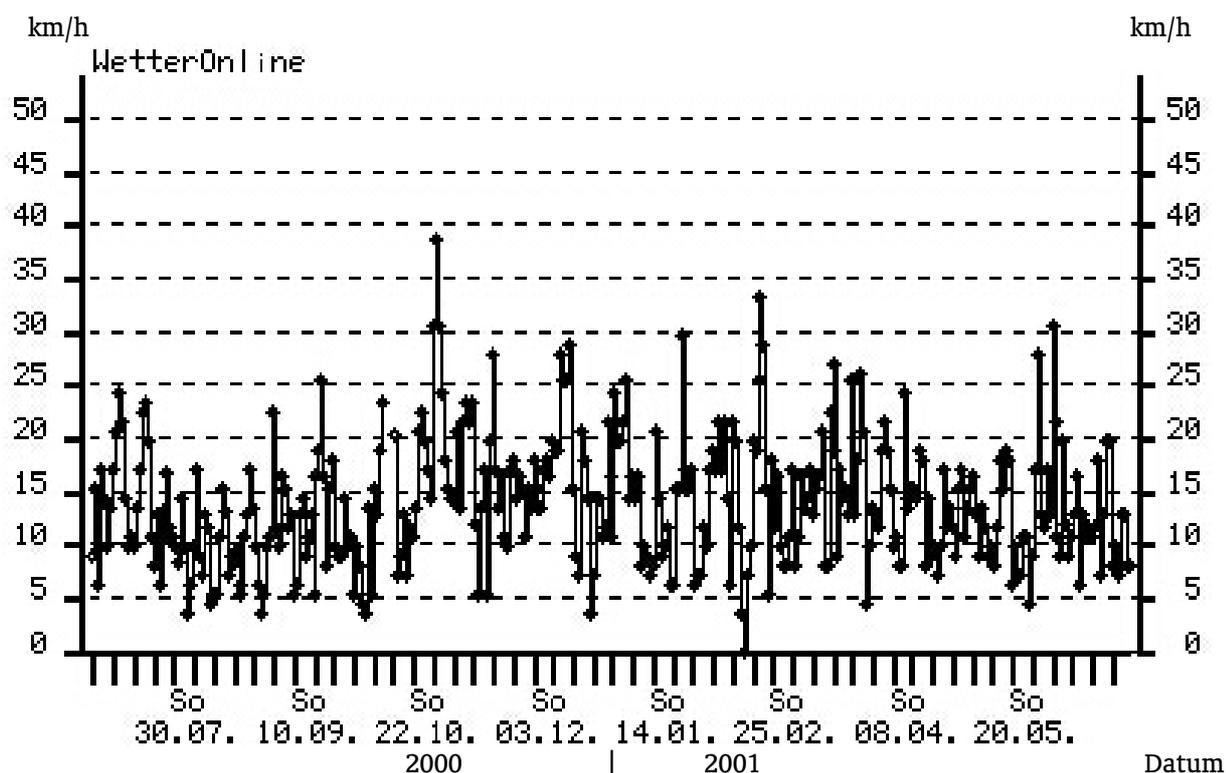


Abbildung 3.1: Mittlere Windgeschwindigkeit am Flughafen Hannover Langenhagen in der Zeit vom 1. Juni 2000 bis zum 30. Juli 2001 in km/h je Kalendertag [Klassen]

Bei der Betrachtung der Windgeschwindigkeiten über den Zeitraum eines Jahres kann festgehalten werden, dass die Windgeschwindigkeiten zwischen 5 km/h und 20 km/h als normal betrachtet werden können und regelmäßig auftreten. Die Windrichtung in Bezug auf das Fahrzeug gilt als gleichmäßig verteilt, da die Züge in alle Himmelsrichtungen fahren und so die vorherrschende Westrichtung des Windes im allgemeinen nicht von Bedeutung ist.

Für die Wirkung des Windes ist neben der Geschwindigkeit zusätzlich der Anström-
winkel der Luft von Bedeutung. In der Abbildung 3.2 sind für die Geschwindigkeiten
120 km/h und 200 km/h die Veränderung der Luftwiderstände bei 15 km/h Wind in
Abhängigkeit des Winkels zwischen Fahrt- und Windrichtung dargestellt. Dabei wird
der Einfluss des Winkels durch den äquivalenten direkten Gegenwind auf der Abszisse
aufgetragen.

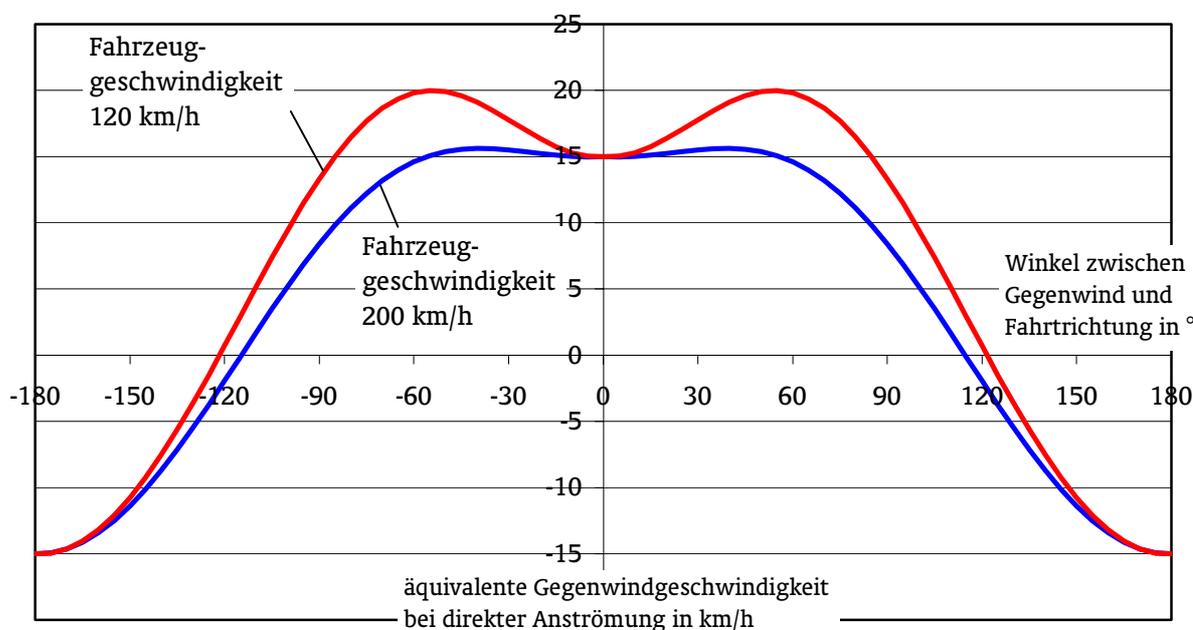


Abbildung 3.2: Einfluss des Anströmwinkels auf den Luftwiderstand [Vollmer-89]

Es wird deutlich, dass durch die Veränderung der Windrichtung das Fahrzeug unter-
schiedlich beeinflusst wird. Wobei der zur Fahrtrichtung senkrechte Wind einen
gegenüber der Windstille erhöhten aerodynamischen Widerstand hervorruft. Zu
Zweidrittel verursachen die Windwinkel eine Erhöhung des Luftwiderstands und
entsprechend zu einem Drittel eine Reduzierung. Die Schwankungsbreite des Luft-
widerstands aufgrund der Windrichtung entspricht der Windgeschwindigkeits-
änderung zwischen 20 und -15 km/h.

Zusammenfassend für die Qualitätsanforderung bei der Bestimmung des Luftwider-
stands sollte jedoch nicht diese große Streuweite angesetzt werden, da durch die Va-
riation der Windgeschwindigkeit und -richtung mehr mittlere Werte erreicht werden.
Somit wird eine Streuweite, die sich durch die Veränderung des Gegenwindes
zwischen 0 km/h und 15 km/h aufspannt, als hinreichend genau angesehen.

3.2 Entwicklung des Ansatzes zur BfD

Die in dem Kapitel 2.1 formulierte Fahrdynamik zeigt die Zusammenhänge zwischen den fahrdynamischen Daten auf. In der Zugfahrtsimulation wird mit bekannten fahrdynamischen Daten und vorgegebener Zugkraft der Geschwindigkeits- und Zeitverlauf über dem Weg ermittelt. Die Idee der BfD wendet diese Zusammenhänge an. Dabei werden die tatsächlichen, gemessenen Zeit- und Geschwindigkeitsverläufe zusammen mit der Zugkraft genutzt, um die fahrdynamischen Daten zu bestimmen. Theoretisch ist diese Vorgehensweise unproblematisch. So lassen sich aus den Ergebnissen der Fahrzeitrechnung problemlos umgekehrt auch die fahrdynamischen Daten bestimmen. Bei der Entwicklung der BfD ist es jedoch notwendig die störenden Einflüsse des realen praktischen Betriebs möglichst gering zu halten, so wie es bei Messungen im Rahmen von Versuchsfahrten auch angestrebt wird. [ORE-91] Die Lösung dieser Problemstellung wird in Kapitel 4.2 **Analyse der Messungen** aufgezeigt.

Der Unterschied bei der BfD auf einem Planzug zu fahrdynamischen Untersuchungen auf einem Versuchszug ist jedoch, dass die Fahrweise des Planzugs sich nach den Vorgaben aus dem Betrieb richtet und individuell vom Triebfahrzeugführer umgesetzt wird. Ein Versuchszug hingegen wird gemäß Definition der Versuchsdurchführenden mit geschulten Versuchstriebfahrzeugführern gefahren. Außerdem besteht auf einem Versuchszug die Möglichkeit, die Zustandsgrößen mit umfangreicher Messtechnik zu erfassen, denn die Versuchsfahrten sind begleitet und finden in einem zeitlich begrenzten Rahmen statt.

Die theoretische Untersuchung "Bestimmung fahrdynamischer Daten" [Voß-98b] stellt die Parameter heraus, die für die Zugfahrtsimulation (ZFSim) entweder durch Pauschalwerte bestimmt werden oder durch ein praktisches Bestimmungsverfahren ermittelt und so der ESF bereitgestellt werden müssen. Dabei werden rotatorischer Massenzuschlag, Rollbeiwert und Dämpfungswert als Daten bestimmt, bei denen die Nutzung von Pauschalwerten sinnvoll ist, da bei diesen Daten der Zusammenhang von Streuweite und Einflussintensität der Werte gering ist. Anders sieht dies bei der Zugmasse und dem Luftwiderstandsbeiwert aus. Hier wird die detaillierte Bewertung der Daten im Verlauf einer Fahrt empfohlen. Da sich die theoretisch gewonnenen Aussagen mit den Beobachtungen aus den praktischen Messungen decken, wird bei der Entwicklung der BfD auf diese Ergebnisse aufgebaut. Der Einfluss des Gegenwinds

ist bei den Untersuchungen mit zu berücksichtigen, da auch er einen nennenswerten Einfluss auf die Zugfahrtsimulation ausübt.

Der Ansatz zur betrieblichen BfD greift die verschiedenen Fahrweisen in einem Fahrspiel zwischen zwei Bahnhöfen auf, wie sie bei ESF unterstützter Fahrt auftreten. Wird eine Fahrt gemäß den Empfehlungen der ESF durchgeführt gibt es folgende charakteristische Fahrzustände:

Beschleunigung

Die Beschleunigungsphase wird durch Fahren mit maximaler Leistung bzw. maximaler übertragbarer Zugkraft charakterisiert.

Beharrung

Bei der Beharrung fährt der Zug mit der örtlich zulässigen Höchstgeschwindigkeit.

Auslauf

Der Auslauf wird durch Fahren ohne Antriebs- oder Bremskräfte realisiert.

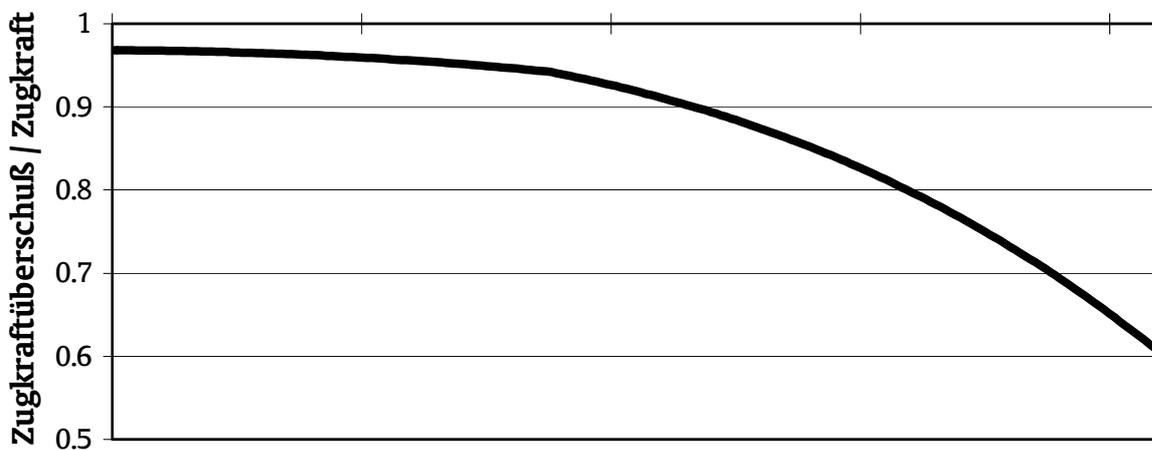
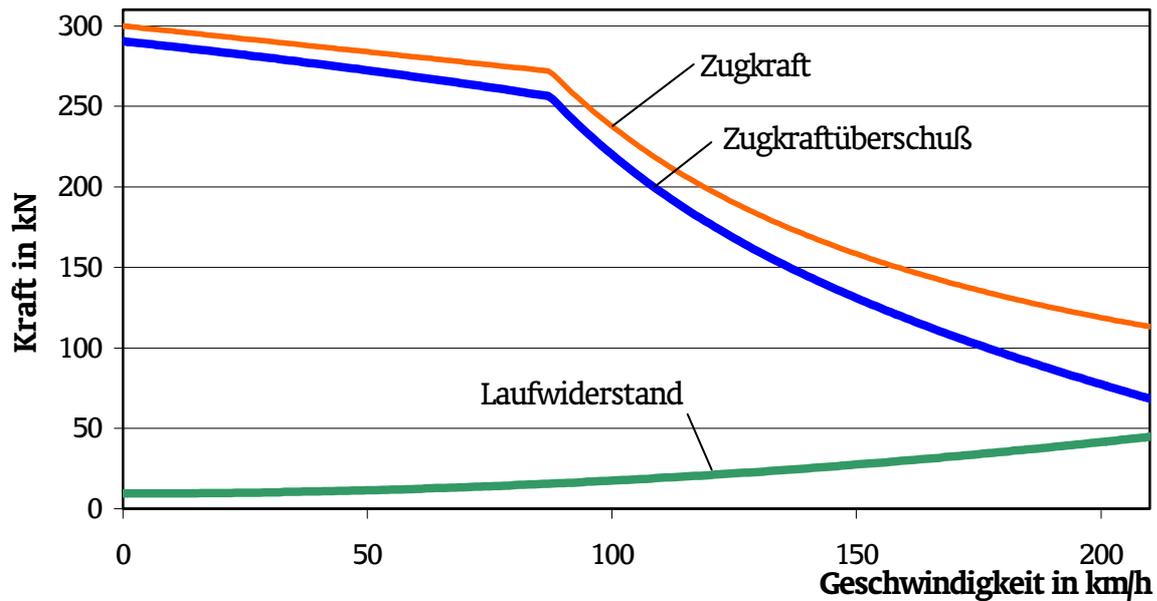
Bremung

Die Bremsung wird zur Reduzierung der Geschwindigkeit oder zum Halten der Geschwindigkeit in starkem Gefälle genutzt.

Im Folgenden wird für die verschiedenen Fahrweisen aufgezeigt, wie sie für die BfD genutzt werden können. Dies geschieht exemplarisch für den in Kapitel 4.1.1 beschriebenen InterRegio-Zug mit einer Lok der BR 101 und 9 Wagen. Für andere Zugkonfigurationen müssen die dargestellten Verläufe entsprechend angepasst werden.

3.2.1 BfD in der Beschleunigung

Die fahrdynamischen Zusammenhänge und die Gewichtung der Anteile der einzelnen Widerstandskomponenten am Fahrwiderstand werden für die Betrachtung der Beschleunigungsphase in der Abbildung 3.3 veranschaulicht. Dabei wird zunächst die Situation ohne Streckenwiderstand betrachtet. Die um den Laufwiderstand reduzierte Zugkraft bildet den Zugkraftüberschuss, der in der Beschleunigungsphase für die Überwindung des Beschleunigungswiderstands zur Verfügung steht. Im Kraft - Geschwindigkeits - Diagramm wird deutlich, wie gering der Laufwiderstand gegenüber der Zugkraft des Triebfahrzeugs ist.



**Abbildung 3.3: Kraft - Geschwindigkeits - Diagramm
Kräfteverhältnis - Diagramm**

Das Verhältnis zwischen Zugkraft und Zugkraftüberschuß zeigt, dass bei der Beschleunigung in den unteren Geschwindigkeitsbereichen der Beschleunigungswiderstand mit über 90% deutlich der vorherrschende Widerstand ist. Somit bildet dieser Beschleunigungswiderstand auch den Ansatz für die Bestimmung der Zugmasse. Die Gleichung 2-13 beschreibt die physikalischen Zusammenhänge. Unter Berücksichtigung des Massefaktors und des Einflusses des Laufwiderstands lässt sich die Zugmasse durch die Messung der Zugkraft und der Beschleunigung bestimmen.

Bei dieser theoretischen Betrachtung der Beschleunigungsphase wird der Steigungseinfluss ausser Acht gelassen, dieser muss jedoch bei der Realisierung in der Kräftebilanzierung mit aufgeführt werden.

3.2.2 BfD in der Beharrung

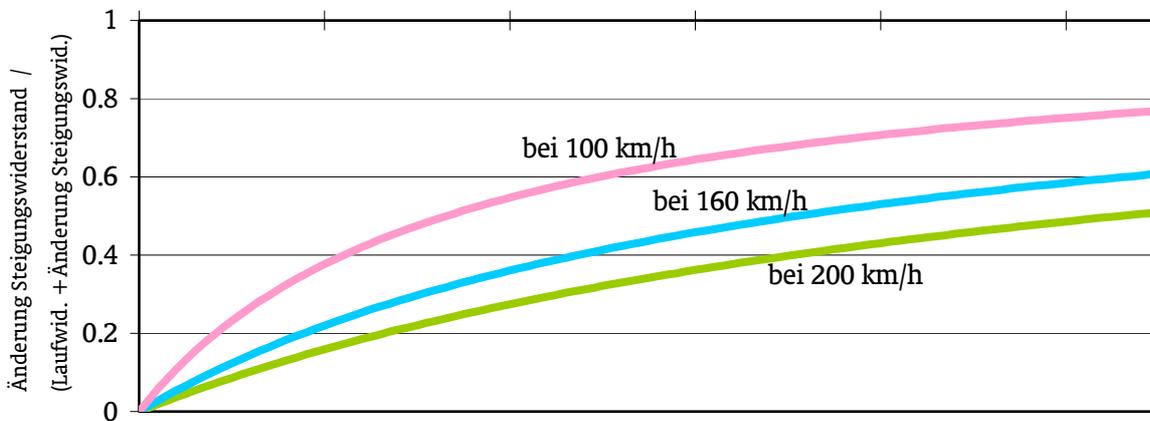
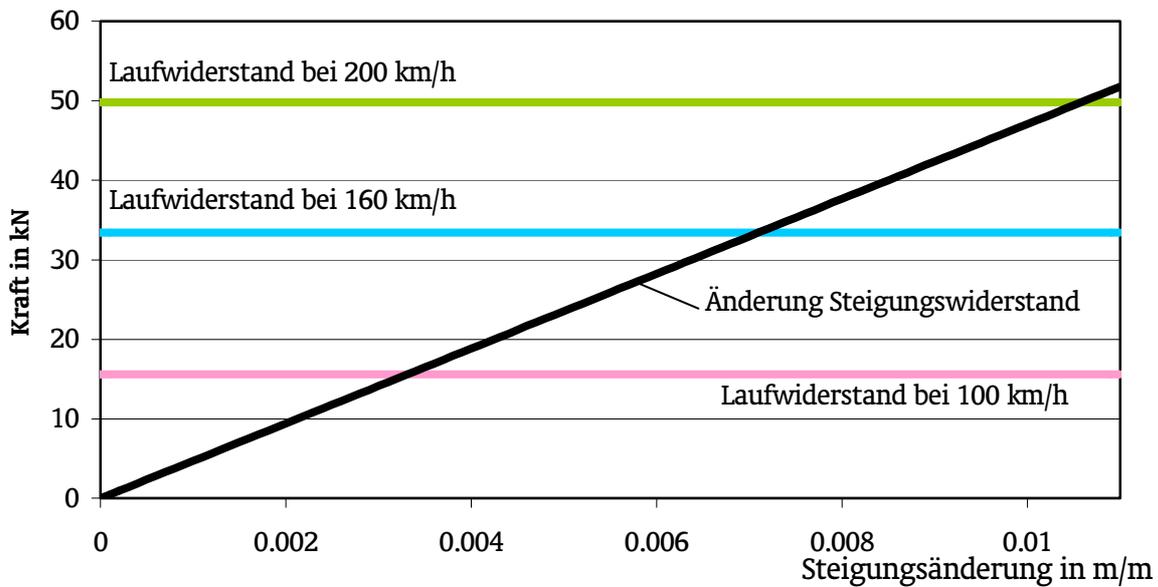
Während der Beharrungsfahrt ist die Geschwindigkeit annähernd konstant. Vereinfachend kann so der geschwindigkeitsabhängige Laufwiderstand als konstant betrachtet werden. Der Beschleunigungswiderstand muss mit betrachtet werden, da die Automatischen Fahr- und Bremssteuerung eine leichte Variation der Geschwindigkeit unter dem Sollwert verursacht. (s. Abbildung 5.4)

Betrachtet man mit diesen Eigenschaften der Beharrung die fahrdynamischen Gleichungen, so wird deutlich, dass die Zugkraftänderung proportional zur Änderung des Steigungswiderstands ist. Aufgrund der Steigungsänderung und der Zugkraftänderung lässt sich somit die Zugmasse unter der Verwendung der Gleichung 2-8 bestimmen.

Dieses Verfahren hat jedoch den Nachteil, dass es von der Änderung der Steigung abhängig ist. Des Weiteren nimmt der Laufwiderstand bei hohen Geschwindigkeiten die dominantere Rolle ein, so dass die Qualität des Verfahrens nicht nur vom Steigungsspektrum der Strecke sondern auch von der Geschwindigkeit abhängig ist.

Die Zusammenhänge lassen sich aus der Abbildung 3.4 ablesen. Die Zahlenwerte sind beispielhaft mit den Werten des Untersuchungszugs (s. Kapitel 4) ermittelt worden. Zunächst veranschaulicht das Kraft - Steigungsänderungs - Diagramm welche Größen die verschiedenen Widerstände einnehmen.

Das Kräfteverhältnis lässt den Anteil der Steigungswiderstandsänderung zum Fahrwiderstand erkennen. Je höher der Anteil ist, desto genauer lässt sich auch die Zugmasse bestimmen, da sich die Ungenauigkeiten dann bei der Bestimmung des aktuellen Laufwiderstands nicht so stark auswirken. Dies gilt besonders bei stärkeren wechselnden Winden, die den Luftwiderstand und damit den Laufwiderstand beeinflussen.



**Abbildung 3.4: Kraft - Steigungsänderungs - Diagramm
Kräfteverhältnis - Diagramm**

3.2.3 BfD im Auslauf

Der Auslauf zeichnet sich aufgrund der abgeschalteten Leistung durch die Nullzugkraft aus. Somit heben sich die Anteile der Fahrwiderstandskomponenten in der Summe auf. Wird der Streckenwiderstand herausgerechnet, stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Beschleunigungswiderstand und Laufwiderstand ein. In der Weise lässt sich der Laufwiderstand für die jeweilige Rollgeschwindigkeit ermitteln. Dadurch, dass in der Regel die Geschwindigkeit beim Rollen abnimmt, wird die Laufwiderstandsparabel nach und nach gebildet. Im Fahrplanbetrieb geschieht dies, im Gegensatz zu den Versuchen, nicht bis zum Stillstand. Es lässt sich mit dieser Vorgehensweise nur der obere Teil des Laufwiderstandsverlaufs ermitteln. Für den unteren

Geschwindigkeitsbereich muss der Verlauf extrapoliert werden. Die mindere Qualität des extrapolierten Bereichs ist jedoch für die ESF unbedenklich, da der untere Geschwindigkeitsbereich für die Fahrstrategie praktisch nicht genutzt wird. Die Differenzierung zwischen Rollwiderstand und Luftwiderstand ist aufgrund der Extrapolation und der Windeinflüsse problematisch. Dies wird in der Abbildung 3.5 veranschaulicht. Die Summe aus Luft- und Rollwiderstand ergibt den Laufwiderstand. Da jedoch der Luftwiderstand aufgrund der Windeinflüsse schwankt und somit nicht gemessen werden kann, ist auch die Bestimmung des Rollwiderstands mit Ungenauigkeiten behaftet. Es lässt sich jedoch der Laufwiderstand der durchrollten Geschwindigkeiten gut quantifizieren.

