

Jan Hartmann

# Über Auslaufversuche

**Auslaufversuche sind ein schon lange bekanntes Verfahren zur Ermittlung des Eigenwiderstandes von Schienenfahrzeugen aller Art. Man läßt das Fahrzeug antriebslos ausrollen und kann aus der Geschwindigkeitsabnahme dabei den Eigenwiderstand berechnen. Die Versuche sind mit verhältnismäßig geringem Aufwand, insbesondere auch an Meßtechnik, durchzuführen und daher auch für Museums-Eisenbahnen geeignet. Deshalb soll hier eine Darstellung dieses Gebietes der Eisenbahntechnik gegeben, die Durchführung von Versuchen eingehend beschrieben und die Schaffung einer zentralen Statistik angeregt werden.**

Zur Terminologie sei vorweg gesagt: Wir verstehen unter einem „Auslaufversuch“ die Untersuchung des Fahrzeuges für eine bestimmte Nenngeschwindigkeit. Um eine statistische Absicherung zu haben, sind dazu eine ganze Reihe von Meßfahrten unter gleichen Bedingungen erforderlich, womit jeweils das einmalige Durchlaufen einer Meßstrecke gemeint ist. Wenn auch bei den Auslaufversuchen die Untersuchung von Lokomotiven im Vordergrund steht, so sind sie in gleicher Weise auch für Wagen möglich und im Grunde nicht einmal auf Schienenfahrzeuge beschränkt. Deshalb wird hier meist von „Fahrzeugen“ gesprochen.

Ursprünglich entsprang das Interesse für den Eigenwiderstand der Fahrzeuge der Notwendigkeit, zuverlässige Unterlagen für die Fahrplangestaltung und die Zugbildung zu erhalten. Dies wird so bei Museumseisenbahnen nicht mehr gegeben sein, – zum Glück – denn die dafür erforderlichen sehr eingehenden und damit aufwendigen Versuche mitsamt ihrer Auswertung werden sie nicht leisten können. Dies ist aber auch nicht nötig, da man auf die vorliegenden Versuche von Strahl [6, S. 326 ff.], Sanzin [5, S. 1458 ff.] und ihre späteren Neubearbeitungen [1, S. 17 ff., 4, S. 53; 7, S. 179 ff.] zurückgreifen kann. Für Museumsbahnen gibt es heute vornehmlich drei Gründe für die Durchführung von Auslaufversuchen:

- 1) Man will einen Kennwert für den Eigenwiderstand eines Fahrzeuges haben, um eine Aussage über seinen mechanischen Zustand machen zu können. Dies ist z. B. vor und nach größeren Überholungen des Trieb- und Laufwerkes und allgemein zur Langzeit-Kontrolle wünschenswert. Hierzu genügt i. a. ein einmaliger Versuch für jeden Zustand.
- 2) Man will ein Fahrzeug hinsichtlich seines Eigenwiderstandes mit ähnlichen Fahrzeugen vergleichen. Dazu braucht man eine Statistik, die wie jede Statistik um so aussagekräftiger ist, je größer die Menge der vorliegenden Versuchsergebnisse ist.
- 3) Man beschäftigt sich ganz allgemein mit den theoretischen Grundlagen der Fahrzeugtechnik und des Fahrbetriebes. Dann sind die Kräfte, die den Lauf des Fahrzeuges beeinflussen, natürlich von größter Bedeutung. Will man dabei von rein qualitativer auch zu quantitativer Betrachtung vorstoßen, so kommt man um die Ermittlung des Eigenwiderstandes nicht herum.

Der Verfasser legt gerade auf den letzten Punkt großen Wert, da er den Erwerb und die Pflege der Kenntnis der wichtigsten ingenieurmäßigen Grundlagen der Eisenbahntechnik für eine wichtige und lohnende Aufgabe auch der Museumsbahnvereine hält. Was die Dampflokomotive anbetrifft, so drohen diese Grundlagen zur Zeit ganz weitgehend

verloren zu gehen, was sicherlich nicht im wohlverstandenen Interesse der Vereine sein kann. Deshalb wäre es zu begrüßen, wenn sich stets wenigstens einige Eisenbahnfreunde auch um diesen Bereich kümmern würden. U. U. sind auch auf diesem Wege neue Mitglieder zu gewinnen.

## Theoretische Grundlagen

Wenn man bei einem Fahrzeug, das in Bewegung ist, den Antrieb abschaltet, so rollt es erfahrungsgemäß trotzdem noch weiter. Umgangssprachlich sagt man, das liege an seinem „Schwung“. Tatsächlich handelt es sich um die Eigenschaft jedes Körpers, infolge seiner Massenträgheit seinen augenblicklichen Bewegungszustand (Geschwindigkeit in bestimmter Richtung oder Ruhe) unverändert beibehalten zu „wollen“. Daran kann er nur durch von außen wirkende Kräfte gehindert werden. Dies sind hier die unter dem Begriff „Eigenwiderstand“ zusammengefaßten Kräfte, die die Bewegung hemmen. Nun ruft jede Kraft eine gleich große Gegenkraft hervor, hier die Massenkraft. Sie folgt dem bekannten Satz: „Kraft ist Masse mal Beschleunigung“. Im vorliegenden Fall ist die Beschleunigung negativ, d. h. eine Verzögerung, da der Körper ja unter dem Einfluß des Eigenwiderstandes langsamer wird. Diese Massenkraft ist es z. B. auch, die uns Fahrgäste beim Bremsen nach vorne drückt.

Die Ermittlung des Eigenwiderstandes beruht auf dem grundlegenden Satz der Mechanik, daß die Summe der in einer Linie an einem Körper angreifenden Kräfte immer Null ist. Er gilt nur, wenn man in die Kräftesumme die Massenkräfte einbezieht. Für den einfachsten Fall, ein antriebslos auf waagerechter Strecke rollendes Fahrzeug, kann man diesen Satz als Gleichung so schreiben:

$$<1> \quad F_w + m \cdot a = 0 \quad [N]$$

$$\text{mit:} \quad \begin{array}{ll} F_w = \text{Eigenwiderstand} & [N] \\ m = \text{Fahrzeugmasse} & [kg] \\ a = \text{Beschleunigung des Fz} & [m/s^2] \end{array}$$

Die Beschleunigung ist die Geschwindigkeitsänderung je Zeiteinheit. Wenn das Fahrzeug z. B. mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s fährt und 2 s später eine Geschwindigkeit von 12 m/s hat, so betrug die Geschwindigkeitsänderung 9 m/s, und zwar innerhalb von 2 s. Die Beschleunigung war also durchschnittlich 4,5 m/s<sup>2</sup>. Wird das Fahrzeug langsamer, so ist die „Beschleunigung“ negativ, man spricht dann i. a. von „Verzögerung“.

Das Produkt  $m \cdot a$  hat die Einheit  $[kg \cdot m/s^2] = [N]$  (Newton, dies ist die Kräfteinheit) und ist die „Massenkraft“. Wenn eine Verzögerung vorliegt, so hat die Massenkraft immer auch die Richtung, in der das Fahrzeug sich bewegt. Das bedeutet

gleichzeitig, daß  $F_w$  entgegengesetzt gerichtet sein muß, andernfalls könnte  $<1>$  ja nicht Null werden. So aber erhält man, hat man erst  $a$  gefunden,  $F_w$  ohne weiteres. In Abb. 1 ist der Kräfteplan für diesen Fall gezeichnet. In allen Kräfteplänen stellt  $v$  die Richtung dar, in der sich das Fahrzeug bewegt. Die dargestellten Kräfte sind nur der Übersichtlichkeit wegen gegeneinander versetzt gezeichnet, man kann sie alle als durch den Schwerpunkt des Fahrzeuges gehend ansehen.

Die Verhältnisse werden etwas anders, wenn die Meßfahrten auf einer Steigungsstrecke stattfinden. In diesem Fall entsteht ein Anteil der Gewichtskraft, der immer in Richtung bergab wirkt, er sei mit  $F_s$  bezeichnet. Die Summe der Kräfte ist wieder Null:

$$<2> \quad F_w + m \cdot a + F_s = 0$$

Bezeichnungen und Einheiten wie oben. Hier sind aber Unterscheidungen zu machen:

Nach dem Kräfteplan nach Abb. 2 ist  $F_s$  absolut kleiner als  $F_w$ . Der Widerstand überwiegt also, daher wird das Fahrzeug langsamer werden und es entsteht eine Massenkraft  $m \cdot a$  in Fahrtrichtung. Schließlich bleibt das Fahrzeug stehen.