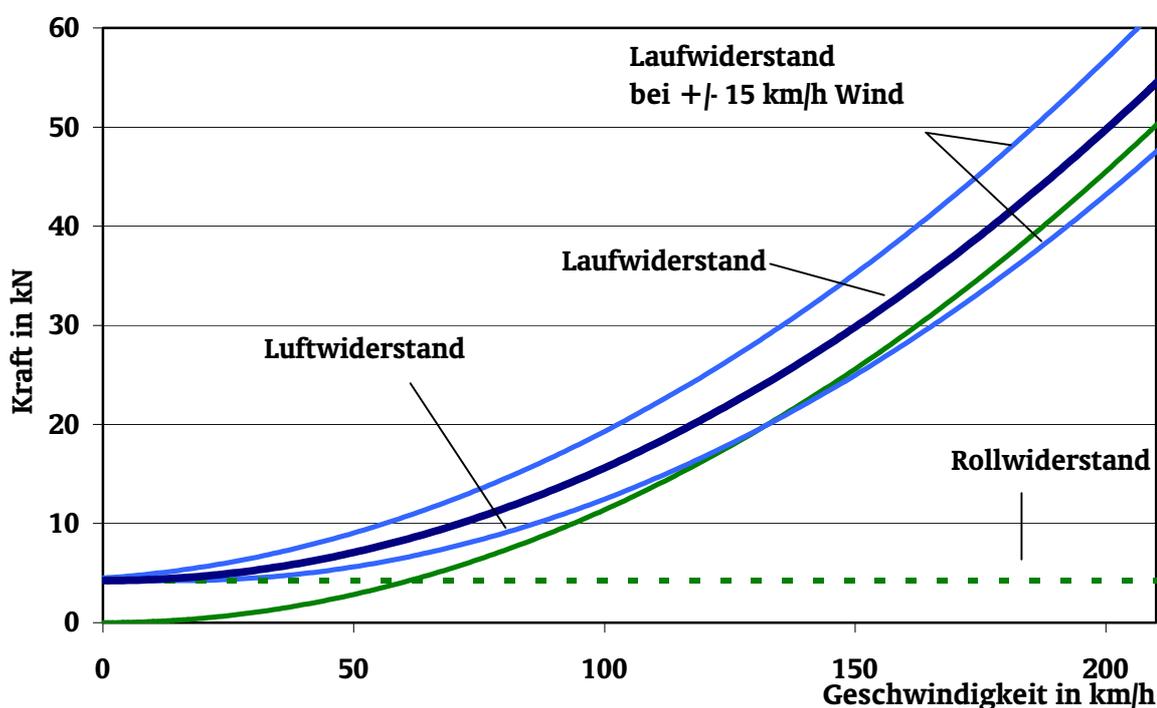


Abbildung 3.5: Widerstand - Geschwindigkeits - Diagramm

3.2.4 BfD bei der Bremsung

Da bei der Bremsung des Zuges neben den elektrischen auch mechanische Bremsen zum Einsatz kommen und deren Bremskraft nur sehr unzuverlässig bestimmt werden kann, ist die BfD bei einer Bremsung nicht durchführbar.

3.3 Ansatz zur BfD

Die Konzeptionierung der BfD basiert auf den in Kapitel 3.2 beschriebenen Ansätzen der einzelnen Fahrphasen. Dabei werden die sich abwechselnden Phasen dazu genutzt, iterativ die Qualität der BfD zu steigern. Die Idee der BfD ist, die verschiedenen Phasen der Fahrt einzeln auszuwerten und miteinander zu kombinieren. Dabei baut sich das Verfahren aus den folgenden drei Phasen auf:

- Beschleunigungsphase
- Beharrung
- Auslauf

In der Abbildung 3.6 wird anhand des einfachen Fahrspiels veranschaulicht wie eine Fahrt durch die verschiedenen Phasen gekennzeichnet ist.

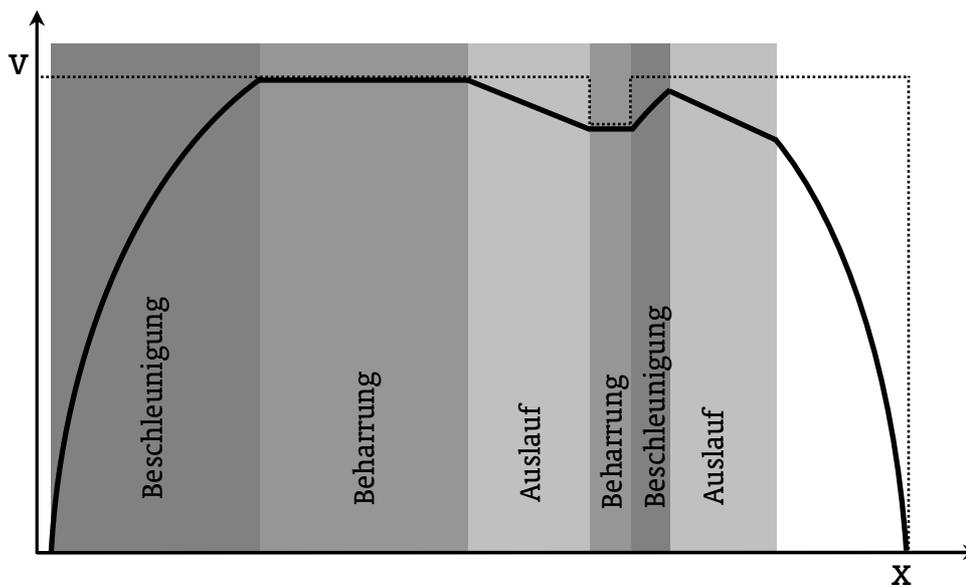


Abbildung 3.6: Fahrspiel mit den charakteristischen Fahrzuständen

Die Einteilung der Phasen wird mit den Messgrößen Zug-/Bremskraft und Geschwindigkeit realisiert. Die Beschleunigungsphase lässt sich durch die in Fahrtrichtung wirkende positive Beschleunigung ermitteln. Die konstante Geschwindigkeit wird durch

die Fahrt mit nur geringen Beschleunigungen bestimmt. Die Ausrollphase ist durch die Nullzugkraft gekennzeichnet, wobei Rauschen des Zugkraftsignals um die Nulllage unterdrückt werden muß. Um die auftretenden Längsdynamiken im Zug auszugleichen, werden die einzelnen Phasen zusätzlich zum Anfang und zum Ende um einige Sekunden gestutzt.

Die Abbildung 3.7 zeigt die drei Bestimmungsverfahren, die abwechselnd in der BfD angewendet werden und zusammen die BfD ergeben.

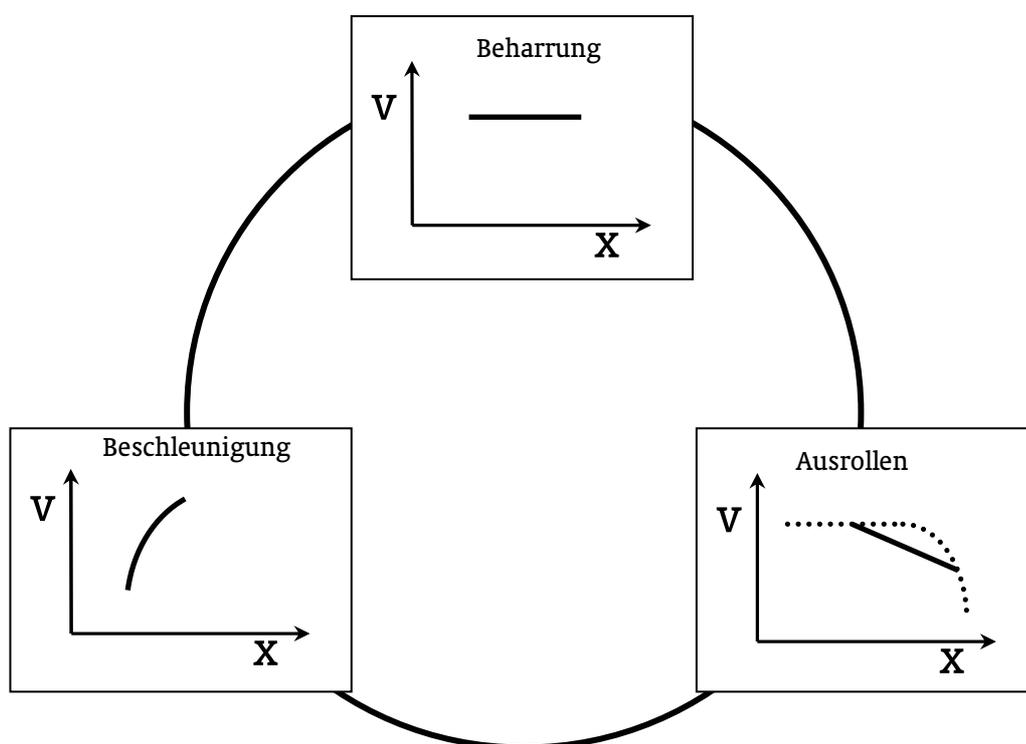


Abbildung 3.7: Bestandteile der BfD

Der Beschleunigungsvorgang und das Ausrollen sind feste Bestandteile der Bestimmung der fahrdynamischen Daten. Die konstante Geschwindigkeit ist je nach Streckenart und Fahrzuständen optional. Die Bestimmung der Zugmasse und die des Laufwiderstandes ist in der Qualität jeweils von anderen Größen abhängig,

weswegen die Massenbestimmung und die Laufwiderstandsbestimmung immer wiederkehrend durchgeführt werden. Durch die Iteration zwischen den Phasen Beschleunigung, konstante Geschwindigkeit und Ausrollen wird die Bestimmungsqualität kontinuierlich besser.

4 Praktische Untersuchungen

Die bei der Firma ADtranz hergestellten 144 Fernverkehrslokomotiven der Baureihe 101 stellen das Rückgrad der lokbespannten InterRegio, InterCity und EuroCity Züge bei der Deutschen Bahn AG dar. Die Bo'Bo'-Drehstrom-Lokomotive gehört mit einer Dauerleistung von 6,4 MW und einer zulässigen Geschwindigkeit von 220 km/h zu den leistungsfähigen Lokomotiven der Deutschen Bahn AG. [Baur-99] Aufgrund des nennenswerten Verkehrsanteils, der auf dem Fahrzeug vorhandenen modernen Steuerungstechnik und der komfortablen Diagnosesysteme eignet sich die Baureihe 101 für die Untersuchungen zur BfD besonders gut. So werden von den redundant vorhandenen zentralen Steuergeräten (ZSG) an den Diagnoseausgängen die Signale der Fahrzeuggeschwindigkeit, der Zug-/Bremskraft am Radumfang, der Wegimpulse des Geschwindigkeitsradars und des Drucks in der Hauptluftleitung zur Verfügung gestellt. Die Abbildung 4.1 zeigt die Lok 101 038 in Hamburg Altona.



Abbildung 4.1: Untersuchungszug mit der Lok 101 038

Das Konzept für die technische Durchführung der Messungen auf der Lok 101 038 sieht begleitete und unbegleitete Messungen vor. Dies bedeutet, dass einerseits ein

autarkes Messwerterfassungssystem selbständig die Fahrten der Lok erfasst und andererseits bei begleiteten Fahrten auf die aktuellen Messungen der Fahrt vom Führerstand zugegriffen wird. Für diese Anforderungen werden zwei Rechner ausgewählt. Ein robuster Industrie-Rechner, der als Messrechner fest im Maschinenraum der Lok installiert wird, ist für die Messwerterfassung und deren Bereitstellung verantwortlich. Dieser Messrechner ist an die Fahrzeugstromversorgung gekoppelt und zeichnet damit über die gesamte Betriebszeit der Lok die Messwerte der Antriebssteuergeräte (ASG), der Zentralen-Steuer-Geräte (ZSG) und der zusätzlich installierten GPS-Antenne auf. Ein mobiler Notebook-Rechner wird bei den begleiteten Fahrten über ein Ethernet - LAN mit dem Messrechner verbunden und kann über das LAN aktuell auf die Messungen zugreifen. Auf dem Notebook kann mit den Informationen vom Messrechner die BfD durchgeführt werden. Durch die Trennung der Messwert-erfassung von der teilweise rechenintensiven BfD wird sichergestellt, dass die Messwerterfassung zuverlässig und ungestört arbeiten kann. Die Anordnung der Geräte auf der Lok zeigt die Abbildung 4.2.

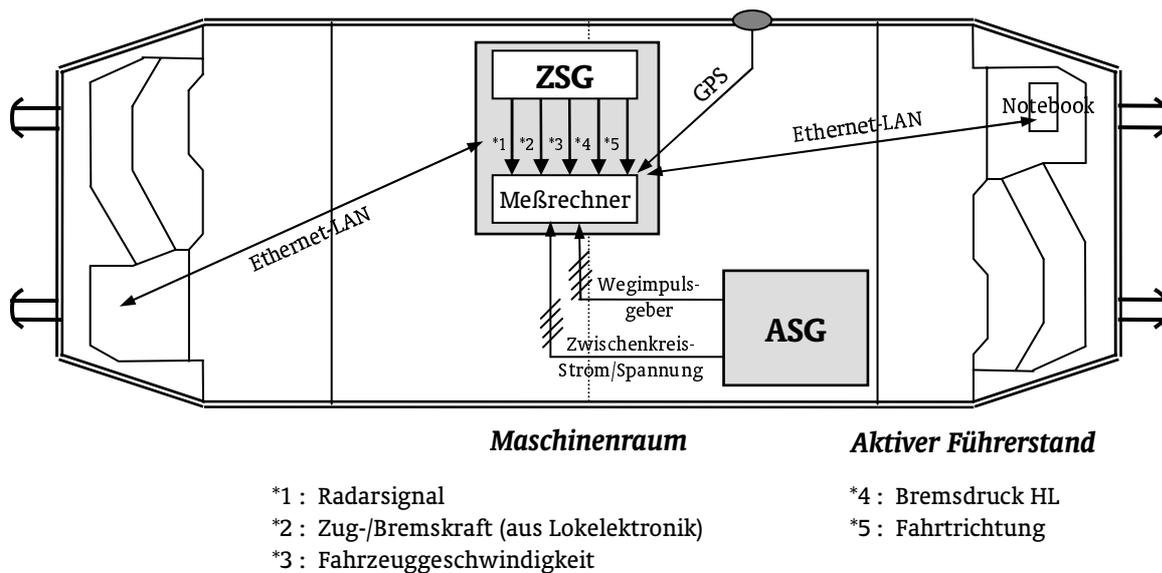


Abbildung 4.2: Anordnung der Untersuchungstechnik

4.1 Die Messungen auf der InterRegio-Linie 19

4.1.1 InterRegio mit der Lok 101 038 als Untersuchungsobjekt

Als Untersuchungszug wurde ein InterRegio mit 9 Wagen ausgewählt, da es hier einen Triebfahrzeugumlauf für die Lokomotiven der Baureihe 101 gibt, der einen regelmäßigen Einsatz der Lok auf einer InterRegio-Linie ermöglicht.

Die Baureihe 101 zeichnet sich durch ihr hohes Leistungsvermögen aus, das anhand des Zugkraft-/Bremskraft-Geschwindigkeits Diagrammes in der Abbildung 4.3 dargestellt wird.

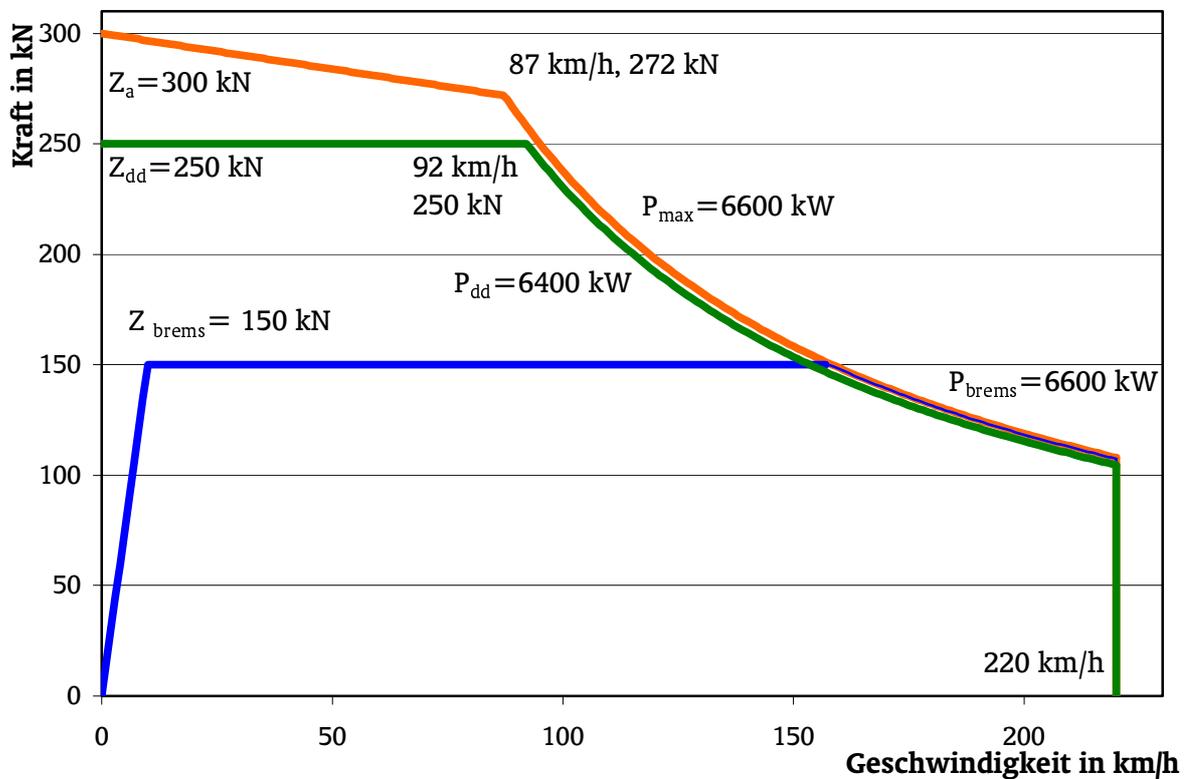


Abbildung 4.3: Zugkraft-/Bremskraft-Geschwindigkeits-Diagramm [nord-97]

Planmäßig werden die Züge mit folgenden Wagen gefahren:

- 1x Triebfahrzeug der Baureihe 101
- 1x Sitzwagen 1. Klasse
- 1x Bistro-Cafe mit Abteilen 1. Klasse
- 6x Sitzwagen 2. Klasse
- 1x Steuerwagen

Für diese Zugkonfiguration gelten folgende technische Daten:

Zuglänge	257 m
Zugmasse leer	460 t
Zugmasse maximal	511 t

4.1.2 Messsignalquellen

Bis auf das GPS-Signal handelt es sich bei allen gemessenen Signalen um vorhandene Signale der Lok-Elektronik. Die Messsignale wurden entweder von den Prüfausgängen der zentralen Steuergeräte (ZSG) oder dem Bussystem des Antriebs-Steuergeräts (ASG) abgegriffen. Der Signalfluss geht vom Ursprung des elektrischen Signals in der Lok-elektronik über eine Kabelverbindung an den 19"-Einschub, wo die Signale konditioniert, gefiltert und über den Anschluss-Adapter zum Messrechner weitergeleitet werden. Im Folgenden werden die für die BfD relevanten Signalquellen aufgezeigt. Das installierte Mess-System zeichnet auch noch weitere Signale auf, die zur Kontrolle der Messtechnik und Überwachung der Funktionsfähigkeit des Messaufbaus dienen, die jedoch nicht direkt für die BfD genutzt werden. [Popp-01]

Die Messwerte werden sekundlich erfasst. Die Qualität der Signale aus der Fahrzeug-elektronik ist durch mehrere Plausibilitätskontrollen im Rahmen der Untersuchung überprüft worden. Dabei wurden keine fehlerhaften Signale festgestellt. Die Zeit, Geschwindigkeit und Zug-/Bremskraft sind die wesentlichen Messsignale für die Untersuchungen zur BfD:

Zeit

Die Zeitbestimmung erfolgt durch die interne Uhr des Messrechners. Diese Uhr wird täglich durch die genaue Zeitangabe der GPS Informationen abgeglichen.

Geschwindigkeit

Der Geschwindigkeitswert ist ebenfalls ein vom ZSG berechneter Wert aus den Impulsen der vier Weg-Impuls-Geber (WIG) und des Radars. Die Genauigkeit des Signals wird durch die Integration der Geschwindigkeit über der Zeit deutlich. Der ermittelte Weg bei einer Fahrt zwischen Hamburg und Hannover weicht nur 150 Meter von den Angaben der Strecke ab.

Zug-/Bremskraft (Zugkraft-Istwert):

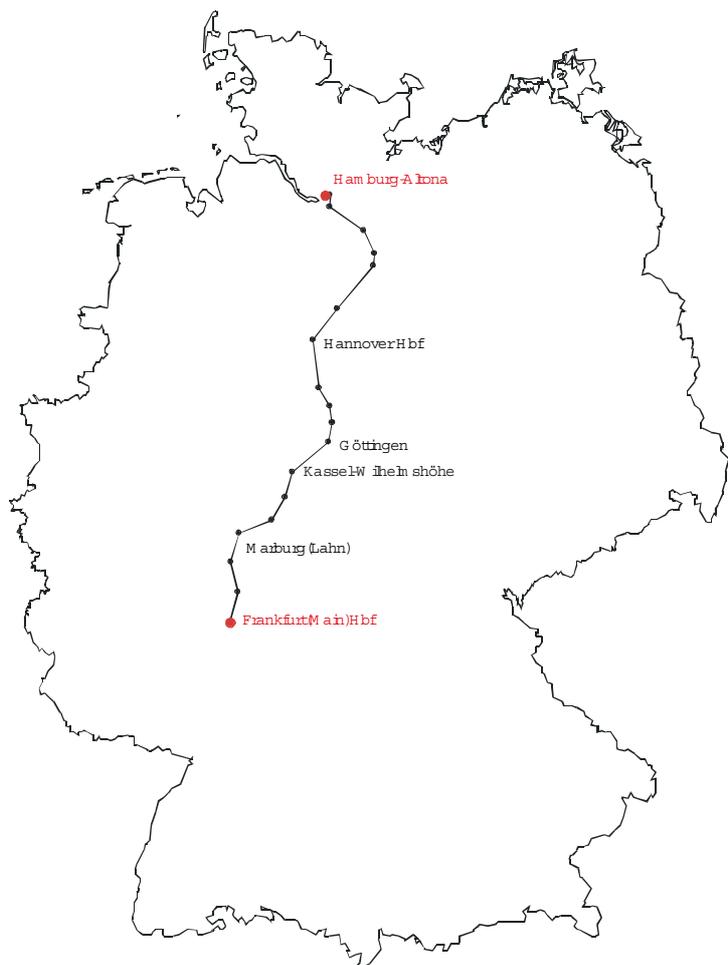
Die Zug-/Bremskraft ist ein von einem Controller des ZSG berechneter Wert. Das positive Zugkraft-Signal gilt als durchschnittliche Zugkraft pro aktiven Fahrmotor. Als negative Bremskraft wird die gesamte elektrische Bremskraft der Lok dargestellt. Die Zug-/Bremskraft beschreibt die Kraft am Radumfang und wird über das Luftspalt-Drehmoment des Motors, über die Getriebe-Übersetzung und den Treibrad-Durchmesser berechnet.

4.1.3 Messstrecke

Für die Messungen wurde die InterRegio-Linie 19 zwischen Hamburg Altona und Konstanz ausgewählt, da es hier einen überschaubaren Lokumlauf mit nur 12 Fahrzeugen gibt, die alle täglich auf der InterRegio-Linie 19 eingesetzt werden. So braucht in der Disposition nur darauf geachtet zu werden, dass die Versuchslok auf diesem Umlauf eingesetzt wird.

Die InterRegio-Linie Hamburg - Frankfurt eignet sich gut, da sie zwischen Hamburg und

Frankfurt auf Strecken mit deutlich unterschiedlichen Charakteren verläuft und somit eine repräsentative Auswahl für das Streckennetz der DBAG darstellt. Der Abschnitt zwischen Hamburg und Hannover ist als Ausbaustrecke mit einer maximalen Geschwindigkeit von 200 km/h realisiert, zwischen Hannover und Göttingen fährt der Zug im Leinetal auf der Altbaustrecke mit zulässigen Geschwindigkeiten bis 160



km/h, in Göttingen wechselt der Zug dann auf die Neubaustrecke, die vom InterRegio mit bis zu 200 km/h befahren werden kann und Steigungen bis zu 12,5 Promille besitzt. Von Kassel-Wilhelmshöhe bis Frankfurt setzt der InterRegio seine Fahrt wiederum auf einer Altbaustrecke mit einem niedrigen Geschwindigkeitsniveau um 130 km/h fort.

4.1.4 Begleitete Messfahrten

Für die Untersuchungen zur BfD wurden über 10 000 km der Messungen auf der InterRegio-Linie 19 begleitet durchgeführt. Der Vorteil der begleiteten Fahrten liegt darin, dass die Messwerte besser interpretiert werden können, da im Planbetrieb der Lok unterschiedlichste unplanmäßige Vorkommnisse auftreten können, die für die Auswertung der Messungen teilweise sehr wichtig sind. Als Beispiel sei hier der um ein oder zwei Wagen reduzierte Planzug genannt. Ohne diese Information würde bei der Massenbestimmung ein richtig bestimmter Wert falsch und unplausibel erscheinen. Eine weitere wichtige Beobachtung gebührt der Fahrweise der Lokführer, die sehr individuell geprägt ist.

4.2 Analyse der Messungen

Zunächst muss vorweggestellt werden, dass die angegebenen Zahlenwerte nicht allgemeingültig für die BfD auf verschiedenen Fahrzeugen sind, sondern nur für das in Kapitel 4.1 beschriebene Untersuchungsobjekt gelten und die Funktionsweise lediglich veranschaulichen sollen.

Für die Analyse der Messungen wurden zunächst die Fahrten zwischen zwei Planhaltestellen betrachtet und auf charakteristische Fahrweisen hin untersucht. Dabei lässt sich das Fahrspiel gut in die in Kapitel 3.1 beschriebenen Phasen der Beschleunigung, der Beharrung und des Auslaufs einteilen. Die folgende Abbildung 4.4 zeigt einen Fahrverlauf in dem die für die BfD interessanten Phasen gekennzeichnet sind.

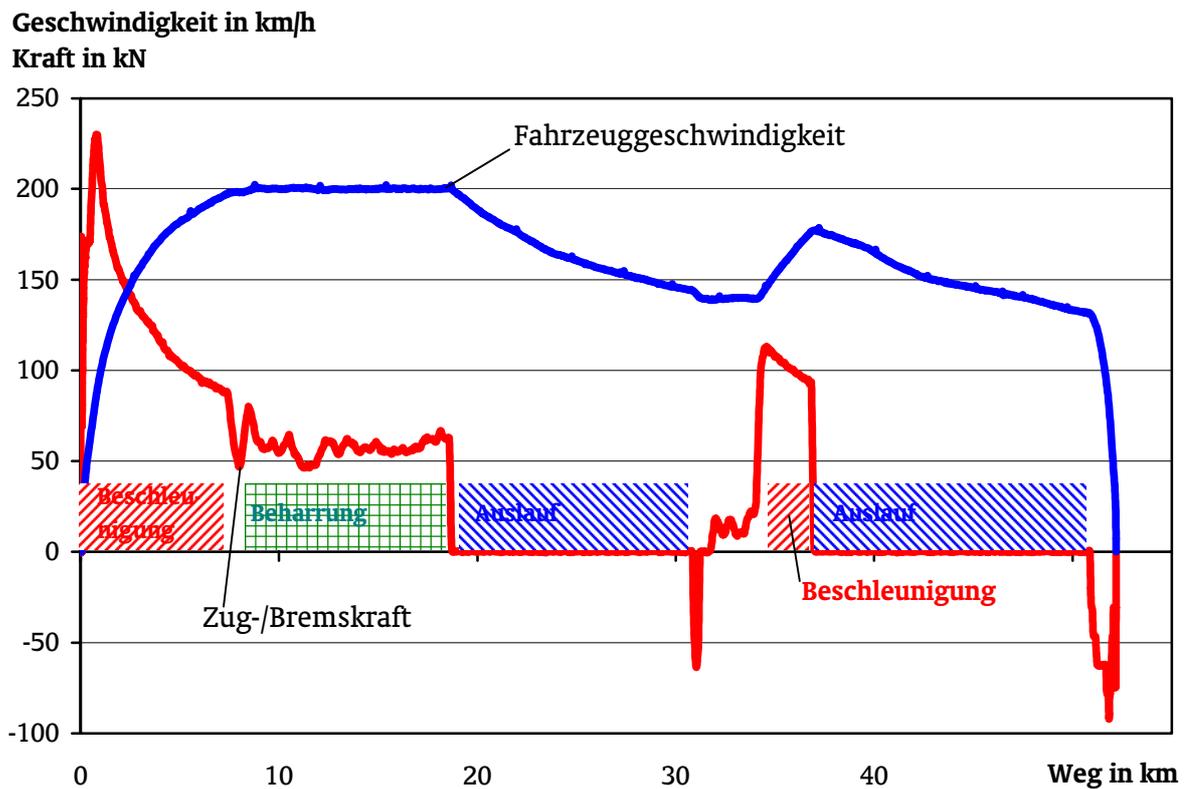


Abbildung 4.4: Beispielfahrverlauf zwischen Uelzen und Celle

Für die Analyse der Messungen zur BfD werden diese Phasen daraufhin detailliert untersucht, deren Qualität bewertet und der Einfluss eventueller Störgrößen diskutiert.

4.2.1 Beschleunigung

Die Beschleunigung eignet sich zur Massenbestimmung gemäß den Ausführungen in Kapitel 3.2.1. Die erreichbare Qualität wird anhand der Messungen in diesem Abschnitt aufgezeigt.

In der Formulierung des Ansatzes zur BfD in der Beschleunigungsphase wurden der Streckenwiderstand und der Luftwiderstandsanteil aufgrund der Windgeschwindigkeit vernachlässigt. Bei der praktischen Bestimmung der Masse in dieser Phase müssen diese Parameter jedoch mit in die Rechnung integriert werden. Der Streckenwiderstand lässt sich dabei über die Zuordnung der Zugposition im digitalen Streckenatlas bestimmen. Der Luftwiderstand kann aufgrund der Windgeschwindigkeit jedoch nicht integriert werden, da keine Informationsquelle über diesen

Einflussfaktor existiert. Somit muss bei der Interpretation der Ergebnisse auf diesen Störeinfluss eingegangen werden. In dem Quotienten aus dem die Masse bestimmt wird, werden die massenproportionalen Strecken- und Rollwiderstände in der Rechnung mit dem Beschleunigungswiderstand so kombiniert, dass sie später als Summe der translatorischen Beschleunigung, der rotatorischen Beschleunigung und der aus Rollbeiwert und Steigung resultierenden Beschleunigung im Nenner stehen. Im Zähler befindet sich die in Fahrtrichtung wirkende Zugkraft, die um den Luftwiderstand vermindert wird. Die Massenbestimmung folgt dabei der in der Gleichung 4-1 dargestellten Rechenvorschrift, die sich aus den in Kapitel 2.1 beschriebenen fahrdynamischen Zusammenhängen herleiten lässt.

$$m = \frac{Z - W_{Luft}}{(1 + \rho_{rot.}) \cdot a_{trans} + (c_r + c_s) \cdot g} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

mit: m	Masse in kg
Z	Zugkraft in N
W_{Luft}	Luftwiderstand in N
ρ_{rot}	Massefaktor in –
a_{trans}	translatorische Beschleunigung in m/s^2
c_r	Rollwiderstandsbeiwert in –
c_s	Neigung in m/m
g	Fallbeschleunigung ($\approx 9,81 m/s^2$)

Für die Analyse der Qualität bei der Massenbestimmung wurden über 150 Fahrten zwischen zwei Haltepunkten ausgewertet, die an elf verschiedenen Messtagen durchgeführt wurden. Die Masse des unbesetzten Zuges ist 460 t, ein vollbesetzter Zug wiegt 511 t. Durch Zu- und Ausstieg von Fahrgästen in den Bahnhöfen variiert die Zugmasse im Verlauf einer Fahrt in Abhängigkeit vom aktuellen Besetzungsgrad des Zuges.

Zur Beurteilung der Qualität bei der Zugmassenbestimmung wurde zunächst der Einfluss der wirkenden Leistung in der Beschleunigung untersucht. In der Abbildung 4.5 sind die Ergebnisse aus der Massenbestimmung in Abhängigkeit der Antriebsleistung dargestellt. So sind einerseits die mittlere berechnete Masse und andererseits die Standardabweichung über der Leistung aufgetragen.

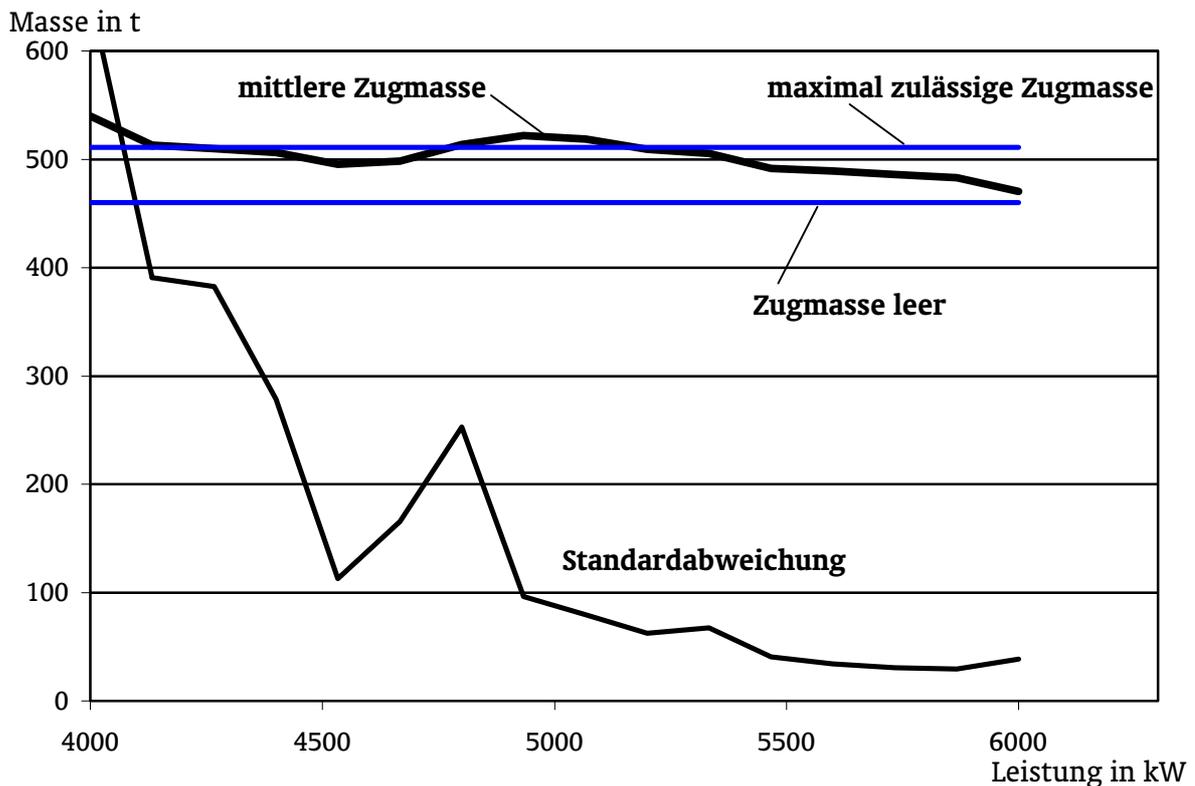


Abbildung 4.5: Zugmassenermittlung in Abhängigkeit der Leistung

Es wird deutlich, dass die Massenbestimmung in den größeren Leistungsbereichen geringere Abweichungen besitzt. Hier zeigt sich, dass bei großen Zugkräften das Verhältnis zwischen Zugkraft und Steigungswiderstand günstig ist (s. Abbildung 3.4). Die mittlere Zugmasse zeigt im unteren Geschwindigkeitsbereich eine zu große Masse an. Das liegt daran, dass die großen Abweichungen sich einseitig ausprägen und somit dieses Bild verzerren. Festgehalten werden muss, dass die Massenbestimmung im oberen Bereich des Leistungsvermögens durchzuführen ist. Da unterhalb von 5500 kW die Streuweite der Messwerte zunimmt, sollten nur Messpunkte genutzt werden, bei denen die Zugkraft nicht mehr als 5% von der Zugkraft-Geschwindigkeitskennlinie abweicht, damit eine gute Qualität erreicht wird.

Ein weiterer Einflussfaktor bei der Massenbestimmung ist der Geschwindigkeitsbereich, bei dem die Masse bestimmt wird. Der Einfluss wird in der folgenden Abbildung 4.6 veranschaulicht. Auch hier sind die ermittelte Masse und die Standardabweichung aufgetragen, diesmal jedoch über der Geschwindigkeit. Bei dieser Betrachtung wurde bereits die Selektion der Messpunkte anhand der Zugkraft

vorgenommen, d.h. nur bei Zugkräften, die 95% des Triebfahrzeugleistungsvermögens erreichen, wird in der Beschleunigung die Massenbestimmung genutzt (s. Kapitel 5.3.1).

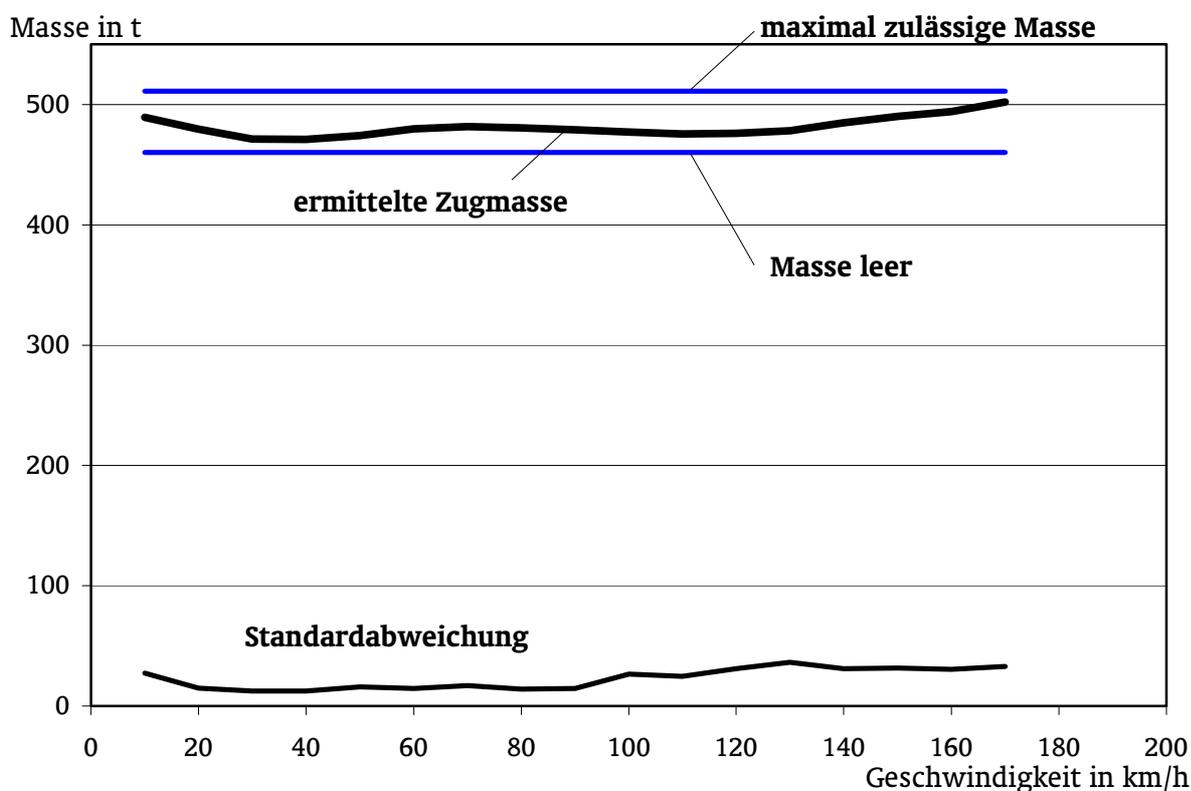


Abbildung 4.6: Geschwindigkeitseinfluss auf die Massenbestimmung bei Zugkräften über 95% des Triebfahrzeugleistungsvermögens

Es wird deutlich, dass die Bestimmung der Masse im Mittel bereits plausible Werte annimmt, wobei im höheren Geschwindigkeitsbereich die ermittelte Masse ein wenig höher liegt. Die Standardabweichung zeichnet sich bei der Untersuchungslok durch einen konstant guten Bereich zwischen 20 km/h und 90 km/h und einen Anstieg bei Geschwindigkeiten über 90 km/h aus. Für die erhöhte Standardabweichung bei 10 km/h werden Ungenauigkeiten im Anfahrvorgang verantwortlich sein. Die Abweichungen oberhalb von 90 km/h veranschaulichen, dass in diesem Bereich der Windeinfluss sich deutlicher ausprägt und stärkere Schwankungen in der Massenbestimmung hervorruft. Für die Massenbestimmung sollte daher auch eine Geschwindigkeitsgrenze für die Auswahl der Messwerte eingeführt werden. So sind für die Untersuchungen mit dem InterRegio die Werte im Bereich zwischen 20 und 90 km/h für die Massenbestimmung ausgewählt.

Die Beschleunigungsphase wurde für die Untersuchungen mit zwei einschränkenden Auswahlkriterien festgelegt:

- maximal erlaubte Abweichung von der Zugkraft-Geschwindigkeits-Kennlinie: 5 %
- genutzte Geschwindigkeiten liegen zwischen 20 und 90 km/h

Mit diesen Vorgaben wurde dann für elf begleitete Fahrten zwischen Hamburg und Frankfurt die Zugmasse bestimmt. In der folgenden Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse aufgeführt. Spaltenweise sind die Messtage und zeilenweise die Ergebnisse der einzelnen Streckenabschnitte angegeben. Die Abkürzungen entsprechen der DS100 (s. Anhang A: Abkürzungen aus der DS100)

Start-Bhf	Ziel-Bhf	010306 di	010307 mi	010316 fr	010507 mo	010508 di	010510 do	010514 mo	010517 do	010518 fr	010519 sa	010521 mo
ABVS	ALBG		480		483			475				
ALBG	HU		488			471	474		474		475	
HU	HC	473	474	482		471	472	477		494	473	
HC	HH		470	490		468	475	481	471	496	480	
HH	HALF		482	479	475	480	493	486			481	482
HALF	HK	471	477		468	470	485	477		497	474	478
HK	HN	486			477	477				502		481
HN	HG	472			466	467	466	456	464	483	472	463
FKW	FTS				466	468	471			516	470	472
FTS	FWAB			488	466		467	490			471	468
FWAB	FMBG				467	460	473	472			474	475
FMBG	FG				463		480	476			470	471
FG	FFG				460		489	485			468	
FFG	FF			502	469	483	474	481		500	482	463
Duchschnitt		475	479	490	469	470	476	476	468	496	474	474

Tabelle 4.1: Zugmasse [t] aus Massenbestimmung durch Beschleunigung

Zur besseren Betrachtung sind diese Ergebnisse in der Abbildung 4.7 grafisch dargestellt. Für die einzelnen Messtage sind entsprechend dem Fahrverlauf die ermittelten Massen nebeneinander aufgetragen.

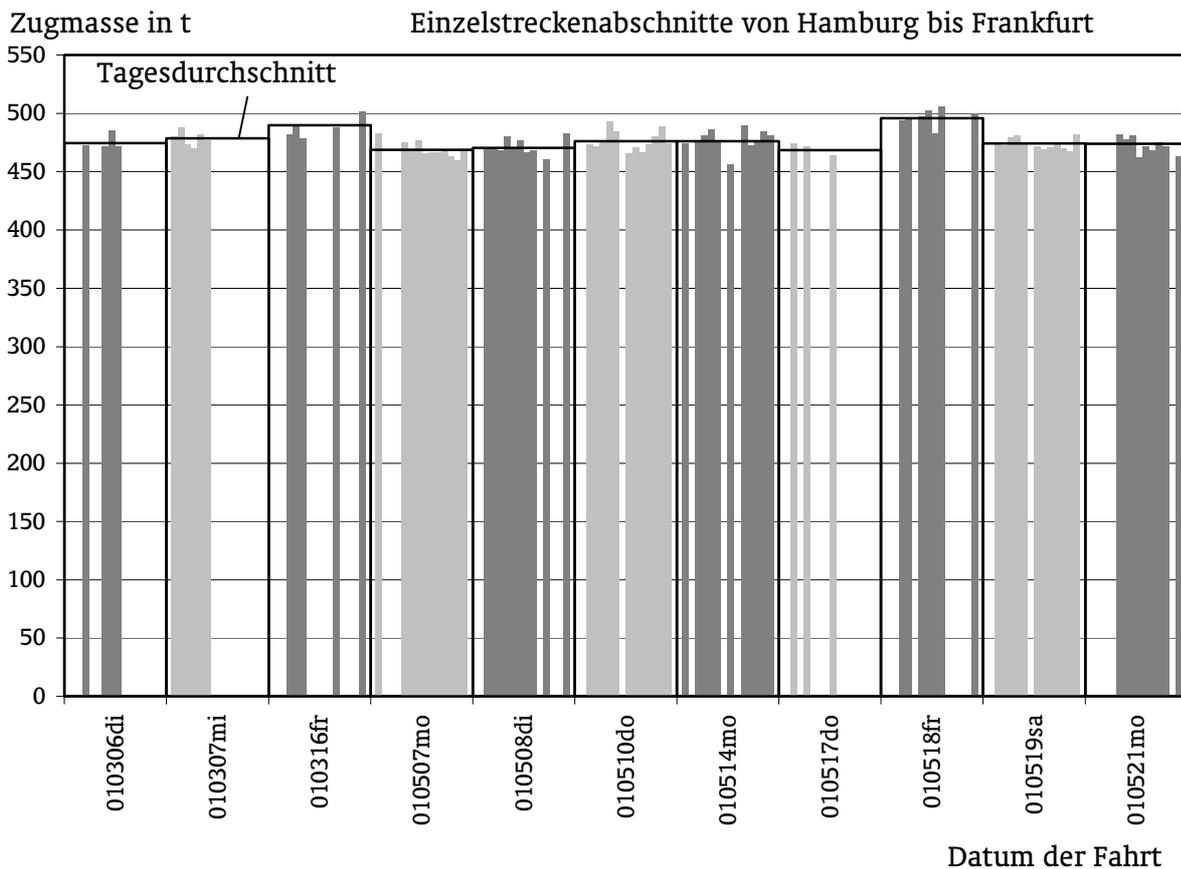


Abbildung 4.7: Ergebnisse der Massenbestimmung bei Fahrten zwischen Hamburg und Frankfurt

Zunächst muss festgestellt werden, dass von den 154 ausgewerteten Streckenabschnitten bei nur 90 Streckenabschnitten die Masse bestimmt werden konnte. Die Ursache hierfür liegt darin, dass die Lokführer oft mit reduzierter Zugkraft anfahren. Diese Reduzierung der Zugkraft ist jedoch nicht notwendig, da das Triebfahrzeug mit einem Schleuderschutz ausgestattet ist. Hier muss bei der Umsetzung der BfD eine Schulung der Lokführer erfolgen, um die Verfügbarkeit der Massenbestimmung zu steigern. Die Schienenverhältnisse lassen bei über 140 Fahrten der ausgewerteten 154 Fahrten das Anfahren mit voller Zugkraft zu.

Bei der Betrachtung der ermittelten Zugmassen zeigt sich, dass die durchschnittlichen Massen zwischen 469 t und 496 t im erwarteten Bereich liegen. Die Plausibilität dieser Durchschnittswerte wird durch die beiden Fahrten an den Freitagen unterstrichen, bei denen die größten Zugmassen ermittelt wurden und den hohen Zugbesetzungsgrad am Freitag widerspiegeln. Die Betrachtung der einzelnen Messtage zeigt, dass

die Massenbestimmung bei 74 von 90 Streckenabschnitten nicht mehr als 10 t vom Tagesdurchschnitt abweicht. Lediglich bei 14 Streckenabschnitten weicht die Masse 10 bis 15 t vom Durchschnitt ab und bei 2 Abschnitten wird eine Abweichung zwischen 15 und 20 t festgestellt.

Für die Formulierung der Qualität muss bei der Betrachtung der Abweichungen berücksichtigt werden, dass die Zugmasse sich mit dem Besetzungsgrad ändert und somit eine gewisse Schwankung bei der Masse vorliegt. Wird bei der Beurteilung der Ergebnisse davon ausgegangen, dass sich die Zugmasse im Laufe eines Tages nicht ändert, so würde festgestellt werden, dass die Zugmasse zu über 80 % mit einer Genauigkeit von 10 t und absolut mit einer maximalen Abweichung von 20 t bestimmt werden kann. Mit der genauen Kenntnis der jeweils aktuellen Zugmasse würde sich die Qualität der gesamten Zugmassenbestimmung besser darstellen, da nicht von den mittleren Massen ausgegangen werden muß.