In Abb. 3 ist die Steigung so groß, daß  $F_s$  absolut größer als  $F_w$  ist, d. h. es überwiegt die Antriebskraft  $F_s$  und das Fahrzeug wird immer schneller laufen, es entsteht eine Massenkraft  $m \cdot a$  entgegen der Fahrtrichtung.

Bei den Verhältnissen nach Abb. 4 sind  $F_s$  und  $F_w$  entgegengesetzt gleich groß. Das Fahrzeug wird mit gleichbleibender Geschwindigkeit bergab laufen, und eine Massenkraft entsteht nicht.

Nach dem Kräfteplan nach Abb. 5 rollt das Fahrzeug bergauf, es wird in jedem Fall langsamer werden. Die Massenkraft ist aufgrund der geometrischen Verhältnisse dabei stets verhältnismäßig groß, denn sie muß ja  $F_s$  und  $F_w$  ausgleichen. Ein großer Wert von  $m \cdot a$  bedeutet, daß die Geschwindigkeit schnell abnimmt, was für diesen Fall ja einleuchtet.

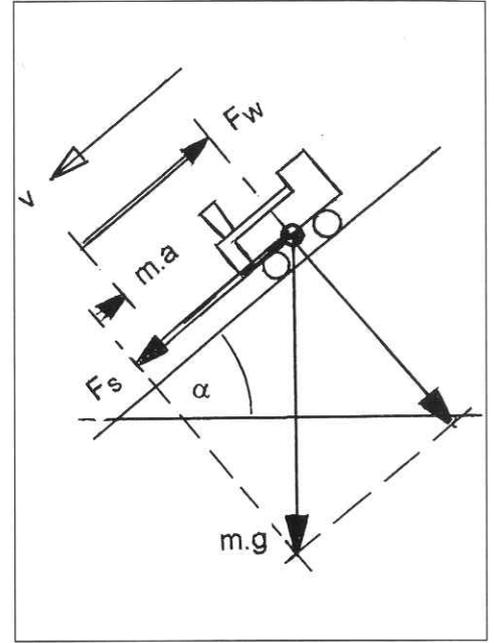
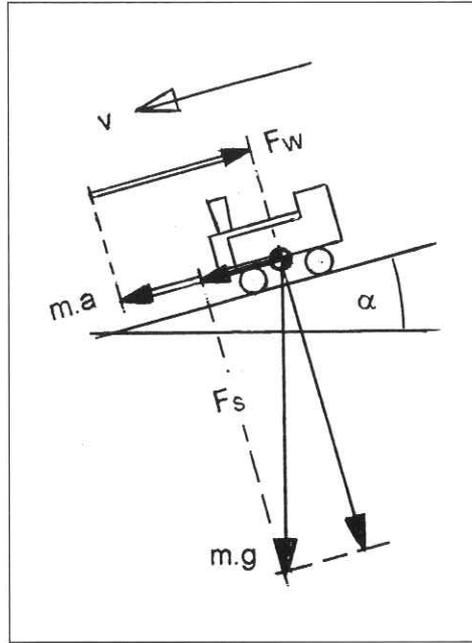
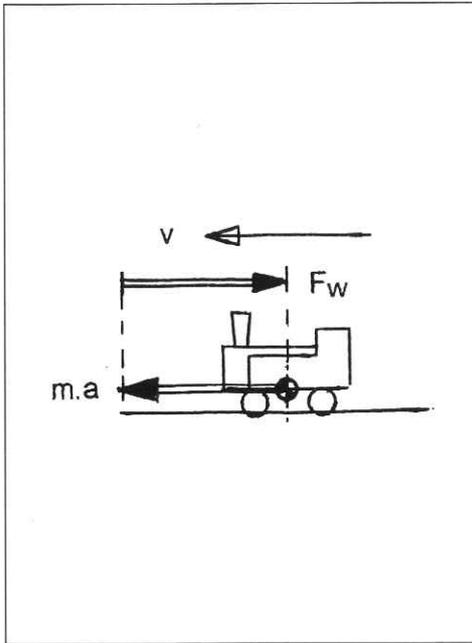
Die Größe von  $F_s$  erhält man aus dem Kräfteparallelogramm, wie in den Abbildungen 2 – 5 eingezeichnet, zu:

$$<3> \quad F_s = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [N]$$

$$\begin{array}{ll} \text{mit} & g = 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 10 \text{ m/s}^2 = \text{Konstante} \\ \text{der} & \text{Schwerkraft (Erdbeschleunigung)} \\ & \alpha = \text{Steigungswinkel } [^\circ] = \arctan(1 : x) \\ & 1 : x = \text{Steigung} \quad [1] \end{array}$$