Die Qualität der Massenbestimmung ist deutlich zufriedenstellend, da die aus dem ICE-Verkehr interpretierte Qualitätsanforderung von $\pm 5\%$ (s. Kapitel 3.1) zuverlässig erreicht werden kann.

Auch wenn die Ergebnisse der einzelnen Streckenabschnitte allein betrachtet zufrieden stellende Werte liefern, sollte die Massenbestimmung nicht nach jedem Abschnitt neu begonnen werden, sondern an das Ergebnis des vorigen Abschnitts anknüpfen. In welcher Art dies geschieht ist von der Zugkonfiguration abhängig. Bei der Untersuchung mit dem InterRegio wurde die ermittelte Masse des vorigen Abschnitts mit 50 % in die Massenbestimmung des aktuellen Abschnitts hineingenommen (s. Gleichung 5-3). Diese Vorgehensweise hat gute Werte bei den Untersuchungen erbracht, die Ergebnisse sind in der Abbildung 4.8 veranschaulicht.

Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass bei Streckenabschnitten, bei denen keine Massenbestimmung möglich ist das Ergebnis des vorherigen Abschnitts übernommen wird.

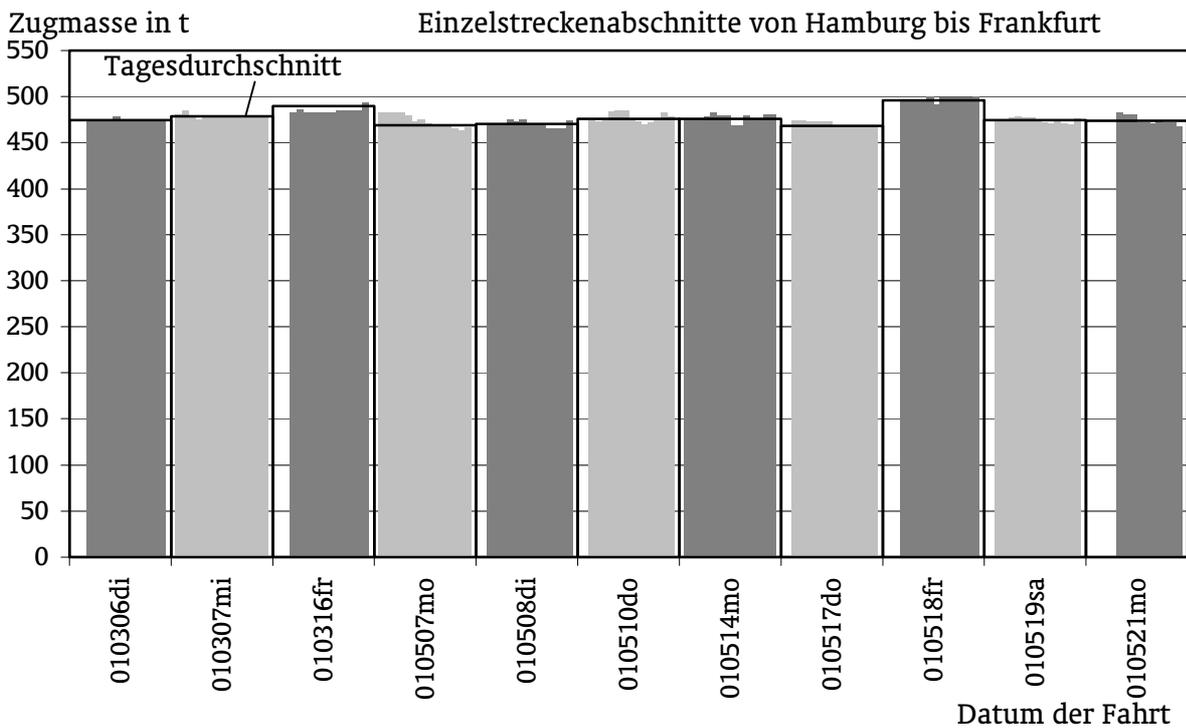


Abbildung 4.8: Ergebnisse der Massenbestimmung bei Fahrten zwischen Hamburg und Frankfurt mit 50% iger Übernahme des Ergebnisses des zurückliegenden Streckenabschnitts

4.2.2 Beharrung

Die Beharrungsphase bietet wie für die zuvor beschriebene Beschleunigungsphase für die BfD die Möglichkeit die Masse zu bestimmen. Dabei werden die Zugkräfte bei einer Beharrungsfahrt in der Abhängigkeit der Steigung (s. Gleichung 4-3) erfasst. Die Steigung repräsentiert dabei die aus der Strecke und die aus der Bewegung resultierende Beschleunigung.

$$s = c_s + \frac{a_{trans}}{g} (1 + \rho_{rot}) + \frac{650}{R - 55} \cdot \frac{1}{1000} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

mit: c_s Neigung in m/m
 a_{trans} translatorische Beschleunigung in m/s²
 ρ_{rot} Massefaktor in –
 R Krümmungshalbmesser in m

Gemäß den Ausführungen in Kapitel 2.2 stellt sich der Zusammenhang zwischen Zugkraft und Steigung linear dar. Durch die Bestimmung der Ausgleichsgeraden, die folgender Vorschrift entspricht,

$$Z(s) = W_{\text{Lauf } v} + m \cdot s \cdot g$$

Gleichung 4-3

mit: Z	Zugkraft in N
$W_{\text{lauf } v}$	Laufwiderstand bei der Geschwindigkeit v in N
m	Masse in kg
s	Steigung in m/m
g	Fallbeschleunigung ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$)

und deren Ableitung, lässt sich die Masse wie folgt beschreiben:

$$m = \frac{dZ(s)}{ds} \cdot \frac{1}{g}$$

Gleichung 4-4

Durch die Messung der Zugkraft bei Beharrungsfahrt und der Zuordnung der jeweilig aktuellen Steigung kann der quantitative Zusammenhang zwischen Zugkraftanstieg und Steigungsänderung geschaffen werden. Mit einem Regressionsverfahren lässt sich aus den einzelnen Messwerten der lineare Zusammenhang zwischen Steigung und Zugkraft ermitteln. Die folgende Abbildung 4.9 zeigt für die verschiedenen Beharrungsgeschwindigkeiten die Verläufe der Zugkraft in der Abhängigkeit der Steigung. Die Ermittlung der Ausgleichsgeraden wurde mit der Methode der kleinsten Quadrate realisiert.[Spiegel-90] (s. Kapitel 5.3.3)

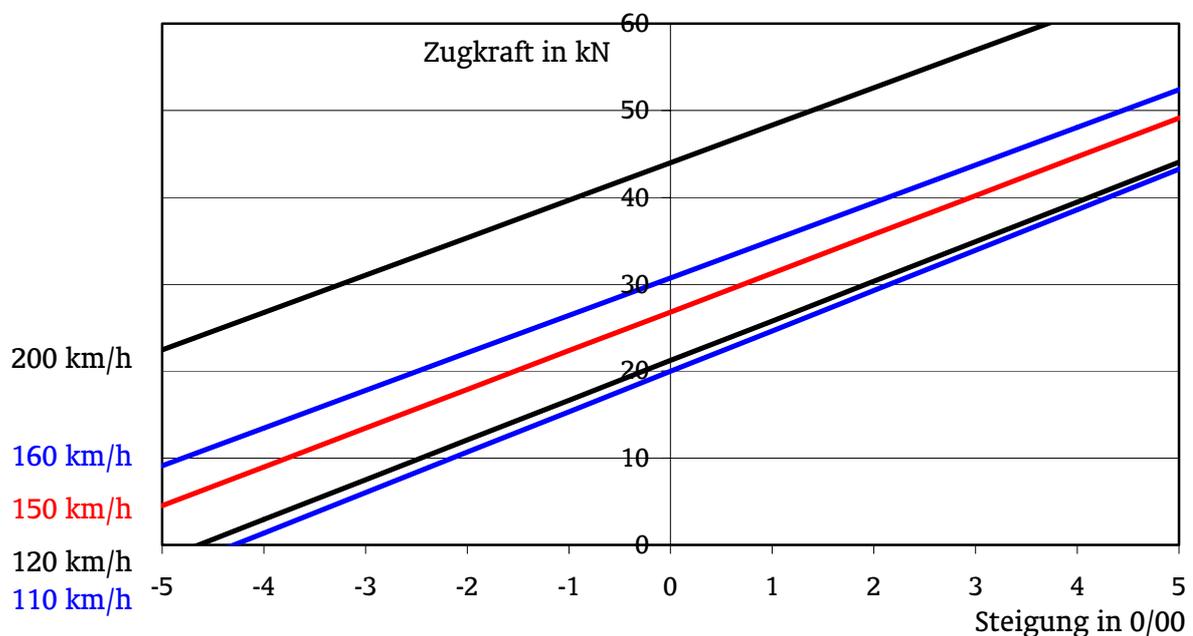


Abbildung 4.9: Zugkraft - Steigungs - Diagramm

Mit der Bestimmung der Ausgleichsgeraden und der Bildung der Ableitung wird die Masse des Zuges ermittelt (s. Gleichung 4-4). Auf diese Art wurde für die fünf dargestellten Geschwindigkeiten die Masse ermittelt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 4.10 dargestellt.

Ermittelte Zugmasse in t

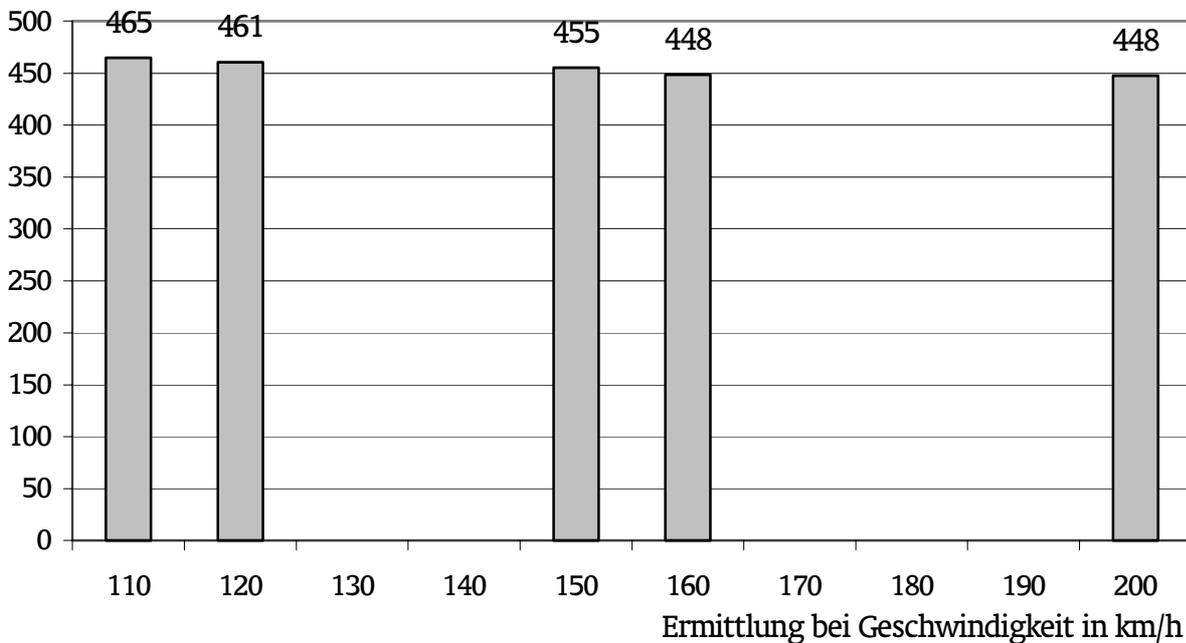
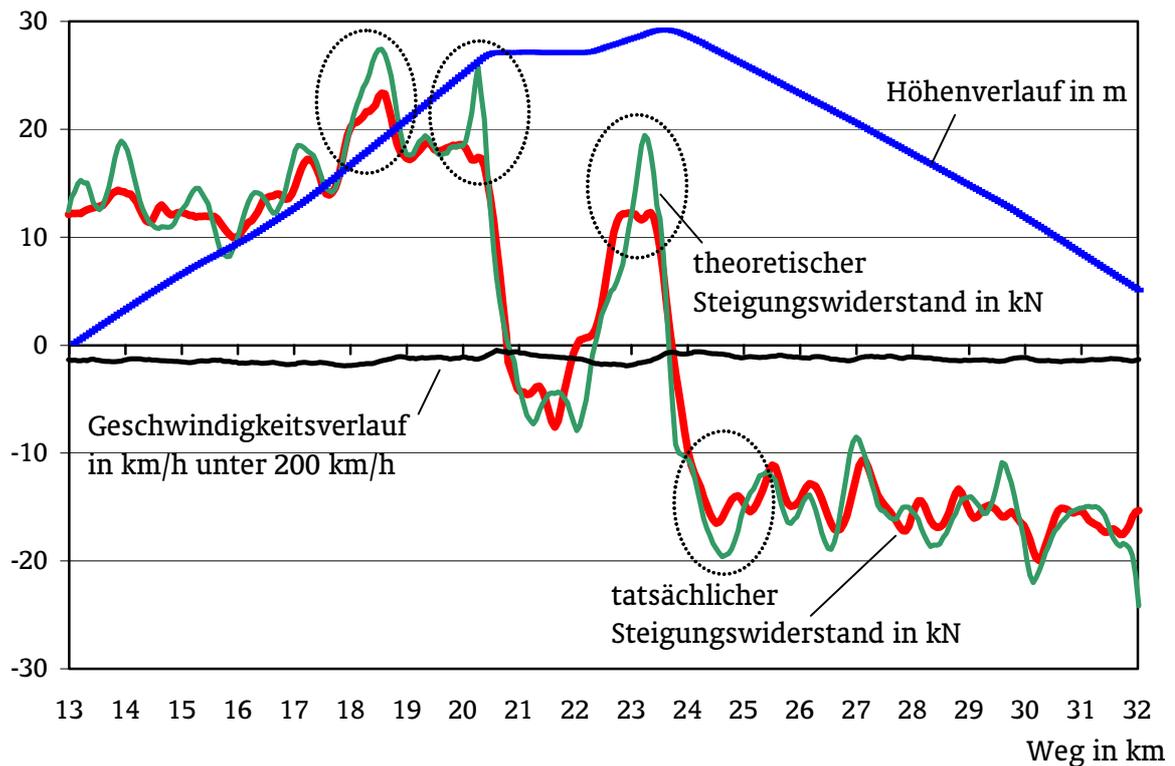


Abbildung 4.10: Ermittelte Massen bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Die Ergebnisse aus diesem Bestimmungsverfahren entsprechen nicht den erwarteten Werten. Aus den Ergebnissen der Zugmassenbestimmung in der Beschleunigung ergibt sich im Mittel eine Zugmasse von 475 t. Dieser Wert ist bei der Zugmasse des unbesetzten Zugs und der zulässigen Zuladung plausibel. Wird dieser Wert als Bezugsgröße angesehen, so sind die ermittelten Werte um 10 bis 27 t zu niedrig. Das entspricht 2 bis 6 % Abweichung von der Masse, die bei der Beschleunigung plausibel ermittelt wurde.

Somit muss festgestellt werden, dass dieses theoretisch einwandfreie Verfahren im praktischen Betrieb Schwächen besitzt. Um diese zu veranschaulichen sind in der Abbildung 4.11 der Höhenverlauf, die Geschwindigkeit sowie der theoretische Steigungswiderstand und der tatsächliche Steigungswiderstand dargestellt. Der tatsächliche Steigungswiderstand wurde dabei durch die gemessene Zugkraft bestimmt, wobei von der Zugkraft der Laufwiderstand abgezogen wurde. Der theoretische Steigungswiderstand wird aus der zugeordneten Steigung (s. Gleichung 4-2) ermittelt.



**Abbildung 4.11: Situation bei der Massenbestimmung bei Beharrung
Beispiel: Streckenteil zwischen Uelzen und Celle**

Die Schwäche bei diesem Bestimmungsverfahren liegt in der Abweichung zwischen den aus den Messungen bestimmten Steigungswiderständen und den theoretischen Steigungswiderständen, die anhand der Strecken- und Beschleunigungsverhältnisse bestimmt werden. An den mit Ovalen gekennzeichneten Stellen in der Abbildung 4.11 wird deutlich, wie der gemessene Steigungswiderstand sich nicht so stark ausbildet wie er entsprechend der Steigung sein müsste. Hier wird also ein für die positive Steigung zu niedriger Widerstandswert beziehungsweise bei einer negativen Steigung ein zu hoher Widerstandswert gemessen. Dieser Effekt bedeutet, dass die Ausprägung der gemessenen Steigungswiderstände nicht so intensiv ist wie sie eigentlich entsprechend der vorhandenen Steigung sein müsste.

Für die exakte quantitative Formulierung dieser Einflüsse müsste der Zug differenzierter betrachtet werden. Insbesondere die Längsdynamik des Zuges kann einen nennenswerten Einflussfaktor darstellen, da hier Energiespeicherungen in Folge der Lastwechsel formuliert werden. Durch die Lastwechsel aufgrund der unterschiedlichen Steigungen wird zum Beispiel der Zug gelängt beziehungsweise

gestaucht und somit wird Energie im Zug gespeichert, die einen dämpfenden Effekt bei dem tatsächlichen Steigungswiderstand hervorruft.

Desweiteren repräsentiert die Beschleunigung der Lok aufgrund der wechselnden Kräfte nicht die Beschleunigung des Zuges. Durch die Änderung der Längskraft im Zugverband werden die Puffer eingefedert. Die Puffer zwischen zwei Wagen werden durch eine Kraft von 20 kN um 20 mm zusammengedrückt [Raeber-78]. Dies zeigt, dass der Zug erst gestaucht werden muss, bis die entsprechende Beschleunigung für den gesamten Zug gilt.

Ein weiterer Grund für die zu niedrige Massenbestimmung ist auch die nicht absolut exakte Ortung, die bewirkt, dass die Zuordnung der Streckenneigungen leicht fehlerbehaftet ist. Die Ortungsgenauigkeit bei den durchgeführten Messfahrten liegt bei einer Genauigkeit von ± 150 m. Diese Abweichung bedeutet bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h eine Ungenauigkeit von 3 Sekunden bei der Messwert-Streckenzuordnung.

Auch wenn dieses Verfahren aufgrund der geschilderten Schwächen zu niedrige Werte liefert muss festgestellt werden, dass mit diesem Verfahren die untere Grenze der Masse bestimmt werden kann. Dies ist für die ESF von Interesse, da so mit der Kenntnis des Laufwiderstands eine obere Grenze der Verzögerung beim Auslauf aufgezeigt werden kann, die zuverlässig genutzt werden kann.

Die unterschiedlichen Abweichungen der Massenbestimmungen in den verschiedenen Geschwindigkeiten liegen in den wechselnden geografischen Situationen begründet. So befinden sich die Strecken mit 200 und 160 km/h Streckengeschwindigkeit im norddeutschen Flachland, je bergiger es in Richtung Frankfurt wird, desto geringer werden auch die Streckengeschwindigkeiten. Bei starken Neigungswechseln lässt sich auch die Bestimmung der Masse in der Beharrung besser durchführen, da die Bestimmungsgrößen sich deutlicher ausprägen.

4.2.3 Rollphase ohne Zug-/ Bremskraft

In der Rollphase fährt der Zug mit abgeschalteter Leistung. Dabei wird die kinetische und potentielle Energie des Zuges genutzt, um den Fahrwiderstand zu überwinden. Die folgende Gleichung zeigt die hierbei wirkenden Größen,

$$W_{\text{Lauf}} = W_{\text{Beschl}} + W_{\text{Strecke}}$$

Gleichung 4-5

mit: W_{Lauf} Laufwiderstand in N
 W_{Beschl} Beschleunigungswiderstand in N
 W_{Strecke} Streckenwiderstand in N

Zur Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwerts wird der Luftwiderstand in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ermittelt. Im Laufe der 154 begleiteten Fahrten fanden über 10 Stunden der Fahrzeit im Auslauf statt und wurden ausgewertet. Die folgende Abbildung 4.12 zeigt die Gesamtauswertung dieser Auslaufphasen, wobei der mittlere Laufwiderstand (s. Gleichung 4-5) und die Standardabweichung über der Geschwindigkeit aufgetragen sind. Durch die Anwendung der Gleichungen 2-2 bis 2-6 lässt sich der Luftwiderstandsbeiwert bestimmen. Das realisierte Verfahren wird in Kapitel 5.3.4 beschrieben.

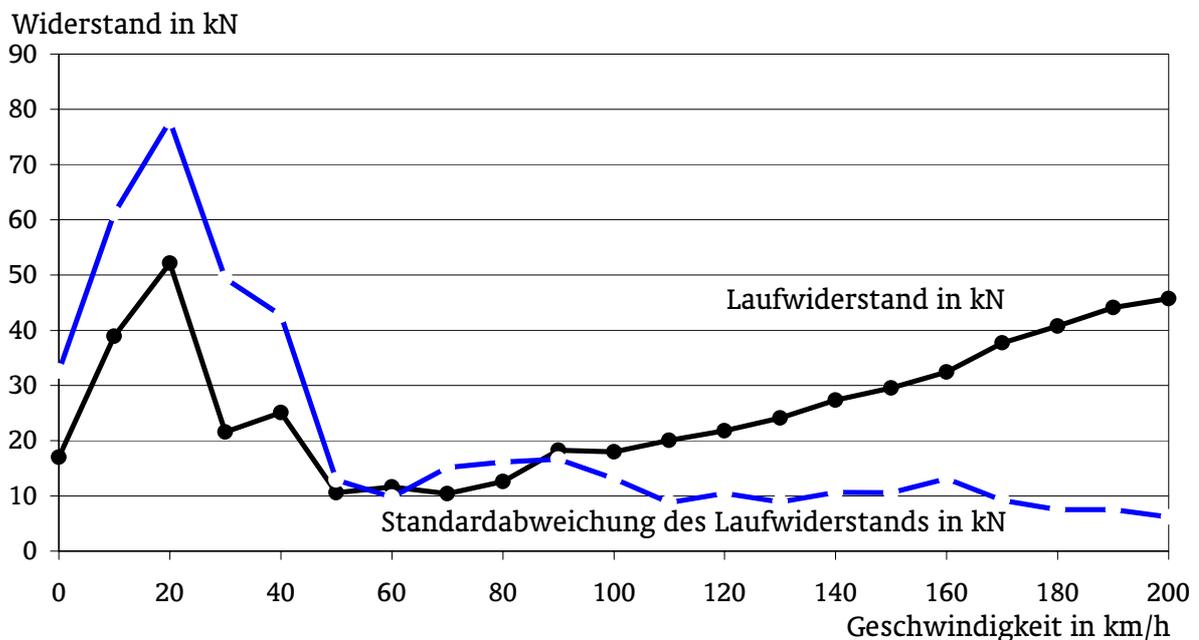


Abbildung 4.12: Laufwiderstand - Geschwindigkeit

Der Verlauf des Laufwiderstands sollte in der Theorie einer Parabel entsprechen, die ihren Ursprung dicht bei 0 km/h hat. Der Verlauf des ermittelten Fahrwiderstands entspricht nicht dieser Theorie. Hier zeigt sich die Problematik der Bestimmung des Laufwiderstands in niedrigen Geschwindigkeitsbereichen. Die Erkenntnisse aus den begleiteten Fahrten helfen diese Problematik zu lösen. Es konnte beobachtet werden, dass die Luftwiderstände, die im unteren Geschwindigkeitsbereich angesiedelt sind, häufig beim Rollen im Bahnhofsvorfeld ermittelt wurden. Hier werden viele Weichen

durchfahren, die im digitalen Streckenatlas zwar benannt werden jedoch fahrdynamisch als normales Gleis definiert sind. Dies bedeutet, dass der Fahrwiderstand hier nicht richtig ermittelt werden kann. Desweiteren werden leichte Bremsungen im unteren Geschwindigkeitsbereich nicht richtig erfasst, da hier mechanisch und nicht elektrisch gebremst wird und somit der Bestimmungsalgorithmus fehlerhafte Daten erhält. Bei der Untersuchungslok ist eine Ausgrenzung dieser Werte daher unterhalb von 50 km/h sinnvoll und für die ESF unbedenklich, da die ESF nur die Ausrollphasen deutlich über 70 km/h bei den begleiteten Fahrten genutzt hat. Die Ausgrenzung der unteren Geschwindigkeitswerte ist unbedenklich, da die Bestimmung des Laufwiderstands bei Geschwindigkeiten oberhalb von 40 km/h plausibel ist, die Streuung der Werte deutlich gering ausfällt und sie keine Einschränkung für die ESF darstellt.

Die Qualität der Bestimmung des Laufwiderstands wird bei der Betrachtung der Ausläufe einzelner Fahrten deutlicher. In der Abbildung 4.13 sind anhand der Ausläufe bei sechs begleiteten Fahrten die Laufwiderstandsverläufe und deren Mittelwert dargestellt. Dazugehörig sind auch die Standardabweichungen für die Messungen aufgetragen, die jeweils auf über 150 Messsekunden basieren.

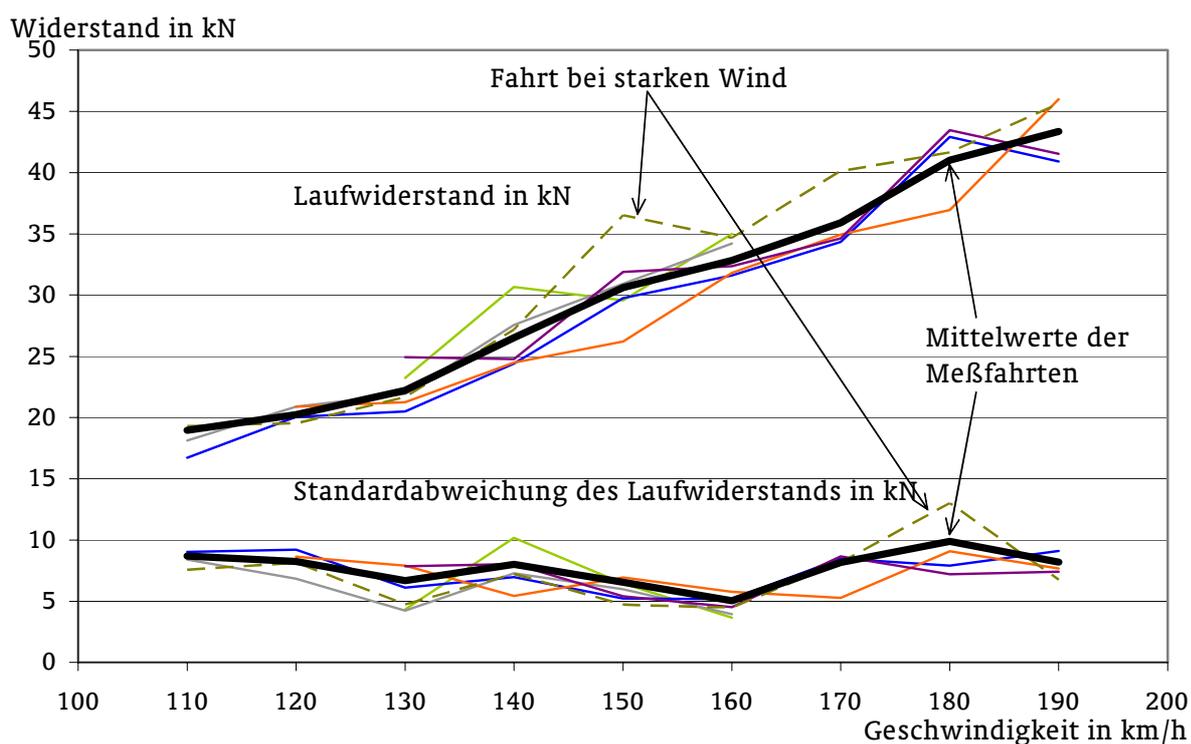


Abbildung 4.13: Laufwiderstandsverläufe von sechs Fahrten zwischen Celle und Hannover

Bei der Betrachtung der Laufwiderstandsverläufe und deren Standardabweichung zeigt sich, dass der Laufwiderstand der einzelnen Fahrten im Bereich $\pm 10\%$ um den Mittelwert liegt und die Standardabweichung unter 10 kN beträgt. Dieser Wert erscheint recht hoch, jedoch muss berücksichtigt werden, dass verschiedene Störungseinflüsse die starke Streuung bei der Bestimmung des Laufwiderstands verursachen. Durch die nicht ganz genaue Ortung des Zuges und der daraus folgenden ungenauen Zuordnung der Streckendaten wird der Streckenwiderstand falsch bestimmt. Die differierenden Umgebungen des Gleiskörpers erzeugen verschiedene Wechselwirkungen mit dem Zug (z.B. Brücken). Auch die Windempfindlichkeit des Zuges ist von der Lage des Gleises in seiner Umgebung abhängig. Zugbegegnungen führen zu weiteren Störgrößen beim Laufwiderstand.

Da jedoch im Auslauf eine Vielzahl an Werten erfasst wird, lassen sich die Luftwiderstandsfaktoren für die einzelnen Fahrten ermitteln. Anhand dieser Faktoren kann die Qualität der Laufwiderstandsvorhersage bewertet werden. Der Luftwiderstandsfaktor stellt die Zusammenfassung der Faktoren beim Luftwiderstand wie folgt dar:

$$c_2 = \frac{1}{2} \cdot A_0 \cdot \rho_{Luft} \cdot c_1 \quad \text{Gleichung 4-6}$$

mit: c_2	Luftwiderstandsfaktor in $N \cdot s^2 / m^2$
A_0	Querschnittsfläche in m^2
ρ_{Luft}	spezifische Luftdichte in kg/m^3
c_1	Luftwiderstandsbeiwert in –

An 15 Messtagen wurden für 194 Abschnitte die Luftwiderstandsfaktoren ermittelt. Dabei wurde vereinfacht die Windgeschwindigkeit mit 0 km/h angesetzt. Diese Vereinfachung findet in der Bewertung der Ergebnisse Berücksichtigung. Bei den fehlenden Abschnitten wurde kein Luftwiderstandsfaktor bestimmt, da der Zug weniger als 20 Sekunden rollte. Die folgende Tabelle 4.2 stellt die Ergebnisse der einzelnen Abschnitte dar.

Start-Bhf	Ziel-Bhf	001114di	001213mi	001218m	001219di	010118do	010119fr	010131mi	010306di	010316fr	010507m	010514m	010517do	010518fr	010519sa	010521m
AH	AHAR	16.3										14.7			16.1	
AHAR	ALBG	14.8		14.3	15.6	15.0			16.6		13.8	13.6	12.9	16.8	13.2	
ALBG	ABVS	14.9	15.9	14.8	14.9	15.0	15.0	15.8		14.6	14.0	13.6		20.3	14.0	
ABVS	HU	15.2		15.1	15.7		15.4		16.3	14.6	14.0		15.3		17.3	
HU	HC	14.2	16.0	15.0	14.8	14.7	14.5	14.7	14.5	14.3	13.5		15.0		14.0	14.0
HC	HH	14.1	17.4	14.6	14.2	14.6	14.3	14.3	15.2	14.6	13.7	12.5	14.0	14.5	14.9	13.7
HH	HALF	15.3	17.3	15.8	15.1	15.3	14.3	15.6	16.1	14.4	15.6	13.6			14.5	13.3
HALF	HK	17.2	18.5	16.2	19.0		16.4	16.2	20.3	15.5	15.9	15.4	16.0	14.7	14.7	14.6
HK	HN	15.1	17.1	18.0			15.2	14.9		13.5	14.7	15.1	14.6		16.4	16.7
HN	HG	16.0	20.3				14.8			13.9	14.1	15.0	15.3	15.4	22.8	12.8
FKW	FTS	14.9	16.4	15.9		17.7	15.5	16.4	17.0	15.1	15.6	16.5	14.8	16.2	14.9	14.1
FTS	FWAB	16.6	17.6	15.2	13.8	15.9	16.4	14.7	14.9	13.8	15.4	14.1	18.7	14.4	15.5	14.9
FWAB	FMBG	17.7	23.0	15.0		14.4	17.8	16.7	19.7	14.3	16.4	16.9	18.3	19.7	15.2	14.8
FMBG	FG	15.5	16.7			15.9	17.3	15.3	15.7	14.1	16.7	15.8	14.8	16.4	17.8	14.0
FG	FFG	14.4	15.5	15.3	15.6	15.0	16.5	14.4	15.5	12.9	15.2	14.8	15.1	12.8	14.8	
FFG	FF	13.8	16.8	14.7	15.7	15.7	16.4		14.7	12.4	14.9	14.2	13.8	14.3	13.3	14.1
Durchschnitt		15.4	17.6	15.4	15.4	15.4	15.7	15.4	16.4	14.1	14.9	14.7	15.3	16.0	15.6	14.3
Standardabweichung eines Tages		1.07	1.97	0.91	1.33	0.87	1.07	0.79	1.78	0.79	1.00	1.17	1.57	2.19	2.25	0.96

Tabelle 4.2: Ermittelte Luftwiderstandsfaktoren in Ns^2/m^2

Zur besseren Betrachtung sind diese Ergebnisse in der Abbildung 4.14 grafisch dargestellt. Für die einzelnen Messtage sind entsprechend dem Fahrverlauf die ermittelten Luftwiderstandsfaktoren abschnittsweise nebeneinander aufgetragen.

Luftwiderstandsfaktor in $N \cdot s^2/m^2$

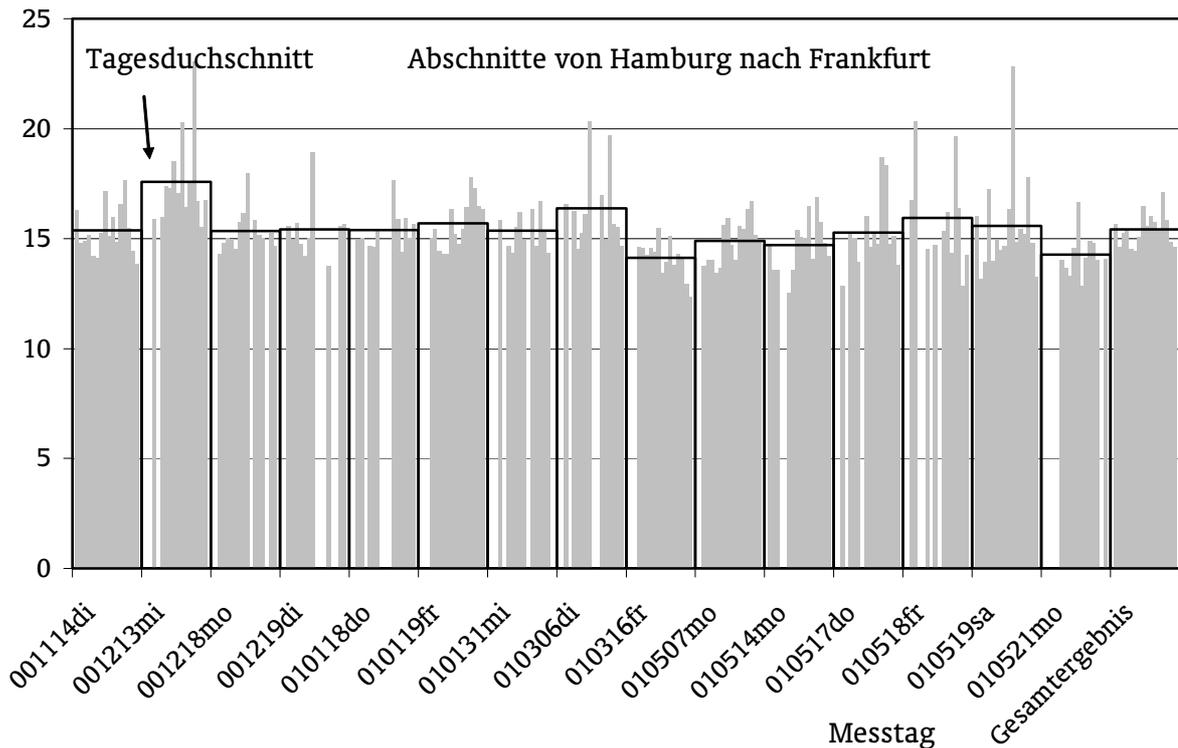


Abbildung 4.14: Luftwiderstandsfaktoren der einzelnen Abschnitte bei Fahrten zwischen Hamburg und Frankfurt

Es wird ersichtlich, dass der Luftwiderstand während einer Fahrt schwankt. Ein Maß dafür stellt die Standardabweichung der einzelnen Messtage dar (vgl. Tabelle 4.2), die im Mittel $1.3 Ns^2/m^2$ beträgt. Um die Bedeutung dieser Standardabweichung zu veranschaulichen hilft die Betrachtung des Windeinflusses auf den Laufwiderstand des Untersuchungszuges. Ausgehend von dem mittleren Luftwiderstandsfaktor $15,4 Ns^2/m^2$ wird für eine Abweichung von $1 Ns^2/m^2$ die Windgeschwindigkeitsänderung bestimmt, die eine gleiche Abweichung hervorruft. Diese äquivalente Windgeschwindigkeitsänderung beträgt 5 km/h . Das bedeutet im Umkehrschluss, dass die Windgeschwindigkeit bei der Standardabweichung eine Streuweite von knapp 7 km/h besitzt. Dieser Wert ist plausibel, da die Windgeschwindigkeiten den Zug zeitlich über 5 Stunden und räumlich über 500 km unterschiedlich beeinflussen. Diese Erkenntnisse decken sich auch mit der Schwankungsbreite der Luftgeschwindigkeiten, die in Kapitel 3.1 erläutert ist.

Die recht sprunghafte Änderung der Luftwiderstandsfaktoren liegt in den kurzen Bestimmungszeiten von unter 60 Sekunden begründet. Dadurch werden partiell

unterschiedliche Windsituationen erfasst, die dadurch auch stärker voneinander abweichen. Sinnvoll ist es daher den Luftwiderstandsfaktor über die einzelnen Abschnitte fortlaufend zu bestimmen. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine bessere Laufwiderstandsvorhersage. Die Abbildung 4.15 verdeutlicht, wie sich durch die abschnittsübergreifende Luftwiderstandserfassung die Bestimmung des Luftwiderstandsfaktors darstellt.

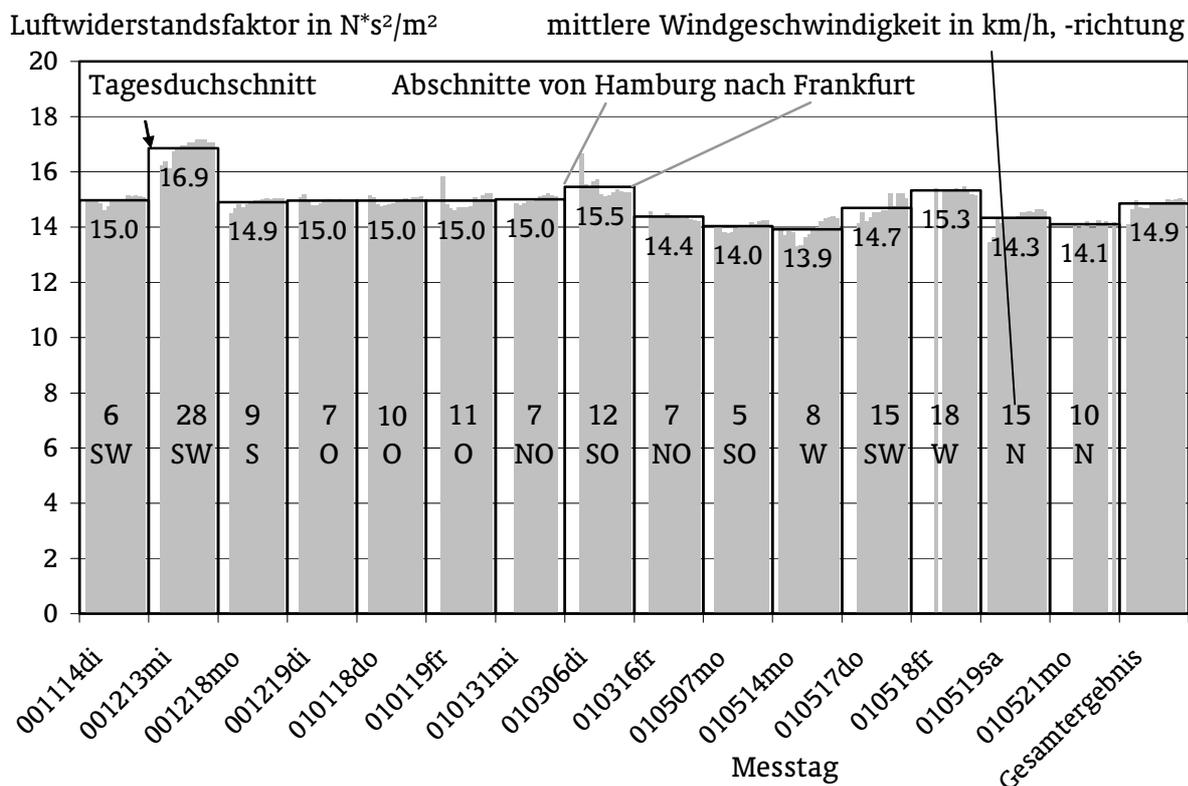


Abbildung 4.15: Luftwiderstandsfaktoren im Verlauf der Zugfahrt bei Fahrten zwischen Hamburg und Frankfurt mit mittlerer Windgeschwindigkeit am Flughafen Hannover [klass]

Hieraus wird ersichtlich, dass die Bestimmung des Luftwiderstandsfaktors durch die Betrachtung über die Abschnitte hinweg eine deutlich bessere Qualität bietet. Die Werte für den Luftwiderstandsfaktor liegen bis auf die Ausnahmen vom 13. Dezember 2000 alle zwischen 13.9 und 15.5 $N*s^2/m^2$. Diese Schwankung von 1.6 $N*s^2/m^2$ ist äquivalent mit einer Änderung des Gegenwinds um etwa 8 km/h. Die Schwankung der Luftwiderstandsbeiwerte, die einer Gegenwindänderung von 8 km/h entspricht, liegt deutlich im Erwartungsbereich, der in den Anforderungen an die BfD in Kapitel 3.1 formuliert ist. Der Ausnahmewert mit 16.9 $N*s^2/m^2$ ist an einem stürmischen Tag

mit einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 28 km/h entstanden und somit auch realistisch.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Luftwiderstand den Anforderungen entsprechend gut bestimmt werden kann.

4.3 Fazit für die Umsetzung der BfD

Durch die Analyse der Messungen wird deutlich, dass die Qualität der BfD auf der InterRegio-Linie zwischen Hamburg und Frankfurt für die Durchführung der ESF zuverlässig die fahrdynamischen Fahrzeugdaten bereitstellen kann. Durch die Massenbestimmung in der Beschleunigung und die Ermittlung des Luftwiderstands beim Auslauf wird die Forderung nach hinreichend genauen Daten deutlich eingehalten. Die Bestimmung der Masse in der Beharrung ist mit Ungenauigkeiten behaftet, mit denen das Ergebnis um 2 bis 6 % zu niedrig ermittelt wird.

Somit sollte für die Umsetzung der BfD bei dieser Art der Verkehre auf die Massenbestimmung in der Beschleunigung aufgebaut werden. Dies ist insbesondere auf den flachen Strecken sinnvoll, da hier die Bestimmung der Masse bei Beharrung stärker fehlerbehaftet ist. Für die Nutzung der Beschleunigung zur Massenbestimmung spricht auch, dass die Beschleunigungen bei einem InterRegio auch ausreichend häufig auftreten und dass der Zug oft genug hält. Die Massenbestimmung in der Beharrung kann jedoch für Verkehre mit einem größeren Steigungsanteil von Interesse sein, weil sich dort eine gute Qualität einstellen kann.

Bisher wurden die einzelnen Phasen der BfD singular betrachtet. Da bei der Massenbestimmung die Qualität von der Genauigkeit des Luftwiderstands und umgekehrt die Qualität der Luftwiderstandsbestimmung abhängig von der Genauigkeit der Masse ist, ist es von Interesse zu sehen, wie diese beiden Bestimmungsverfahren miteinander arbeiten. Die Abhängigkeiten der beiden Bestimmungsverfahren erwirken eine Stabilisierung der zu bestimmenden Daten. Diese stabilisierende Wirkung wird durch die Wahl der Bestimmungsverfahren erreicht. So wirkt sich ein fehlerhaft zugrunde gelegter Luftwiderstand bei der Massenbestimmung in der Beschleunigung nicht so stark aus (s. Kapitel 3.2.1). Andersherum stellt sich die Situation bei der

Bestimmung des Luftwiderstands dar (s. Kapitel 3.2.3). Wie schnell sich ein stabiler Zustand einstellt ist von diversen Faktoren abhängig, die während einer Bestimmungsphase wirken. Streckenneigung, Rollwiderstand, Zugmasse und Triebfahrzeugleistung sind wesentliche Einflussfaktoren.

Die Betrachtung des InterRegios zeigt auf, wie schnell bei dieser Zugkonfiguration vernünftige Ergebnisse erzielt werden. Zunächst kann man durch das Kräfteverhältnis - Diagramm in der Abbildung 3.3 sehen, dass im Bereich zwischen 20 und 90 km/h, in dem die Massenbestimmung umgesetzt wird, der Luftwiderstand deutlich unter 10 % liegt und der Beschleunigungswiderstand mit über 90 % den restlichen Anteil stellt. Somit wird bei einem um 100 % falsch angesetzten Luftwiderstand die Masse maximal mit einem Fehler von 10 % bestimmt. Eine falsch bestimmte Masse zieht im Auslauf einen ähnlich großen Fehler bei der Bestimmung des Luftwiderstands nach sich. Nach dem nächsten Beschleunigungsvorgang ist bereits eine Bestimmungsgenauigkeit, die der Massenbestimmung entspricht erreicht. Anhand dieses Beispiels wird deutlich, wie schnell die BfD zuverlässig die Fahrzeugdaten bestimmt. Für andere Zugkonfigurationen werden Abweichungen in den Zahlenwerten auftreten können, jedoch wird das Ergebnis sich prinzipiell gleich entwickeln.

5 Verfahrensbeschreibung der BfD

Zur Umsetzung der BfD auf der Untersuchungslok wird die Technik, wie sie am Anfang von Kapitel 4 beschrieben ist, genutzt. Durch die Umsetzung der BfD auf begleiteten Messfahrten konnte die Plausibilität der Ergebnisse im Verlauf der Fahrten durch die Beobachtungen der Begleitperson überwacht werden. Bei den begleiteten Fahrten wurde der Softwarealgorithmus zur BfD entwickelt und angewendet.

Der Kern der BfD basiert auf der Einteilung der Fahrt in einzelne Phasen, die dann nach den entsprechenden Bestimmungsmöglichkeiten ausgewertet werden. Bei der Auswertung der Messungen wurde die Fahrt auf einem Streckenabschnitt insgesamt ausgewertet, wobei die verschiedenen Schritte, wie das Filtern und Glätten der Daten, die Ermittlung der verschiedenen Hilfsgrößen, die Einteilung der Phasen unterschiedlicher Fahrweisen und die Bestimmung der fahrdynamischen Daten nacheinander durchgeführt wurden. Die Umsetzung der BfD muss aus der Parallelstruktur der Messauswertung eine serielle Struktur schaffen, bei der die Messwerte nacheinander im Verlauf der Fahrt verarbeitet werden.

Ein weiterer Aspekt der bei der Realisierung der BfD beachtet werden muss, ist die Kommunikation mit der ESF. Der Funktionsnachweis der BfD in der Zusammenarbeit mit der ESF ist von wirtschaftlichem Interesse, da die ESF dann auf Fahrzeugen eingesetzt werden kann, bei denen die fahrdynamischen Fahrzeugdaten ohne BfD fehlen oder in zu schlechter Qualität vorliegen.

In der folgenden Abbildung 5.1 wird die Verfahrensstruktur der BfD veranschaulicht dargestellt, wobei eine Übersicht der verschiedenen Funktionen und deren Zusammenarbeit in der BfD gegeben wird.

Zu Programmbeginn werden in **Beginn Zugfahrt** zunächst die Informationen abgefragt, die notwendig sind, um die richtige Auswahl der Dateien aus den **Streckendaten, Fahrzeugdaten** und **Planzuginformationen** zu treffen. Anschließend werden die Daten für den bevorstehenden Streckenabschnitt in der **Datenaufbereitung** vorbereitet. Mit Beginn der Fahrt wird der erste Satz Messdaten bei **Messwerte lesen** gelesen. Bei **Messdaten aufbereiten** werden die Daten gefiltert und es werden verschiedene verfahrensinterne Daten ermittelt. **Fahrzustand bestimmen** dient zur Ermittlung der aktuellen Fahrweise des Zuges. Bei **Beschleunigung, Beharrung** und **Auslauf** wird zu dem entsprechenden Bestimmungsverfahren verzweigt. Die Ergebnisse aus der **Massenbestimmung** und der **Luftwiderstandsbestimmung** werden anschließend in der **Ausgabe der ermittelten fahrdynamischen Daten** angezeigt bzw. protokolliert. Wenn der Zug den nächsten **Fahrplanhalt** noch nicht erreicht hat wird der nächste Satz Messdaten gelesen. Andernfalls werden in der **Datenaufbereitung** die Vorbereitungen für den nächsten Abschnitt getroffen.