Da die Steigung i. a. recht genau bekannt ist, bedeutet sie keine Erschwerung bei der Berechnung von  $F_w$ . Sie muß aber über die Länge der Meßstrecke konstant sein.

Wer an die zahlenmäßige Berechnung der Gleichungen  $<1>$  und  $<2>$  nicht mathematisch herangeht, ist sich U. U. über die einzusetzenden Vorzeichen nicht im klaren. Hier führt ein Fehler im günstigen Fall zu einem nicht plausiblen Vorzeichen des Ergebnisses  $F_w$ , im ungünstigen Fall zu einem völlig falschen Wert. Deshalb sind im folgenden die Berechnungsgleichungen für die beschriebenen fünf Fälle noch einmal in der Form angegeben, daß die Zahlen mit ihren Absolutwerten, d. h. alle positiv, einzusetzen sind (In der Gleichung



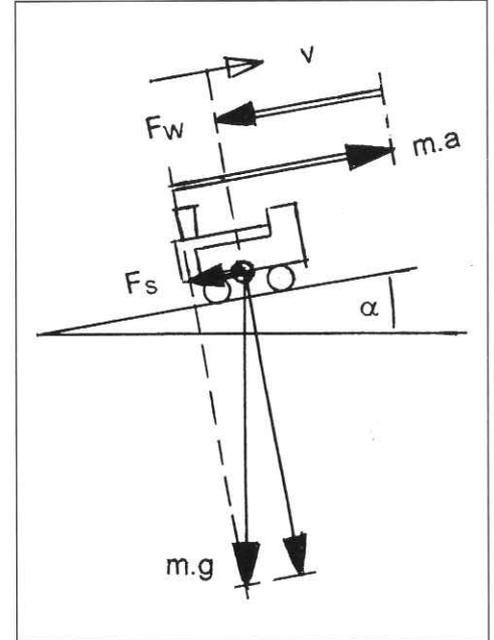
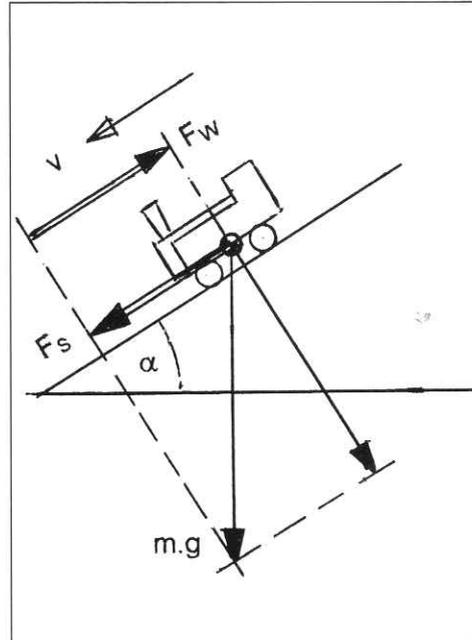
chungsnummer bedeutet die Zahl nach dem Punkt die Nummer der Abb.):

- <2.1>  $|F_w| = |m \cdot a|$  [N]
- <2.2>  $|F_w| = |m \cdot a| + |F_s|$  [N]
- <2.3>  $|F_w| = |F_s| - |m \cdot a|$  [N]
- <2.4>  $|F_w| = |F_s|$  [N]
- <2.5>  $|F_w| = |m \cdot a| - |F_s|$  [N]

Statt des wirklichen Wertes für  $F_w$  nimmt man gerne einen „spezifischen“ Wert, indem man  $F_w$  durch die Masse des Fahrzeuges teilt. Den neuen Wert nennen wir  $f_w$ , es ist also:

<4>  $f_w = F_w / m$  [N/kg]

$f_w$  gibt an, wieviel N an Eigenwiderstand auf ein kg der Fahrzeugmasse entfallen. Damit kann man – mit gebührender Vorsicht – auch Fahrzeuge verschiedener Größe miteinander vergleichen.