5.1 Datenaufbereitung vor Fahrtbeginn

Zu Beginn einer Zugfahrt müssen dem Programmsystem die Streckenabschnitte des Zuglaufs angegeben werden, die Haltepunkte zum Fahrgastwechsel müssen benannt, die Triebfahrzeugbaureihe und Variante muss bezeichnet und der Wagenzug muss beschrieben werden. Durch die Eingabe der Zugnummer, der Triebfahrzeugbaureihe und der Angabe der Zuggattung erhält die Software die nötigen Steuerinformationen, um die notwendigen Daten aus den Streckendaten, Fahrzeugdaten und Planzuginformationen zu wählen. Anhand der Zugnummer wird die Liste der Streckenabschnitte gelesen. Dabei setzen sich die einzelnen Informationen aus dem Startbahnhof, dem Zielbahnhof und der zu nutzenden Strecke zusammen. Mit der Baureihenvariante und der Wagenzugbeschreibung wird die entsprechende Fahrzeugdatei ausgesucht und gelesen, die alle relevanten Fahrzeugdaten beinhaltet.

Streckendaten

Die Programmsteuerung arbeitet entsprechend der Liste der Streckenabschnitte d.h. vor jedem Streckenabschnitt werden die Daten aufbereitet. Für den bevorstehenden Streckenabschnitt werden die Infrastrukturdaten gelesen mit denen die topografische

Lage der Strecke beschrieben wird. Die Datenbank mit den Streckendaten stellt für die BfD die notwendigen Infrastrukturdaten zur Verfügung, die in der Tabelle 5.1 zusammengefasst sind.

- Entfernung
- Neigung
- Radius
- Halteplätze
- Tunnel
- Streckengeschwindigkeit

Tabelle 5.1: Infrastrukturdaten für die BfD

Fahrzeugdaten

Die Fahrzeugdaten stellen die wesentlichen Grunddaten des Zuges und die notwendigen Daten zur Beschreibung der Antriebsanlage des Triebfahrzeugs zur Verfügung. Aus den Triebfahrzeugdaten, die sich in einem Zugkraft-/Bremskraft-Geschwindigkeits-Diagramm veranschaulichen lassen (vgl. Abbildung 4.3), wird das Leistungsvermögen des Triebfahrzeugs formuliert. Bei der Beschreibung des Zuges werden der BfD die Startwerte für die fahrdynamischen Daten und die bekannten Fahrzeugeigenschaften vermittelt. Die bei der BfD verarbeiteten Fahrzeugdaten sind in der Tabelle 5.2 aufgeführt.

- Zugmasse
- Zuglänge
- zulässige Geschwindigkeit
- Massenzuschlag
- Rollwiderstandsbeiwert
- Dämpfungswiderstandsbeiwert
- Luftwiderstandsbeiwert
- Zugkraft-Geschwindigkeits-Kennlinie

Tabelle 5.2: Fahrzeugdaten für die BfD

Datenaufbereitung

In der Datenaufbereitung werden die für den bevorstehenden nächsten Abschnitt relevanten Daten aus den zu Fahrtbeginn eingegebenen Daten, wie den Streckendaten, den Fahrzeugdaten und den Planzuginformationen für die Rechnung vorbereitet. Da bei der Bahn häufig die Übergänge zwischen den Neigungen und den Gleisbögen vernachlässigt werden, werden diese auch nicht in den Streckendaten direkt beschrieben. Durch die Anwendung der DS 800 01 [DB-93] lassen sich die Steigungen und Bogenradien stetig formulieren [Bitterberg-99]. Für die spätere Verarbeitung in den Berechnungsalgorithmen werden die streckenseitigen Einflussparameter mittels der Zuglänge so formuliert, dass die Zugspitze als Bezugspunkt genutzt werden kann. In der Abbildung 5.2 werden die sich aus den verschiedenen Beschreibungsarten ergebenden Verläufe dargestellt.

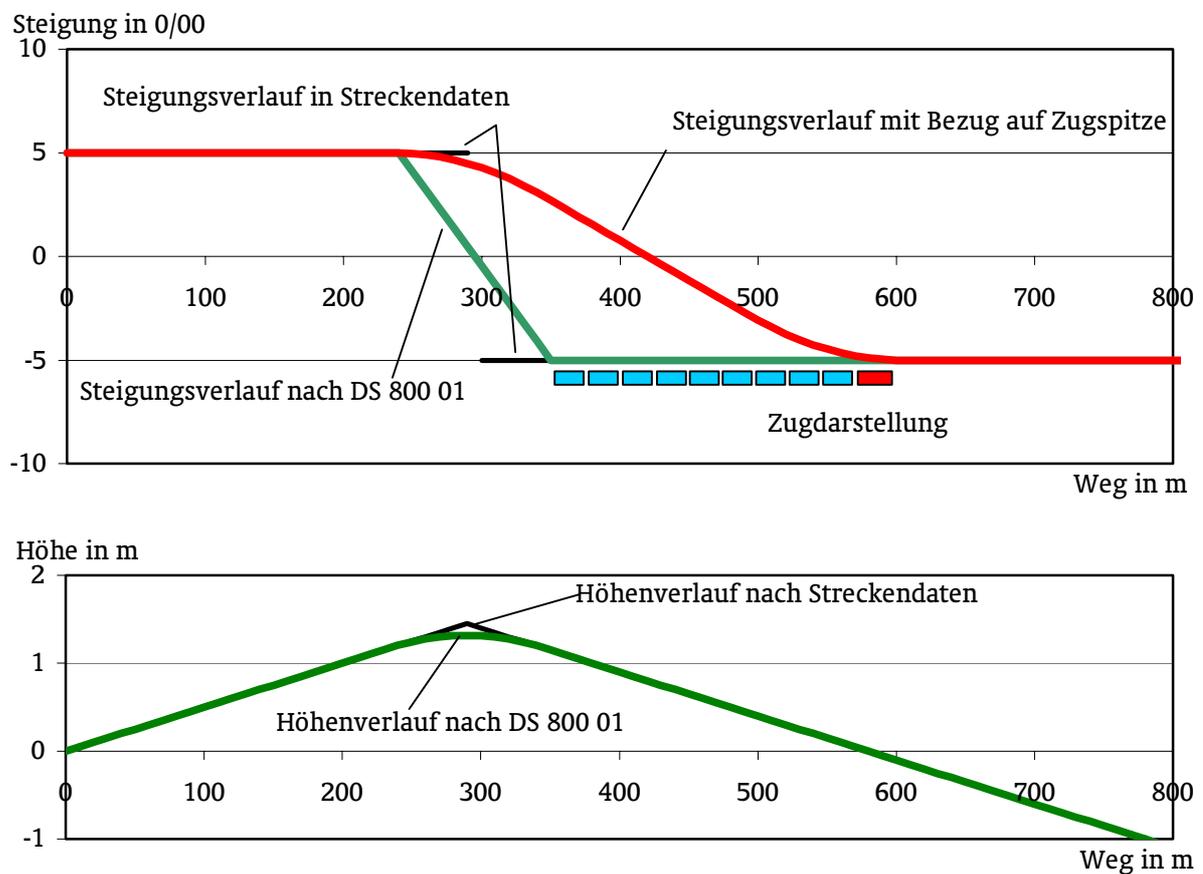


Abbildung 5.2: Beispielhafte Darstellung des Steigungs- und des Höhenverlaufs

Zur Vereinfachung der Rechnungen werden bereits in der Datenaufbereitung die streckenseitigen Widerstandsfaktoren des Bogenradius und der Neigung wie folgt zusammengefasst:

$$c_{str} = \left(\frac{650}{R - 55} \cdot \frac{1}{1000} + c_s \right) \cdot g \quad \text{Gleichung 5-1}$$

mit	c_{str}	Streckenwiderstandsbeiwert in m/m
	R	Krümmungshalbmesser in m
	c_s	Neigung in m/m
	g	Fallbeschleunigung ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$)

5.2 Messwertverarbeitung

In der Messwertverarbeitung werden die Messwerte für die BfD gelesen und aufbereitet. Dabei werden bereits interne Zustandsgrößen für die BfD ermittelt, die einerseits zur Ermittlung der Fahrweise und andererseits zur Bestimmung der fahrdynamischen Daten dienen.

Messwerte lesen

Dieses Softwaremodul realisiert die Kommunikation mit dem Messrechner (s. Abbildung 4.2), auf dem die Messwernerfassung in einer Echtzeitanwendung läuft. Die Kommunikation findet über eine Dateischnittstelle statt, die zwar eine geringe Leistungsfähigkeit besitzt, jedoch kann mit dieser Schnittstelle die Funktionstüchtigkeit der Messwernerfassung zuverlässig kontrolliert werden. Die Messwernerfassung erzeugt jede Sekunde einen Messdatensatz, der für die BfD an der Dateischnittstelle bereitgestellt wird. Die BfD liest diese Datensätze, die folgende Daten beinhalten, fortlaufend:

- Messzeitpunkt
- Zug-/Bremskraft
- Geschwindigkeit
- Betriebsstellenabkürzung des letzten Fahrplanhalts

Tabelle 5.3: Inhalt der Schnittstelle zwischen Messrechner und der BfD

Der Messzeitpunkt wird in 1/100 Sekunden nach Mitternacht angegeben. Die Auflösung der Zug-/Bremskraft beträgt 73 Newton und die Geschwindigkeit wird mit einer Genauigkeit von 8 Millimeter pro Sekunde ermittelt. Die Betriebsstellenabkürzung des letzten Fahrplanhalts wird von dem Messrechner ermittelt. Dies geschieht über den Vergleich der gemessenen GPS-Koordinaten mit den gespeicherten Koordinaten der Bahnhöfe. Dabei gilt, falls der Zug in einem definierten Umkreis eines Halteplatzes zum Stehen kommt, dass dieser Bahnhof den letzten gültigen Haltepunkt repräsentiert.

Messdaten aufbereiten

Für die BfD ist eine gute Qualität der Signale notwendig, um zu vernünftigen Ergebnissen zu kommen. Nach dem Lesen der Messdaten werden diese zunächst digital mit einem Tiefpassfilter bearbeitet. Anschließend wird durch die Integration der Geschwindigkeit der zurückgelegte Weg bestimmt und durch die Differenzierung der Geschwindigkeit die Beschleunigung des Zuges ermittelt. Die Werte der Beschleunigung müssen ebenfalls mit einem Tiefpassfilter geglättet werden.

Bei der BfD haben rekursive Digitalfilter für Echtzeitanwendungen [Schwier-81] gute Ergebnisse erzielt, die entsprechend an die Signale angepasst wurden.

5.3 Bestimmung der fahrdynamischen Daten

Bei der Bestimmung der fahrdynamischen Daten in der BfD wird zunächst die aktuelle Fahrweise ermittelt und anschließend auf Grundlage der Erkenntnisse aus der praktischen Untersuchung ausgewertet. In diesem Kapitel werden die beiden möglichen Massenbestimmungen aufgezeigt und parallel vorgestellt. Für die Umsetzung auf dem Fahrzeug muss für den Einsatzbereich ein Verfahren gemäß den Ausführungen in Kapitel 4.2 ausgewählt werden.

5.3.1 Fahrzustand bestimmen

Die Fahrzustände werden anhand der Zugkraft und Geschwindigkeit ermittelt. Die Möglichkeiten, die sich aus den drei Fahrweisen Beschleunigung, Beharrung und Auslauf für die BfD ergeben, wurden in Kapitel 3 beschrieben. In Kapitel 4 wurde

aufzeigt, wie die Werte ermittelt werden, die zur Einteilung der Messwerte in die einzelnen Fahrweisen nötig sind. Die dort genannten Werte sind in ihrer Höhe nicht allgemeingültig, jedoch können diese Grenzwerte in gleicher Art formuliert werden.

Bei der **Beschleunigung** stellt die Zugkraftkennlinie die Bezugsgröße zur Feststellung des Fahrzustands dar. Der Beschleunigungsfall tritt ein, wenn die Zugkraft die um einen zu bestimmenden Prozentsatz reduzierte Zugkraftkennlinie nicht unterschreitet und wenn die Geschwindigkeit zwischen der unteren und oberen Geschwindigkeitsgrenze liegt.

In der folgenden Abbildung 5.3 wird der Bereich für die Geschwindigkeitsauswertung veranschaulicht.

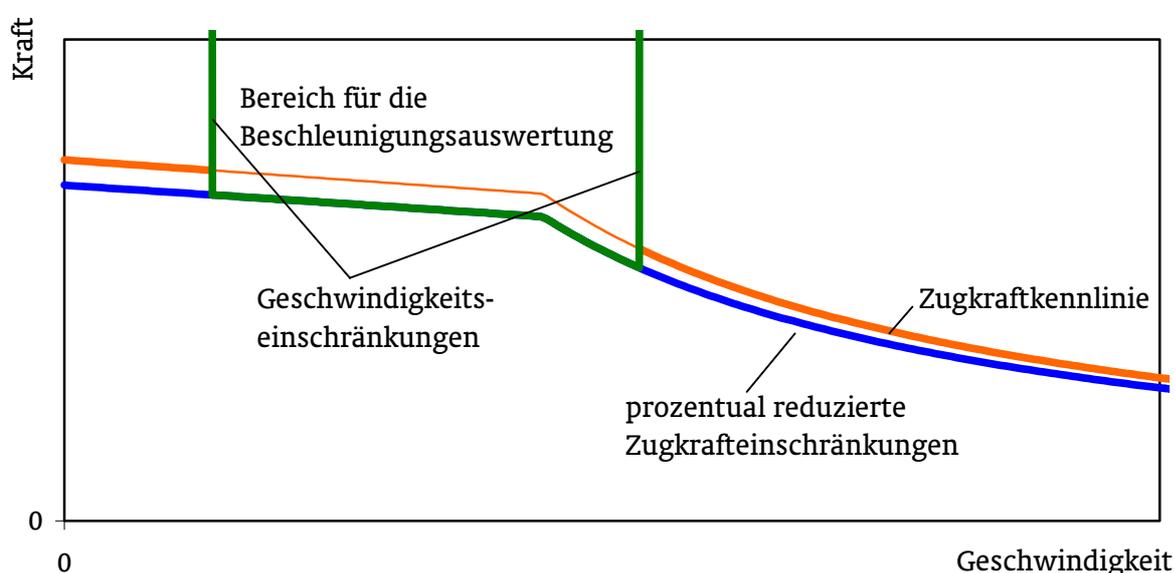


Abbildung 5.3: Bereich zur Massenbestimmung in der Beschleunigung bei der BfD

Die **Beharrung** wird durch den Vergleich der Fahrzeuggeschwindigkeit mit der zulässigen Streckengeschwindigkeit bestimmt. Auch hier ist eine Toleranzgrenze festzulegen in der die Fahrzeuggeschwindigkeit liegen muss. Diese Toleranzgrenze ist notwendig, da der Zug nicht exakt die zulässige Geschwindigkeit fährt. Durch die Automatische Fahr- und Bremssteuerung (AFB) wird die zulässige Geschwindigkeit nicht überschreiten, sie liegt vielmehr immer leicht darunter. In der Abbildung 5.4 wird ein Geschwindigkeitsverlauf dargestellt, der bei dem Untersuchungszug gemessen wurde.

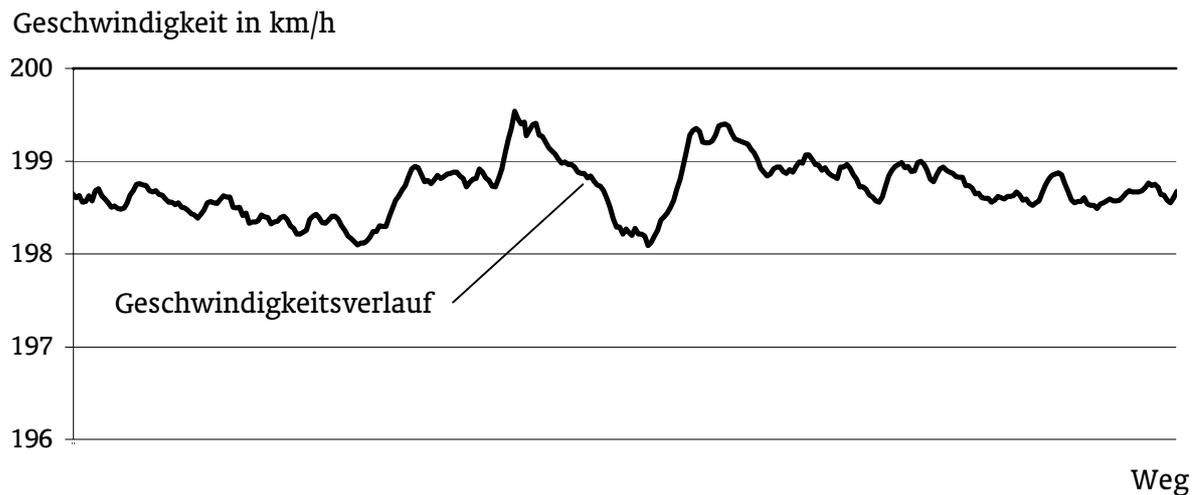


Abbildung 5.4: Bereich zur Massenbestimmung in der Beharrung bei der BfD

Dieses Beispiel zeigt, dass eine Geschwindigkeitsbandbreite etwas unter der zulässigen Geschwindigkeit festgelegt werden muss, um die Beharrung feststellen zu können. Für die programmtechnische Umsetzung dieser Aufgabe muss für die aktuelle Zugposition die zulässige Streckengeschwindigkeit ermittelt werden und mit der Fahrzeuggeschwindigkeit verglichen werden.

Der **Auslauf** des Zuges ist dadurch bestimmt, dass die Zugkraft ausgeschaltet ist und auch keine Bremskraft übertragen wird. Der nutzbare Bereich zur Bestimmung des Luftwiderstands im Auslauf ist durch eine untere Geschwindigkeitsgrenze definiert. Wie diese Grenze ermittelt wird, wird in Kapitel 4.2.3 beschrieben.

Bei der Feststellung der Beschleunigung, der Beharrung oder des Auslaufs wird entsprechend dem dazugehörigen Bestimmungsverfahren verzweigt.

5.3.2 Umsetzung der Massenbestimmung in der Beschleunigung

Bei der Massenbestimmung in der Beschleunigung bestimmt man gemäß der Gleichung 5-2 für jeden Messwert die Masse m_j . Ausgehend vom letzten Fahrplanhalt wird der Mittelwert für alle bisher bestimmten Massen gebildet (s. Gleichung 5-3) und der Wert der Massenbestimmung des letzten Abschnitts wird mit der Gewichtung w integriert. Dieser Mittelwert ergibt den aktuell bestimmten Wert für die Zugmasse m :

$$m_j = \frac{Z_i - c_2 \cdot v_i^2}{a_{trans,i} \cdot (1 + \rho_{rot}) + (c_r + c_{str}(x_i)) \cdot g} \quad \text{Gleichung 5-2}$$

mit: m_j	ermittelte Masse in kg
j	Index für Messwerte der Beschleunigung
i	Index der Messwerte
Z_i	Zugkraft in N
c_2	Luftwiderstandsfaktor in $N \cdot s^2/m^2$
v_i	Fahrzeuggeschwindigkeit in m/s
$a_{trans,i}$	translatorische Beschleunigung in m/s^2
ρ_{rot}	Massefaktor in –
c_r	Rollwiderstandsbeiwert in –
c_{str}	Streckenwiderstandsbeiwert in m/m
x_i	zurückgelegter Weg in m
g	Fallbeschleunigung ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$)

$$m = \frac{\sum_{j=1}^{N_{Beschleunigung}} m_j}{N_{Beschleunigung}} \cdot (1 - w) + m_{\text{Letzter Abschnitt}} \cdot w \quad \text{Gleichung 5-3}$$

mit: $N_{Beschleunigung}$	Anzahl der Messpunkte in der Beschleunigung
$m_{\text{Letzter Abschnitt}}$	Im letzten Abschnitt bestimmte Masse in kg
w	Gewichtung des Ergebnisses aus dem vorhergehenden Abschnitt

5.3.3 Umsetzung der Massenbestimmung in der Beharrung

In der Beharrung werden zunächst die gemessenen Zugkräfte entsprechend ihrer Geschwindigkeit in die dazugehörige Geschwindigkeitsklasse eingeteilt. In dieser Klasse wird dann mit einem Regressionsverfahren aus den bisher gemessenen Zugkräften Z_k in der Beharrung und mit den zugeordneten Steigungen s_k die Zugmasse bestimmt.

Die Gerade, die die Menge der Messpunkte $(s_1, Z_1), (s_2, Z_2), \dots, (s_N, Z_N)$ annähert entspricht der Gleichung 5-4.

$$W_{\text{Geschwindigkeitsklasse}}(s_k) = W_{\text{Lauf}} + m \cdot s_k \quad \text{Gleichung 5-4}$$

mit: $W_{\text{Geschwindigkeitsklasse}}$	Fahrwiderstand bei konstanter Geschwindigkeit in N
k	Index der Messpunkte in der Beharrung
s_k	Steigung (s. Gleichung 4-2) in m/s ²
W_{Lauf}	Laufwiderstand in N
m	Zugmasse in kg

Für diese Aufgabe hat sich das Regressionsverfahren "Methode der kleinsten Quadrate" als gut nutzbares Verfahren bewährt. Das Ausgleichsprinzip lautet hier:

$$\sum_{k=1}^{N_{\text{Beharrung}}} (W_{\text{Geschwindigkeitsklasse}}(s_k) - Z_k)^2 \rightarrow \text{Min!} \quad \text{Gleichung 5-5}$$

mit: $N_{\text{Beharrung}}$	Anzahl der Messpunkte bei Beharrung
Z_k	Zugkraft in N

Dabei bestimmt man die Masse m nach der folgenden Formel [Spiegel-90]:

$$m = \frac{N_{\text{Beharrung}} \cdot \sum_{k=1}^{N_{\text{Beharrung}}} (s_k \cdot Z_k) - \sum_{k=1}^{N_{\text{Beharrung}}} s_k \cdot \sum_{k=1}^{N_{\text{Beharrung}}} Z_k}{N_{\text{Beharrung}} \cdot \sum_{k=1}^{N_{\text{Beharrung}}} s_k^2 - \left(\sum_{k=1}^{N_{\text{Beharrung}}} s_k \right)^2} \quad \text{Gleichung 5-6}$$

Die so bestimmte Masse entspricht dabei der aktuell ermittelten Zugmasse.

5.3.4 Umsetzung der Luftwiderstandsbestimmung im Auslauf

Bei der Bestimmung des Luftwiderstands im Auslauf werden die wirkenden Beschleunigungs-, Strecken- und Rollwiderstände ermittelt und durch das Quadrat der Geschwindigkeit dividiert und ergeben so den Luftwiderstandsfaktor. Die Formulierung des Luftwiderstands wird durch die Angabe des Luftwiderstandsfaktors umgesetzt. Beschreibt ein Messwert den Auslaufzustand, so wird für diesen Messwert der Luftwiderstandsfaktor $c_{2,1}$ wie folgt bestimmt:

$$c_{2,l} = \frac{-m \cdot a_{trans,i} \cdot (1 + \rho_{rot}) - m \cdot g \cdot (c_{str}(x_i) + c_r)}{v_i^2} \quad \text{Gleichung 5-7}$$

mit: c_2	Luftwiderstandsfaktor in $N*s^2/m^2$
l	Index für Messwerte im Auslauf
m	Zugmasse in kg
$a_{trans,i}$	translatorische Beschleunigung in m/s^2
i	Index der Messwerte
ρ_{rot}	Massenfaktor in –
g	Fallbeschleunigung ($\approx 9,81 m/s^2$)
c_{str}	Streckenwiderstandsbeiwert in m/m
x_i	Zurückgelegter Weg in m
c_r	Rollwiderstandsbeiwert in –
v_i	Fahrzeuggeschwindigkeit in m/s

Durch die Mittelwertbildung aus den einzeln ermittelten $c_{2,l}$ -Faktoren erhält man den c_2 -Wert wie folgt:

$$c_2 = \frac{\sum_{l=1}^{N_{Auslauf}} c_{2,l}}{N_{Auslauf}} \quad \text{Gleichung 5-8}$$

mit: c_2	Luftwiderstandsfaktor in $N*s^2/m^2$
$N_{Auslauf}$	Anzahl der Messpunkte bei Beharrung

5.4 Ergebnisverarbeitung

Im Anschluss an die Bestimmung der fahrdynamischen Daten werden die aktuellen Ergebnisse der BfD angezeigt. In den Untersuchungen geschieht dies numerisch und grafisch. Weiterhin werden die Ergebnisse in der Protokolldatei der Fahrt notiert. Anschließend werden für die weitere Programmsteuerung Informationen generiert und das Programm entsprechend beeinflusst.

Ausgabe der ermittelten fahrdynamischen Daten

Die Darstellung des Luftwiderstandsfaktors wird zusammen mit dem Rollwiderstand

in dem Laufwiderstands-Geschwindigkeits-Diagramm umgesetzt. Dabei wird der jeweils aktuelle Luftwiderstandsfaktor und die Zugmasse numerisch angezeigt.