**Ergänzungen**

Gleichung <1> bedeutet, daß in dem Eigenwiderstand  $F_w$  alles zusammengefaßt ist, was den Lauf des Fahrzeuges hemmt. Darüber muß man sich im klaren sein, wenn man  $f_w$  als einen Kennwert für den mechanischen Zustand eines Fahrzeuges gebrauchen will.

Wende [7, S. 25 ff.] zählt als Hauptanteile Fahrbahnwiderstand und Fahrzeugwiderstand auf, die beide weiter unterteilt sind. Es sei hier nur gesagt, daß bei einem Auslaufversuch auf einer geraden Strecke ohne Weichen vom Fahrbahnwiderstand nur  $F_s$  in Frage kommt. Dieser gut zu berechnende Anteil ist in den Gleichungen <2...> berücksichtigt.



Oben links: Abb. 1 Ausrollen auf waagerechter Strecke

Oben Mitte: Abb. 2 verzögertes Ausrollen bergab

Oben rechts: Abb. 3 beschleunigtes Ausrollen bergab

Mitte links: Abb. 4 Ausrollen bergab mit konstanter Geschw.

Mitte rechts: Abb. 5 verzögertes Ausrollen bergauf

Unten: Kandidat Lok DHEF 1, Foto: A. Meyer

Über Auslaufversuche

10

Zeichn. Darstellung d. Zeitmessungen u. Berechnungen Fahrt Nr. 7

Blatt 7/2

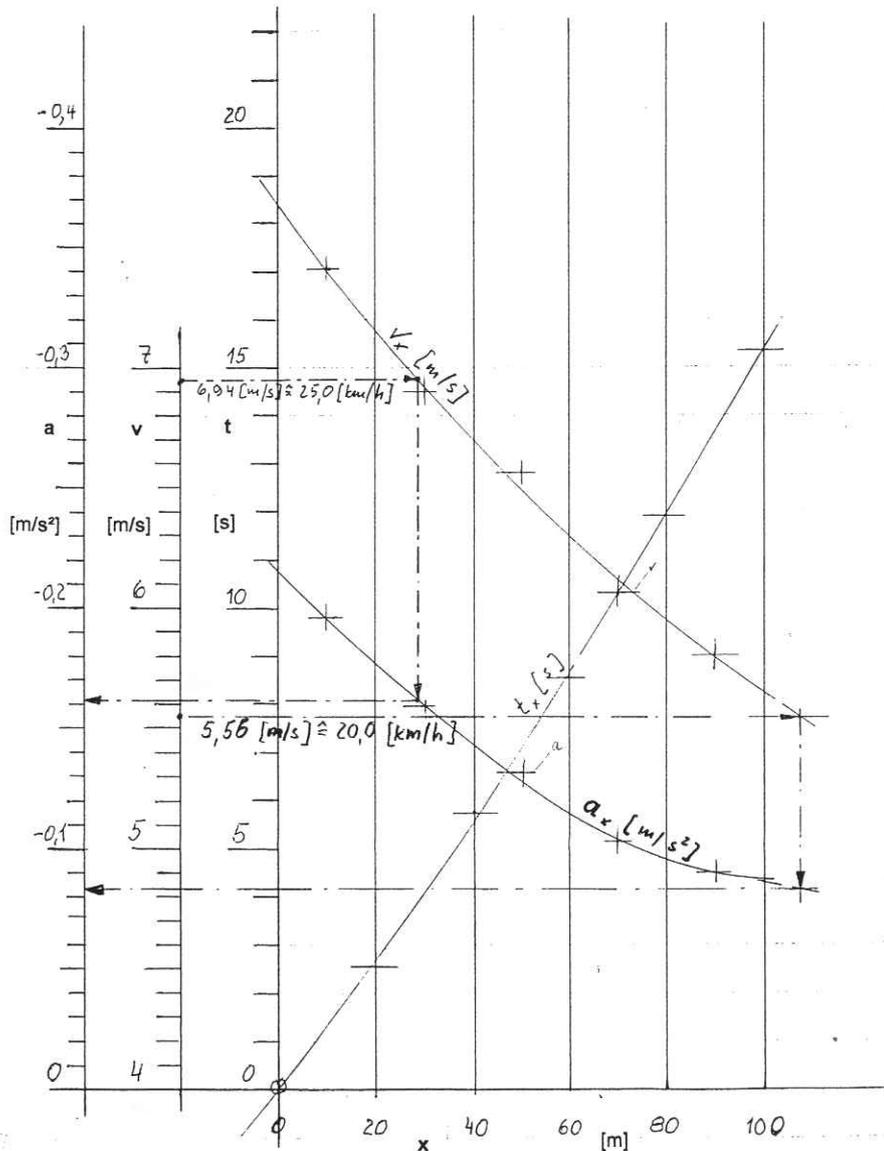


Abb. 7 t-v-a-Schaubild

Der Fahrzeugwiderstand unterteilt sich in Rollwiderstand, Dynamischen Widerstand, Lagerreibungswiderstand, Triebwerkswiderstand und Luftwiderstand. Die beiden zuerst genannten Anteile haben eine Größenordnung von nur je 1 bis 2 % von  $F_w$ . Wenn dann auch der Luftwiderstand durch Wahl einer genügend kleinen Anfangsgeschwindigkeit vernachlässigbar klein gemacht wird, so kann man sagen, daß  $F_w$  die auf mechanische Ursachen innerhalb des Fahrzeuges zurückzuführenden Widerstandsanteile genügend genau wiedergibt.

In der Einleitung wurde auf die Arbeiten von Sanzin und Strahl hingewiesen, die diese kurz nach Beginn des 20. Jahrhunderts anstellten und in den angegebenen und vielen weiteren Veröffentlichungen bekannt machten. Bis zum Ende der Entwicklung der Dampflokomotiven sind für sie keine besser zutreffenden Untersuchungen bekannt geworden. Insbesondere die Strahlsche Formel hat sich im deutschen Sprachgebiet durchgesetzt.

Sanzin, der in Österreich arbeitete, machte Auslaufversuche nur im Gefälle. Tritt der Fall ein, daß ein Fahrzeug antriebslos im Gefälle eine gleichmäßige Geschwindigkeit erreicht, so ist  $m \cdot a = 0$ , d. h. Abb. 4, bzw. Gleichung <2.4> liegt vor. Auf jeden Fall werden die unvermeidlichen Fehler bei der Messung und Berechnung der Beschleunigung umso kleiner, je kleiner  $a$  ist. Will man diese Verhältnisse schaffen, sind viele Fahrten auf verschiedenen geeigneten Strecken nötig, d. h. die Untersuchung ist aufwendig.

Strahl, von der preußischen Staatsbahn, ging ganz anders vor. Er ermittelte die indizierte Leistung der Lokomotive und maß gleichzeitig die Zugkraft am Tenderhaken, aus der er die von der Lokomotive abgegebene Leistung berechnete. Der Unterschied zwischen den beiden Leistungen wird zur Fortbewegung der Lokomotive selbst verbraucht. Teilt man ihn durch die Fahrtgeschwindigkeit, so erhält man den Eigenwiderstand der Maschine. Strahl hat die Ergebnisse von verhältnismäßig wenigen, sehr sorgfältig ausgeführten Versuchsfahrten ausgewertet. Seine Formel wurde im Laufe der Jahre von verschiedenen Verfassern in kleinen Einzelheiten geändert. Sie ist hier nach Giesl-Gieslingen verwendet worden. Für die Einzelheiten sei auf die angegebene Literatur verwiesen.



### Versuchsdurchführung

Ziel des eigentlichen Versuches ist die Ermittlung der negativen Beschleunigung  $a$  beim Ausrollen des antriebslosen Fahrzeuges. Dafür hat sich, wenn man von den Möglichkeiten von Museumsbahnen ausgeht, das nachfolgend beschriebene Vorgehen bewährt [2 u. 3]. Natürlich kann es in vernünftiger Weise abgeändert werden, um es den jeweiligen Gegebenheiten anzupassen. Man sollte dabei aber bedenken, daß Versuchsergebnisse immer auch von dem Versuchsverfahren abhängen und man vergleichbare Ergebnisse nur dann erhält, wenn die Versuche und ihre Auswertung in sehr ähnlicher Art und Weise durchgeführt wurden.