Fahrplanhalt

Wird von dem Messrechner eine neue Betriebsstellenabkürzung für den letzten Fahrplanhalt übergeben, so ist dies eine zuverlässige Feststellung eines Fahrplanhalts. Daraufhin wird das Programm an die Stelle verzweigen, bei der die Dateien für die nächste Fahrt aufbereitet werden.

6 Anwendung der BfD

In dem Kapitel 5 wurde das Verfahren der BfD beschrieben. Die Anwendung bei der ESF und die Übertragbarkeit auf andere Verkehre werden in diesem Kapitel näher erläutert.

6.1 Anwendung bei der ESF

Die ESF nutzt durch eine intelligente Fahrweise das Energieeinsparpotential. Für die Ermittlung der Fahrweise wird mittels Zugfahrtsimulation die Fahrt prognostiziert. Dabei ist es wichtig, die Eingangsdaten in guter Qualität zu formulieren, um dadurch eine genaue Vorhersage der Zugfahrt treffen zu können. Die fahrdynamischen Eigenschaften des Zuges stellen dabei einen wesentlichen Teil der Eingangsdaten dar, die durch die BfD für die ESF bestimmt werden können. Die ESF gleicht derzeit ungenaue Fahrzeugdaten durch einen Zeitabschlag aus, der einen Teil der Fahrzeitreserve zur Sicherung der Pünktlichkeit verwendet. Bei ungenauen Fahrzeugdaten kann durch die Verwendung der BfD dieser Zeitabschlag kleiner gewählt werden und somit mehr Energie eingespart werden.

Die ESF ist von der TLC GmbH mit dem System "Elektronischer Buchfahrplan und Langsamfahrstellen" (EBuLa) verknüpft worden. Dabei wurde das ESF/EBuLa - System für den Einsatz auf den ICE-Triebzügen entwickelt. [Müller-00, Sanftleben-99b] Durch die offene Architektur der Software wurde es möglich im Rahmen der Untersuchungen die BfD mit ESF/EBuLa zu verbinden und Fahrten mit der ESF durchzuführen. Dabei konnte die ESF auch die von der BfD bestimmten fahrdynamischen Daten verarbeiten. [Miller-00]

Da sich die fahrdynamischen Daten der BfD von denen aus der EBuLa Datenversorgung nicht signifikant unterscheiden, konnte bei den Fahrten auf dem Untersuchungszug mit der ESF in Kombination mit der BfD kein energetischer Vorteil durch die BfD ermittelt werden.

Anhand der durchgeführten Fahrten mit ESF kann jedoch aufgezeigt werden, wie viel Energie durch die BfD eingespart werden würde, wenn der Zeitabschlag zur Sicherung der Pünktlichkeit reduziert werden kann. Für den Streckenabschnitt zwischen Lüneburg und Bad Bevensen gilt das folgende Beispiel. Zur Veranschaulichung des Einspareffektes werden die Energieverbräuche des Untersuchungszugs bei ESF in Abhängigkeit der Fahrzeitreserve in der Abbildung 6.1 dargestellt. Gezeigt werden zwei Verläufe. Der eine mit 30 Sekunden und der andere mit 15 Sekunden Zeitabschlag von der Fahrzeitreserve.

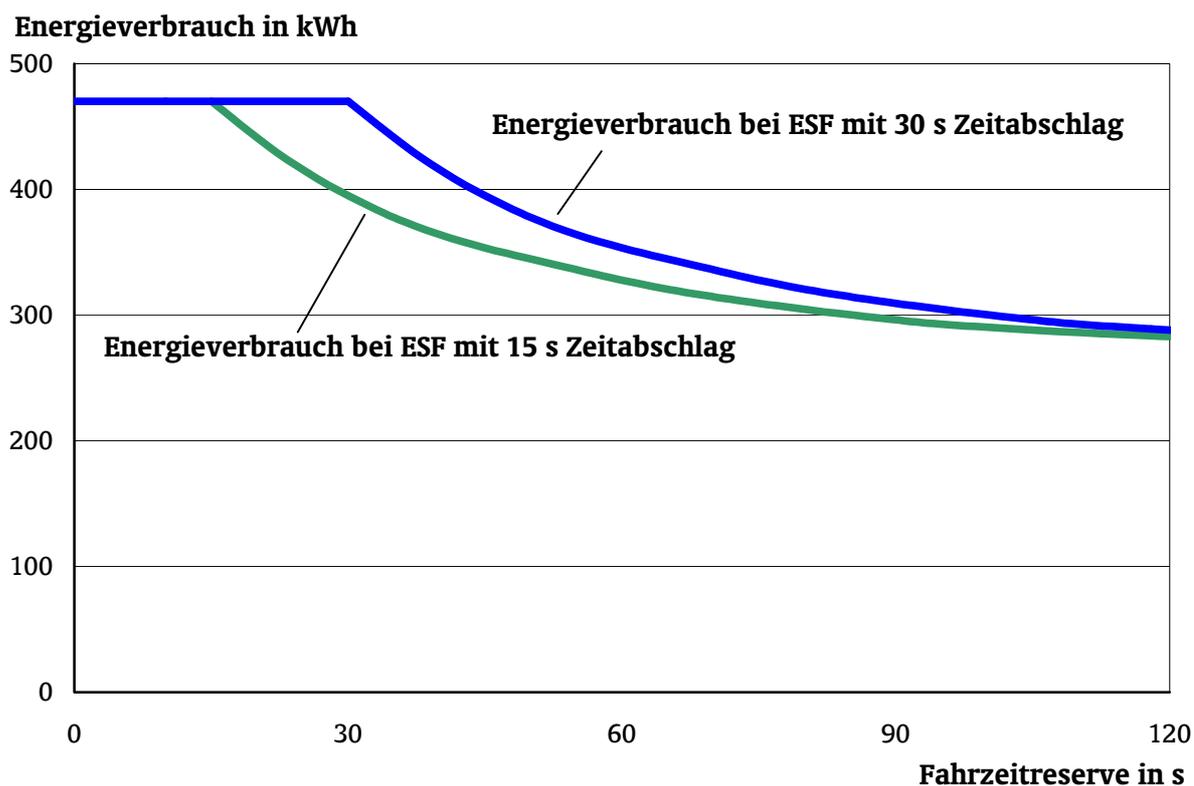


Abbildung 6.1: Energieverbrauch in Abhängigkeit der Fahrzeitreserve

Die Betrachtung der beiden Kurven lässt erkennen, dass durch die Reduzierung des Zeitabschlags der Energieverbrauch geringer wird. Bei der folgenden Abbildung 6.2 ist dieser Energievorteil als absoluter Wert aufgetragen. Die Charakteristik zeigt, dass besonders bei Fahrten mit wenig Fahrzeitreserve entscheidende Energieeinsparpotentiale nicht genutzt werden.

Energievorteil in kWh

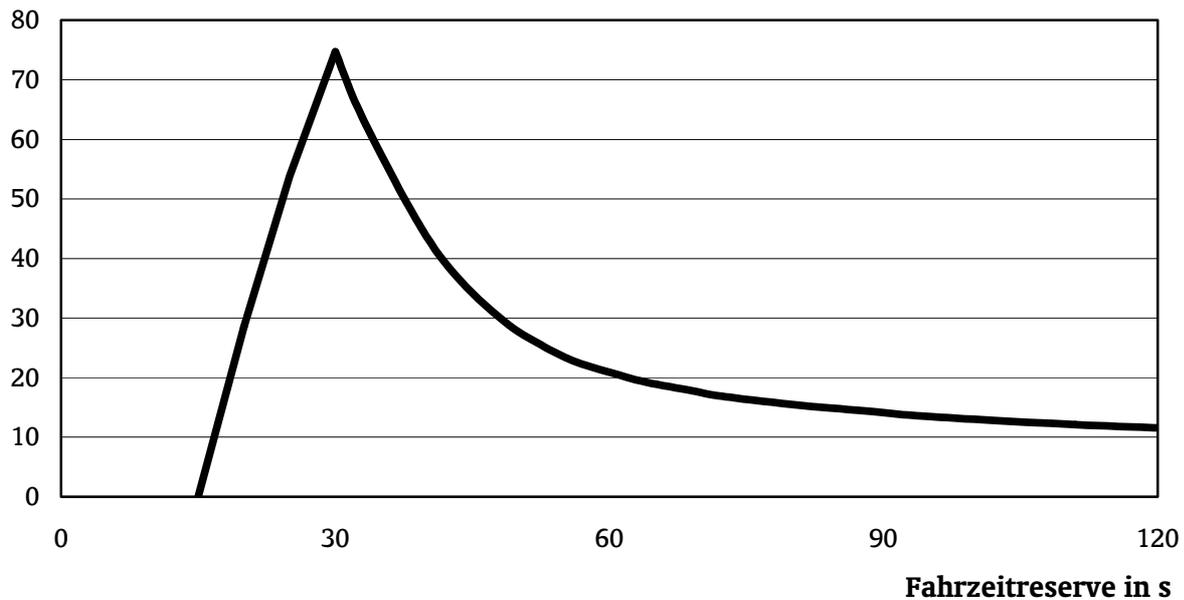


Abbildung 6.2: Energievorteil durch geringeren Zeitabschlag

Diese Darstellung des Energievorteils stellt nur eine theoretische Betrachtung für den Untersuchungszug dar. Für andere Verkehre bilden diese Betrachtungen die Entscheidungsgrundlage, ob die BfD einzusetzen ist oder ob auf sie verzichtet wird.

6.2 Übertragbarkeit der BfD

Die Untersuchungen zur BfD haben auf dem Triebfahrzeug der Baureihe 101 im leistungsfähigen InterRegio-Verkehr gezeigt, dass es möglich ist, Masse und Luftwiderstand während der Fahrt auf dem Fahrzeug zu bestimmen. Der InterRegio mit einer Zugmasse von knapp 500 t und einer Antriebsleistung von 6,4 MW hat aufgrund des Verhältnisses zwischen Masse und Leistung ein sehr hohes Steigungsvermögen.

Mit den Untersuchungen zur BfD wird deutlich, dass dieses Verfahren auf Fernverkehrszügen eingesetzt werden und vernünftige Werte für die ESF liefern kann. Weitere mögliche Einsatzbereiche für die ESF und damit auch für die BfD sollen mittelfristig auch der Nah- und Güterverkehr werden.

Die Übertragbarkeit der BfD vom Fernverkehr auf den Nahverkehr ist nahe liegender als die Anwendung der BfD beim Güterverkehr, da die Nahverkehrszüge ein ähnliches Steigungsvermögen wie beim InterRegio besitzen. Auch sind sie von der Oberfläche und der Form, die den Luftwiderstand mit beeinflussen, dem Untersuchungszug ähnlich. Güterzüge sind als Zuggattung wesentlich stärker vom InterRegio verschieden. Sie wiegen deutlich mehr, die Fahrzeuggeschwindigkeit ist gering, die Wagengeometrien erzeugen hohe Luftwiderstandsbeiwerte und auch die Fahrweise unterscheidet sich von der des Personenverkehrs.

Um die Übertragbarkeit der BfD auf den Güterverkehr zu bewerten wurden noch zusätzliche Messungen mit der Güterlokomotive der Baureihe 152 unternommen.

6.2.1 Güterzug mit der Lokomotive der Baureihe 152

Mit den Messungen zur BfD mit der Lokomotive der Baureihe 152 wurden insgesamt 16 Zugfahrten zwischen Nürnberg und München erfasst. Dabei handelt es sich um die Liniengüterzüge mit den Zugnummern 51717 (von Nürnberg nach München) und 51428 (von München nach Nürnberg). Der Streckenverlauf ist in der Abbildung 6.4 dargestellt. Das Höhenprofil (s. Abbildung 6.3) zeigt ausgeprägte Steigungsverläufe mit Steigungen bis zu 5 Promille. Die zulässige Geschwindigkeit beträgt fast durchgehend 90 km/h mit Ausnahmen in Nürnberg, Ingolstadt und München.

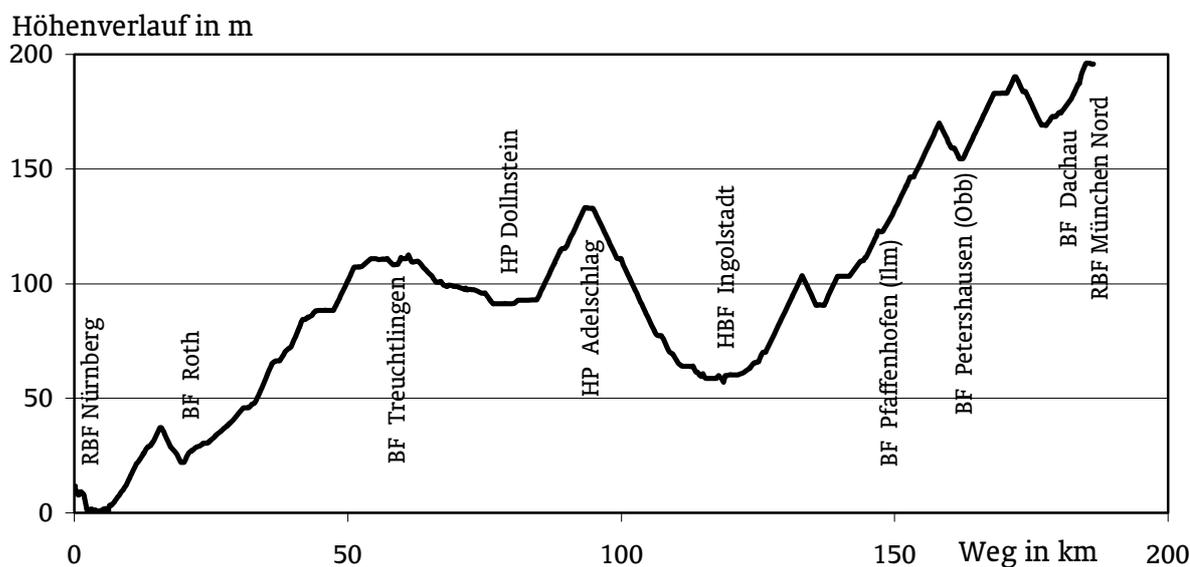


Abbildung 6.3: Höhenverlauf der Messstrecke Nürnberg - München

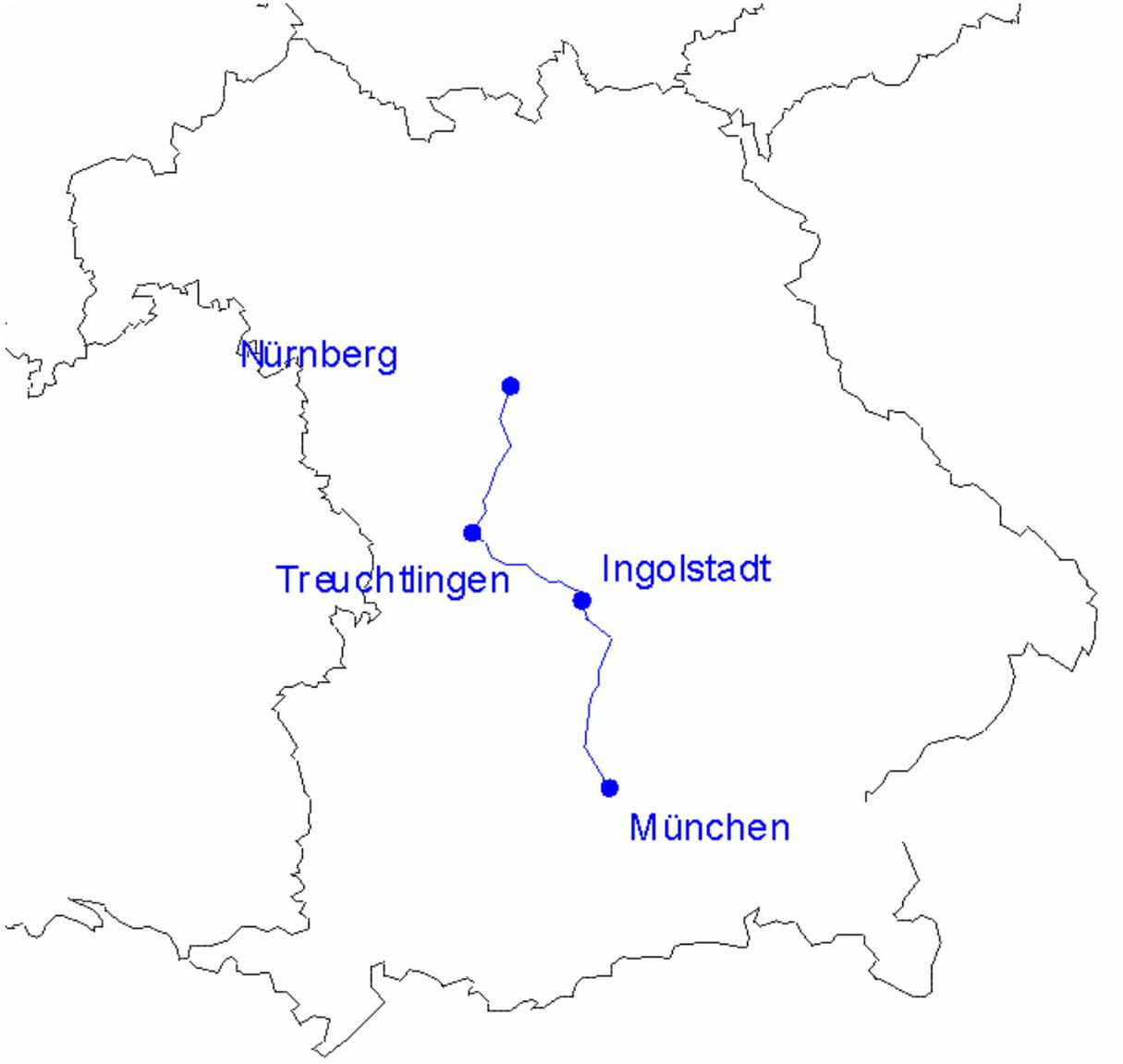


Abbildung 6.4: Messstrecke Nürnberg - München

Mit den beiden Zügen werden diverse Güter aus dem Wagenladungsverkehr mit den dazugehörigen unterschiedlichen Wagen transportiert. Das Spektrum der eingesetzten Wagen beinhaltet unter anderem Schiebewand-, Schüttgut-, Flach-, Tank-, Auto- und Containertragwagen. Die folgende Abbildung 6.5 zeigt einen Güterzug der zwischen Nürnberg und München messtechnisch begleitet wurde. Darauf kann man die "bunte" Mischung des Zuges erkennen.



Abbildung 6.5: Güterzug 51717

Die Lokomotive der Baureihe 152 ist von der Firma Siemens gebaut worden. Sie ist als vierachsige Lok mit 6.4 MW Leistung ausgestattet und entspricht mit ihrer Technik den heutigen modernen Fahrzeugen. Auch wenn die Lok der Baureihe 101 von der Firma Adtranz gebaut wurde, der Konkurrenz von Siemens, ist die Technik auf beiden Lokomotiven vergleichbar. Für die BfD ist es auf der Baureihe 152 auch möglich, aus der Fahrzeugelektronik das Zug-/Bremskraftsignal zu erhalten.

Die eingesetzte Messtechnik wurde in Anlehnung an die Messungen auf der Baureihe 101 realisiert. Die Zug-/Bremskraft wurde aus der Fahrzeugelektronik übernommen, die Geschwindigkeit wird jedoch aus der Wegmessung mit der Zeit generiert. Da zur Wegmessung die Drehungen einer nicht angetriebenen Achse mit einem Wegimpulsgeber gemessen wurden, ist die Bestimmung von Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung von hoher Qualität.

Für die Bewertung der Einsetzbarkeit wurden die Fahrten zunächst getrennt nach den Fahrzuständen Beschleunigung, Beharrung und Auslauf betrachtet. Die Ergebnisse der

Messungen mit der Lokomotive der Baureihe 152 sind dabei mit den gleichen Algorithmen gewonnen worden, wie sie auf der Baureihe 101 verwendet wurden, jedoch hat man die in Kapitel 4 beschriebenen Verfahrensgrenzen für die einzelnen Bestimmungsverfahren angepasst.

Beschleunigung

Bei den Messungen in der Beschleunigung wurde für jeden Zug die Masse ermittelt und mit der Masse des Bremszettels verglichen. Für die 16 Fahrten sind die Ergebnisse in Abbildung 6.6 dargestellt.

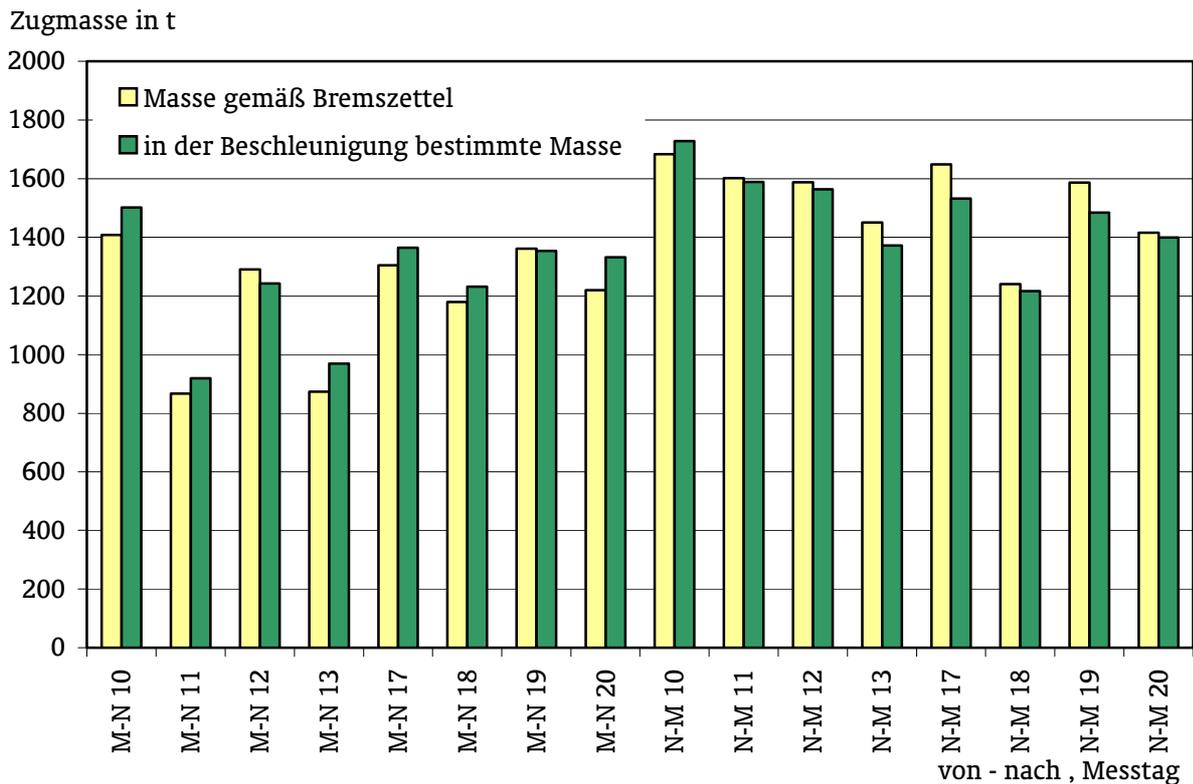


Abbildung 6.6: Ergebnisse aus der Massenbestimmung in der Beschleunigung

Bei der Betrachtung der Ergebnisse kann festgestellt werden, dass die Massenbestimmung nur mit Abweichungen zwischen -7 und +11 Prozent vom Bremszettelgewicht realisiert werden konnten. Dabei entspricht die größte Abweichung mit 11 Prozent einer Masse von 96 t. Die Standardabweichung bei den prozentual ausgedrückten Fehlern beträgt 5,3 Prozent. Diese Ergebnisse sind qualitativ schlechter als die der Untersuchungen auf der Baureihe 101. Die Abweichungen der bestimmten Massen liegen teilweise über der in Kapitel 3.1

formulierten maximalen Abweichung von $\pm 5\%$ und sind etwa doppelt so hoch. Dies ist jedoch kein Ausschlusskriterium für den Einsatz der BfD bei der ESF, allerdings müssen die Zeitreserven entsprechend erhöht werden. Weiterhin ist die Genauigkeit der Bremszettel sicherlich auch nicht absolut, so dass die Abweichungen zum Teil auch auf diese Ungenauigkeiten basieren.

Beharrung

Die Fahrweise eines Güterzugs ist durch lange Abschnitte mit Beharrungsfahrt gekennzeichnet. Die Ergebnisse der Massenbestimmung werden in der Abbildung 6.7 dargestellt.

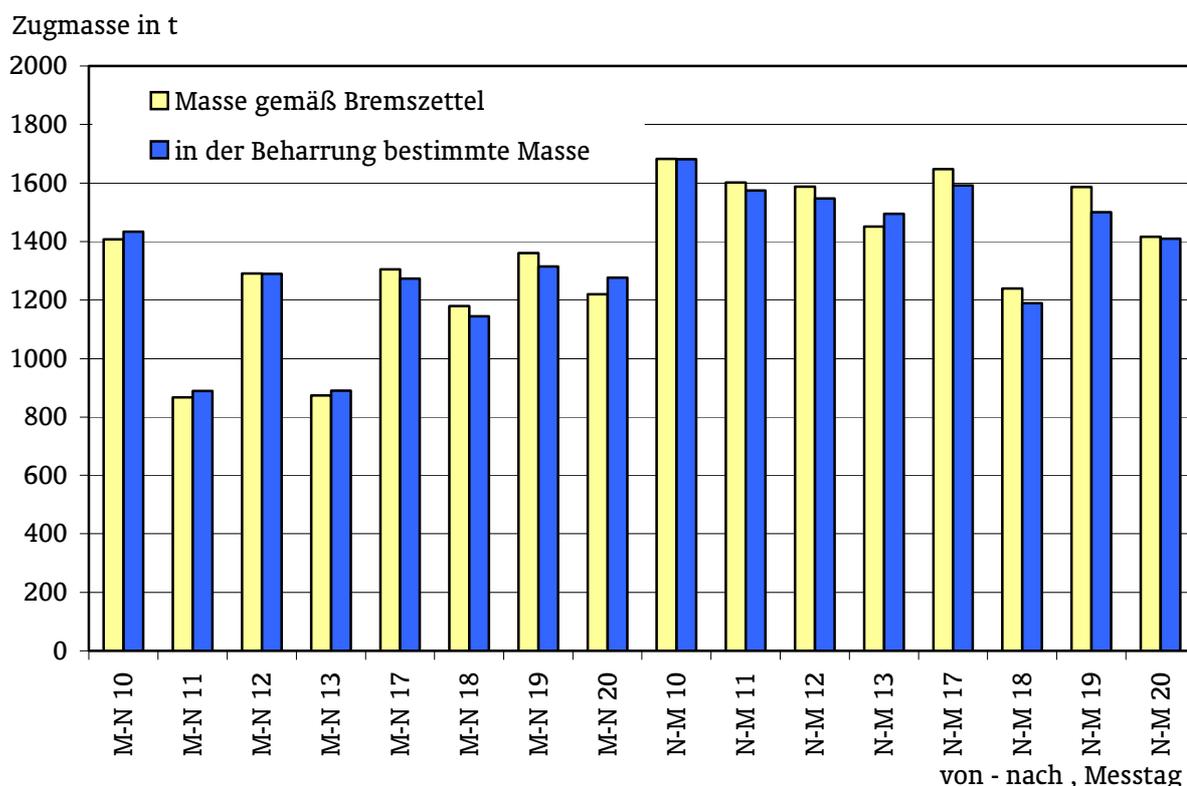


Abbildung 6.7: Ergebnisse aus der Massenbestimmung in der Beharrung

Die Ergebnisse zur Bestimmung der Masse in der Beharrung weisen deutlich bessere Werte auf als sie in der Beschleunigungsphase erreicht wurden. Die Abweichung der ermittelten Massen von den in den Bremszetteln vermerkten Massen liegt im Bereich von $\pm 5\%$ und entspricht somit den Anforderungen, die in Kapitel 3.1 aus dem ICE-Verkehr abgeleitet wurden. Die gute Qualität liegt sicherlich auch in den ausgeprägten Steigungen der Strecke begründet.

Auslauf

Die Bewertung zum Luftwiderstand im Auslauf war bei den begleiteten Fahrten nicht möglich, da die Fahrweise der Lokführer keine ausreichend langen Ausläufe beinhalteten. Durch den Einsatz der ESF würden längere Ausläufe auftreten, die dann zur Bestimmung des Luftwiderstands genutzt werden können.

Auch wenn die Funktionalität der BfD nicht vollständig untersucht werden konnte, zeigen die Ergebnisse, dass der Einsatz der BfD auch im Güterverkehr gute Qualitäten erreichen kann.

6.2.2 Allgemeine Betrachtungen

Aufgrund des hohen Energieeinsparpotentials der ESF ist es von Interesse dieses Verfahren flächendeckend einzusetzen. Ein Problem dabei sind jedoch die fehlenden oder nicht hinreichenden Fahrzeuginformation bei der Versorgung über die Fahrzeugdatenbank. Zur Behebung dieses Problems soll die BfD in die ESF integriert werden, damit die notwendigen Daten bei Bedarf auf dem Fahrzeug generiert werden können. Bei den Untersuchungen zur BfD wurde das Triebfahrzeug der Baureihe 101 betrachtet und die Funktionstüchtigkeit aufgezeigt.

In wie weit die BfD allgemeingültig eingesetzt werden kann lässt sich im Rahmen der Untersuchungen nur abschätzen, da jedes Fahrzeug und die unterschiedlichen Verkehre individuell sind und so auch unterschiedliche Eigenschaften besitzen.

Der Einsatz der BfD ist prinzipiell auf jedem Schienenfahrzeug möglich. Jedoch gibt es zwei Einschränkungen für den Einsatz. Zunächst benötigt die BfD die Ist-Daten: Zeit, Geschwindigkeit, Zug-/Bremskraft, Streckenneigung, -radius und Geschwindigkeit. Diese Eingangsgrößen sind notwendig und müssen über geeignete Schnittstellen dem PC, auf dem die BfD eingesetzt werden soll, zugänglich gemacht werden. Desweiteren können die Eigenschaften der Fahrzeuge, Einsatzstrecken und Umweltbedingungen Einschränkungsgründe hervorrufen.

Bei den Umweltbedingungen tritt der Wind durch seine hohe Einflussintensität stark hervor. Hier sei auf den Hindenburgdamm, der Sylt mit dem Festland verbindet, verwiesen. Die Windverhältnisse im Nordseebereich stellen für die BfD einen sehr großen Störfaktor dar und lassen den Einsatz bei diesem speziellen Verkehr bedenklich erscheinen. Extreme Streckenverhältnisse mit sehr starken Steigungen

oder sehr schlechten Oberbaubeschaffenheiten können unter Umständen ebenfalls eine unzulängliche Qualität der BfD verursachen. Auch exotische Fahrzeuge wie zum Beispiel Gleisbaumaschinen, Schneeräumfahrzeuge etc. erscheinen ungeeignet für den Einsatz der BfD.

Neben den aufgeführten Beispielen gibt es sicherlich noch andere Einzelsituationen, bei denen die Funktionalität der BfD nicht sicher ist. Insgesamt wird die BfD, bis auf vereinzelte Ausnahmen, flächendeckend einsetzbar sein.

Für den Einsatz der BfD müssen die jeweiligen Gegebenheiten auf eventuelle Störfaktoren untersucht und bewertet werden. Bei eventuellen örtlichen Problembereichen, können diese in den Streckendaten verzeichnet und somit von der Bestimmung der fahrdynamischen Daten ausgeschlossen werden. So ist der Einsatz der BfD insgesamt möglich.

Bei den Ist-Daten können die störenden Einflüsse einerseits in den Datengrundlagen und andererseits in den zu messenden Größen liegen.

Der Einfluß der Datengrundlage wird bei den Streckendaten deutlich, die die Eigenschaften der Strecke formulieren. Liegen hier Ungenauigkeiten oder Fehler vor, so wirken sich diese auf die Ergebnisse der BfD aus. Es ist daher eine ausreichende Qualität dieser Daten sicherzustellen.

Auch bei den zu messenden Größen ist ebenfalls eine ausreichende Genauigkeit gefordert. Hier ist insbesondere eine hohe Qualität der Geschwindigkeitserfassung von Bedeutung, da aus ihrer Integration der gefahrene Weg bestimmt wird und mit der Ortung die Streckendaten der aktuellen Position zugeordnet werden. Die ESF fordert eine Ortungsgenauigkeit von maximal ± 200 m Abweichung. [TLC-99] Die Anforderung der BfD an die Ortung ist hingegen nicht so hoch.

Die Bestimmung der Beschleunigung durch das Differenzieren der Geschwindigkeit ist prinzipiell einfacher, als die Integration zur Wegbestimmung und stellt daher keine nennenswerte Probleme dar. Wird jedoch die Ortung von dem Geschwindigkeitssignal entkoppelt, muss auch auf die Qualität der Beschleunigungsmessung geachtet werden.

Die Messung der exakten Zugkraft wird bei der Bestimmung der Zugmasse in der Beschleunigung und in der Beharrung benötigt. Fehlerhafte Messwerte wirken sich direkt auf die BfD aus.

Wird auf die Bestimmung der Zugmasse verzichtet, weil sie bereits ausreichend genau beschrieben ist, so wird das exakte Zug- Bremskraftsignal nicht benötigt. Bei der Bestimmung des Luftwiderstands im Auslauf ist es nur notwendig, die Rollphase zu detektieren, was bei der Untersuchung mit dem Zug-/Bremskraftsignal realisiert wurde. Denkbar ist für die Feststellung des Auslaufs auch ein einfaches digitales Signal, das angibt, ob Zug- oder Bremskraft übertragen wird oder nicht.

Die erreichte Qualität der BfD auf dem Untersuchungszug ist so gut, dass sie den Anforderungen der ESF eindeutig genügt. Sollte die Qualität in anderen Verkehren sich nicht so gut darstellen, wie es bei der Untersuchung auf dem InterRegio der Fall ist, kann sie dennoch den Anforderungen der ESF durchaus entsprechen. Insgesamt stellt sich die Übertragbarkeit der BfD positiv dar. Man kann davon ausgehen, dass es nur wenige Bereiche gibt, bei denen das Verfahren nicht eingesetzt werden kann.

Fraglich ist jedoch der ökonomische Nutzen bei Fahrzeugen ohne leicht zugänglichem Zugkraftsignal, da in diesen Fällen unter Umständen zusätzliche Sensorik auf dem Fahrzeug installiert werden muss.

7 Fazit und Ausblick

Mit dem Verfahren der BfD ist die Grundlage dafür geschaffen, Zugmasse und Luftwiderstand im planmäßigen Betrieb auf einem Schienenfahrzeug zu bestimmen. Dies ist auf Fahrzeugen von Interesse, bei denen zu Beginn einer Zugfahrt diese Informationen nicht vorhanden sind und eine andere DV-Anwendung auf diese Daten angewiesen ist. Durch die Einbindung der BfD in die ESF ist es möglich, großflächig bei vielen Schienenverkehren mit einer intelligenten Fahrweise Energie einzusparen.

Die Entscheidung für die betriebliche Einführung eines neuen Verfahrens ist bei aller Funktionalität letztlich immer von seiner Wirtschaftlichkeit abhängig. Der Einsatz der BfD für sich alleine betrachtet macht wirtschaftlich keinen Sinn. Erst die Verknüpfung mit anderen Systemen, die auf die fahrdynamischen Daten der BfD angewiesen sind, lässt eine wirtschaftlich interessante Komponente für das Gesamtsystem der Eisenbahn entstehen. Die ESF ist das Verfahren, bei der die BfD bei den Untersuchungen bereits zur Anwendung gekommen ist. Daher soll der Nutzen der BfD im Zusammenhang mit der ESF veranschaulicht werden.

Die Deutsche Bahn benötigt für die Durchführung ihres Betriebs 10 000 GWh Strom und 700 Mio. Liter Dieselkraftstoff pro Jahr. Das entspricht dem Verbrauch von 5,6 Mio. Haushalten und kostet die Bahn rund 2 Milliarden DM Jahr für Jahr. Die ESF ist in der Lage, einen nennenswerten Anteil dieser Energie einzusparen unter der Voraussetzung, dass sie mit den notwendigen Daten versorgt werden kann. Die möglichen Einsparungen durch die ESF werden mit jährlich bis zu 100 Millionen DM bei der Deutschen Bahn beziffert. [DB-98]

Die ESF kann derzeit nicht zu 100 Prozent bei den Verkehren der Bahn eingesetzt werden, da teilweise einige Grundlagen für die Ermittlung der ESF fehlen. Die BfD stellt ein Mittel dar, um fehlende Grundlagen zu erzeugen. Durch den Einsatz der BfD kann somit die Verbreitung der ESF auf weitere Verkehre ausgedehnt werden und entsprechend kann das vorhandene Energieeinsparpotential besser genutzt werden.

Neben dem Nutzen für die ESF wird die BfD mit der Bestimmung der fahrdynamischen Daten die Grundlage für Weiterentwicklungen auf Schienenfahrzeugen bilden, die erst durch das Vorhandensein dieser Daten konzeptioniert werden. Potentielle Anwendungen unter anderen in den Bereichen Kundeninformation, Energie-

management, Ladungskontrolle sind vorstellbar. Wenn in Zukunft bei der Bahn die Infrastruktur für die mobile Datenkommunikation geschaffen ist, dann können die aktuellen fahrdynamischen Daten vom Fahrzeug auf stationäre Systeme übertragen werden und dort genutzt werden. Dies kann dann insbesondere bei den Verfahren, die Fahrzeitrechnungen zur Betriebsführung und -leitung anwenden, von Interesse sein.

8 Zusammenfassung

Die Telematik nimmt eine immer größer werdende Bedeutung bei der Bahn ein. Moderne Ortungs-, Kommunikations-, Informations- und Datenverarbeitungssysteme ermöglichen es, die Verkehrsabläufe effektiver zu gestalten. Die Bestimmung fahrdynamischer Daten (BfD) kann mit ihren Algorithmen für die Anwendungen der Telematik die fahrdynamischen Daten auf dem Fahrzeug im planmäßigen Betrieb aktuell bestimmen und zur Verfügung stellen. Diese Informationen können dann von Verfahren wie dem der Energiesparenden Fahrweise (ESF) genutzt werden, um den Verkehr attraktiver, kostengünstiger und zuverlässiger zu gestalten.

Die Entwicklungen zur BfD basieren auf der Analyse der fahrdynamischen Grundlagen und der Betrachtung planmäßig durchgeführter Fahrten. Bei den planmäßig durchgeführten Zugfahrten können die immer wiederkehrenden Fahrzustände der Beschleunigung, der Beharrung und des Auslaufs identifiziert werden. Diese charakteristischen Fahrzustände stellen mit ihren prägnanten Merkmalen die Möglichkeit zur Bestimmung der fahrdynamischen Daten.

In der Beschleunigung kann der Beschleunigungswiderstand am effektivsten bestimmt werden, woraus sich dann die Zugmasse ableiten lässt. In der Beharrung ist bei Vernachlässigung eventueller Störungen der Laufwiderstand konstant und der Steigungswiderstand kann in Abhängigkeit der Steigung formuliert werden. Mit dieser Zuordnung kann ebenfalls die Zugmasse bestimmt werden. Der Auslauf ist durch die abgeschaltete Zug- und Bremskraft charakterisiert. Diese Tatsache bedeutet, dass die Summe der Fahrwiderstände sich aufhebt und der Laufwiderstand ohne die Ungenauigkeit bei der Zugkraftmessung ermittelt werden kann. Aus dem Laufwiderstand lässt sich dann der Luftwiderstand ableiten.

Praktische Untersuchungen mit einem Triebfahrzeug der Baureihe 101 und einem Fernverkehrszug zeigen auf, dass für die BfD die Fahrzustände der Beschleunigung, der Beharrung und des Auslaufs durch festgelegte Grenzen bestimmt werden müssen, damit die Qualität der Ergebnisse ein möglichst hohes Niveau erreicht. Durch die Aneinanderreihung einiger weniger Bestimmungsphasen wird im Verlauf einer Zugfahrt die mit der BfD erreichbare Qualität bei der Bestimmung der fahrdynamischen Daten auch tatsächlich erreicht.

Die Ergebnisse der BfD sind hinreichend genau, so dass sie in der ESF genutzt werden können. Für die ESF bedeutet dies, dass sie nicht mehr auf die Angaben zur Masse und zum Laufwiderstand aus der fahrdynamischen Datenbank angewiesen ist.

Im Rahmen weiterer Messungen mit einem Triebfahrzeug der Baureihe 152 wurden die Erkenntnisse auch bei Güterzügen zur Anwendung gebracht. Dabei wurden die Ergebnisse bestätigt und zeigen, dass die BfD ein Verfahren darstellt, das nicht nur für einige wenige Verkehre geschaffen ist, sondern großflächig eingesetzt werden kann und zusammen mit der ESF bisher noch nicht nutzbare Energieeinsparpotentiale zugänglich macht.

9 Literaturverzeichnis

- [Baur-99] Baur, K. G.: Baureihe 101. GeraMond Verlag, München 1999
- [Bitterberg-99] Bitterberg, U.: Wissensbasiertes Verfahren zum Neigen von Wagenkästen bei Schienenfahrzeugen. Dissertation (1999), Universität Hannover
- [BMVBW-00] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Verkehrsbericht 2000. Adler & Schmidt, Berlin 2000
- [Breu-92] Breu, S.; Buszinsky, B.: Rechnerunterstütztes Arbeiten in der Zentralen Betriebsleitung (RZBL). Die Deutsche Bahn 1992 Nr.7, S. 758ff
- [Buszinsky-00] Buszinsky, B.: Das Reisendeninformationssystem. BahnPraxis (2000) Nr.7
- [DB-83] Bundesbahn-Sozialamt, Betriebliches Bildungswesen: Arbeitsmappe Grundlagen der Zugbeförderung Teil 2., Arbeitsmappe A4H154 5c-70 Kar VII 83 K 101, Stand Juli 1983
- [DB-92] Bundesbahn Zentralamt München: Laufwiderstandsformeln. Version 14.08.1992, Dezernat 23, München 1992
- [DB-93] Deutsche Bahn: Bahnanlagen entwerfen – Allgemeine Entwurfsgrundlagen – DS 800 01. (gültig vom 01.03.1993), S. 2, 39-42
- [DB-98] Deutsche Bahn: Energiesparende Fahrweise. Informationsvideo der Deutschen Bahn AG 1998
- [Feldmann-01] Feldmann, H.; Pöpper, C.: Auswertung der fahrdynamischen Messungen auf der Lokomotive 101 038. Institut für Mechanik, Universität Hannover, Oberstufenlabor, 2001
- [Frank-89] Frank, A.: Eisenbahn-Maschinenbau. Vorlesungsnachschrift, Hannover, 1889-1890

- [Gackenholtz-74] Gackenholtz, L.: Der Luftwiderstand der Züge im Tunnel. ZEV Glasers Analen 98 (1974) Nr.3, S.79-84
- [Heinisch] Heinisch, R.: Telematik- technologische Intelligenz im Dienst von Bahn und Mobilität. Deutsche Bahn – Forschung und Technologie
- [Huber-00] Huber, K.: Elektronischer Buchfahrplan und La bei der Deutschen Bahn. Elektrische Bahnen 98 (2000) Nr.4, S. 115-124
- [Keller-01] Keller, H.: Telematikanwendungen im Verkehr. Internationales Verkehrswesen 53 (2001) Nr.3
- [Keßler-94] Keßler, K.-H.; Junker, K.: Grundsätze der Fahrdynamik. Eisenbahn Ingenieur Kalender S. 245–264, Tetzlaff Verlag GmbH, Hamburg 1994
- [Klaßen] Klaßen J.; Römer U.: www.WetterOnline.de . Meteorologische Dienstleistungen GmbH, Bonn
- [Mehlhorn-95] Mehlhorn, G.: Der Ingenieurbau, Grundwissen. Ernst & Sohn, Berlin 1995
- [Miller-00] Miller, T.: Energiesparende Fahrweise / ESF Lok Prototyp. TLC GmbH Frankfurt, nicht veröffentlicht, 2000
- [Müller-00] Müller, W.: Energiesparende Fahrweise für die ICE-Familie. TLC GmbH Frankfurt, nicht veröffentlicht, 2000
- [Nordmann-97] Nordmann, J.: Baureihe 101 - erste Serienlokomotive einer neuen Generation von Schienenfahrzeugen. ZEV DET Glasers Annalen 121 (1997) Nr. 2/3, S.159-172
- [ORE-91] ORE Bericht C 179: Aerodynamik im Eisenbahnbereich. Utrecht 1991
- [Peters-90] Peters, J.-L.: Bestimmung des aerodynamischen Widerstands des ICE/V im Tunnel und auf freier Strecke durch Auslaufversuche. Eisenbahntechnische Rundschau 39 (1990), Nr. 9, S. 559-564

- [Popp-01] Popp, K.; Voß, G.; Scholz, C.: Messtechnik und Datenaufbreitung. Institut für Mechanik der Universität Hannover, Bericht 2001-03, nicht veröffentlicht 2001
- [Reaber-78] Raeber, V.: Der Aufprall von Güterwagen. Schienen der Welt, 1978 Nr. 3, S. 178-207
- [Sanftleben-99a] Sanftleben, D.: „Konzeption der Zugfahrtsimulation für den Einsatz im Onlinebetrieb“, Hannover, Univ., Diss, 1999
- [Sanftleben-99b] Sanftleben, D; Weber, K.: Die Anwendung der energiesparenden Fahrweise im ICE-Betrieb. VDI Berichte Nr.1488 (1999), S. 233-248
- [Schwier-81] Schwieger, E.: Rekursive Digitalfilter für Echtzeitanwendungen. Technisches Messen 48 (1981) Nr. 4
- [Spiegel-90] Spiegel, M. R.: Statistik / Schaum's Überblicke und Aufgaben. McGraw-Hill, Hamburg 1990
- [Streit-97] Streit, Kl.-D.; Partzsch, L.: Telematik – Schlüsselfaktor für die moderne Bahn. Eisenbahntechnische Rundschau 46 (1997) Nr. 7/8, S.459ff.
- [TLC-99] TLC GmbH: Spezifikation des Projektes Energiesparende Fahrweise ESF für die ICE-Familie. Version 1.1 (1999), Frankfurt am Main
- [Vollmer-89] Vollmer, G.: Luftwiderstand von Güterwagen. Dissertation (1989), Fachbereich Wasser u. Verkehr der TH Darmstadt
- [Voß-01] Voß, G. ;Kratowille, R.: Cargo on Rail 2000 plus. ZEV - Glasers Annalen 125 (2001) Nr. 2, S. 49-57
- [Voß-87] Voß, G.; Berger, M.: Formeln für den Bewegungswiderstand zur Simulation von Zugfahrten auf realen Strecken. Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen der Universität Hannover (1987) Bericht 6-87, nicht veröffentlicht

- [Voß-98a] Voß, G.; Sanftleben, D.: Rechnergestützte energiesparende Fahrweise im Regelbetrieb. Eisenbahntechnische Rundschau 47 (1998) Nr.1, S. 25-31
- [Voß-98b] Voß, G.; Füser, S.: "Bestimmung fahrdynamische Daten", Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen der Universität Hannover, Bericht 4-98, nicht veröffentlicht, 1998.
- [VoßH-98] Voß, H.: Die Luftfederung, eine regelbare Fahrzeugfederung - Luftfedern für Straßen- und Schienenfahrzeuge. Vortragsunterlagen ContiTech, Hannover 1998

Anhang A: Abkürzungen aus der DS100

AA	Hamburg- Altona
ADF	Hamburg Dammtor
AH	Hamburg Hbf
AHAR	Hamburg-Harburg
ALBG	Lüneburg
ABVS	Bad Bevesen
HU	Uelzen
HC	Celle
HH	Hannover Hbf
HHML	Hameln
HELZ	Elze
HALF	Alfeld
HK	Kreiensen
HN	Northeim (Han.)
HG	Göttingen
FKW	Kassel-Wilhelmshöhe
FWAB	Wabern (Bz. Kassel)
FTS	Treysa
FMBG	Marburg (Lahn)
FG	Gießen
FFG	Friedberg (Hess.)
FF	Frankfurt (Main) Hbf

Anhang B: Allgemeine Abkürzungen

AFB	Automatische Fahr- und Bremssteuerung
ASG	Antriebssteuergerät
DBAG	Deutsche Bahn AG
EBuLa	Elektronischer Buchfahrplan und La (La: Zusammenstellung der vorübergehenden Langsamfahrstellen und anderer Besonderheiten)
ESF	Energiesparende Fahrweise
GPS	Global Positioning System
LAN	Local Area Network
BfD	Bestimmung fahrdynamischer Daten
ZFSim	Zugfahrsimulation
ZFSimOn	Zugfahrsimulation Online
ZSG	Zentrales Steuergerät

Lebenslauf

19.4.1970 Simon Kapitzke
geboren in Celle

Schulischer Werdegang

1970-1980 Grundschule in Dalum
1980-1982 Orientierungsstufe in Dalum
1982-1989 Gymnasium in Meppen
Abschluss: Abitur

Wehrdienst

1989-1990 Instandsetzungskompanie 523 in Lingen

Berufsausbildung

1990-1997 Maschinenbaustudium an der Universität Hannover
Schwerpunkt: Fahrzeugtechnik
1993 Vordiplom
1997 Diplom

Berufstätigkeit

1996-1997 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Schienenfahrzeuge
und maschinelle Bahnanlagen
1997-1999 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schienenfahr-
zeuge und maschinelle Bahnanlagen der Universität Hannover
seit 1999 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanik der
Universität Hannover