Oben: Abb. 7, t-v-a-Schaubild

Unten: Moment des Überrollens des Markierungspunktes an der Schiene durch den ersten Radsatz der Lok, Foto: A. Meyer

Für die Messungen wird eine Versuchsstrecke von 100 m Länge abgemessen und in fünf Abschnitte von je 20 m Länge unterteilt. Die Strecke muß gerade und möglichst waagrecht sein, wenn eine Steigung vorliegt, so muß sie bekannt und über die Länge der Versuchsstrecke konstant sein. An beiden Enden der Meßstrecke müssen noch mindestens 50 m frei sein für Beschleunigung bzw. Auslauf des Fahrzeuges. Die Grenzen der 20-m-Abschnitte werden durch einen Farbpunkt am Schienenfuß markiert. An jeder Abschnittsgrenze steht ein Zeitnehmer mit Stoppuhr, insgesamt werden also sechs Zeitnehmer benötigt.

Die Messungen sollten bei trockenen Schienen und möglichst geringem Wind stattfinden. Mehr als etwa 1,5 m/s Windgeschwindigkeit (Wind am Gesicht fühlbar; Blätter säuseln; Wind streckt Wimpel entspricht 1,6 bis 3,3 m/s) in Gleisrichtung sind unerwünscht. Denn man muß bedenken, daß sich der Windeinfluß bei Hin- und Rückfahrt nicht ausgleicht (im Gegensatz zum Einfluß einer Steigung).

Bei der Meßfahrt fährt das Fahrzeug mit etwas größerer als der Nenngeschwindigkeit (i. a. 25 km/h) auf die Meßstrecke zu. Bei einer Dampflok wird etwa zehn bis zwanzig Meter vor dem Anfang der Meßstrecke der Regler geschlossen und die Steuerung sowie etwa vorhandene, nicht automatische Leerlaufeinrichtungen werden in Leerlaufstellung gebracht. Dies muß am Anfang der Meßstrecke abgeschlossen sein. Gestartet werden alle Stoppuhren auf ein Armzeichen hin, das der Zeitnehmer am Beginn der Meßstrecke gibt, wenn das Fahrzeug bei ihm durchrollt. Die Abnahme der Geschwindigkeit wird dadurch festgestellt, daß man die Zeit stoppt, die zum Durchlaufen des ersten, der ersten beiden, der ersten drei usw. Abschnitte benötigt wird. Gestoppt wird, wenn die voranlaufende Achse des Fahrzeugs den Markierungspunkt überrollt.

Die Zeiten werden grafisch aufgetragen, wobei die Meßergebnisse geglättet werden, siehe Abb. 7. Man berechnet dann auf einem Berechnungsblatt, siehe Abb. 8, in dem auch die zugehörigen Rechenschritte näher erläutert sind, aus den geglätteten Zeiten die Durchschnittsgeschwindigkeiten für die einzelnen 20-m-Abschnitte, trägt diese in die Abb. 7 ein und glättet sie dabei. In entsprechender Weise werden nun die Geschwindigkeitsänderungen von Abschnitt zu Abschnitt berechnet und durch die dabei verstrichene Zeit geteilt. Damit hat man die mittleren Beschleunigungen in den Abschnitten, kann diese in Abb. 7 eintragen und aus der Kurve die Beschleunigungen  $a$  [m/s<sup>2</sup>] an beliebigen Stellen entnehmen.

Mathematisch ausgedrückt ist der beschriebene Vorgang eine zweimalige Ableitung der Wegfunktion nach der Zeit. Es ist eine ganz allgemeine Erfahrung, daß die Funktionen dabei „aufgebrochen“ werden, d. h. daß die errechneten Punkte erheblich streuen. Deshalb ist die jedesmalige Glättung unumgänglich.

Nach der Meßfahrt wird das Fahrzeug abgebremst und eine neue Fahrt in Gegenrichtung angeschlossen. Erfahrungsgemäß sollten für einen Versuch mindestens vier Meßfahrten in jeder Richtung gemacht werden.

Oben: Abb. 8 Berechnungsblatt

Unten: Abb. 9  $f_w$ -Schaubild

### Berechnungen zu Fahrt Nr. 7

Die gemessenen Zeiten (Zeile 2) sind den Aufschreibungsblättern entnommen und in Abb. 7 eingetragen. In möglichst guter Annäherung wird durch die damit entstandene Punkteschar die Kurve  $t_x$  gelegt. Die dort abgelesenen, geglätteten Zeiten sind in Zeile 3 eingetragen.

1	x-Koordinate x [m]	0	20	40	60	80	100
2	gemessene Zeit t [s]	0	2,56	5,73	8,54	11,90	15,32
3	geglättete Zeit $t_x$ [s]	0	2,70	5,60	8,65	11,95	15,40

Die Geschwindigkeit wird nach <5> jeweils für die Mitten der Meßabschnitte berechnet und in Zeile 6 eingetragen :

4 <5>  $v(x) = ((x - 10) - (x + 10)) / (t_{x+10} - t_{x-10}) = \Delta x / \Delta t_x = 20 / \Delta t_x$  [m/s]

5	x-Koordinate x [m]	10	30	50	70	90
6	Geschw. im Pkt v [m/s]	7,41	6,90	6,56	6,06	5,80

Die Geschw. nach <5> (d.h. Zeile 6) wird in Abb. 7 eingetragen. In möglichst guter Annäherung wird durch die damit entstandene Punkteschar die Kurve  $v_x$  gelegt. Die dort abgelesenen, geglätteten Geschwindigkeiten sind in Zeile 8 eingetragen:

7	x-Koordinate x [m]	0	20	40	60	80	100
8	geglätt. Geschw. $v_x$ [m/s]	7,68 *)	7,15	6,69	6,29	5,95	5,64

\*) Dies entspricht einer Geschwindigkeit im Anfang der Meßstrecke von ..27,6.. [km/h].

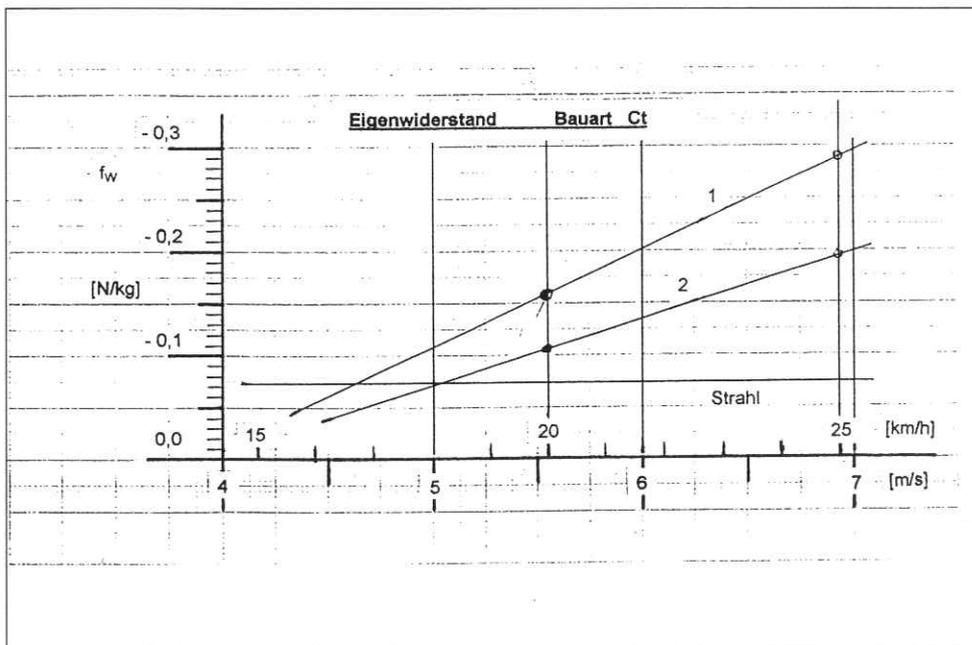
Die Beschleunigung (da negativ, hier auch als Verzögerung zu bezeichnen) wird nach <6> jeweils für die Mitten der Meßabschnitte berechnet und in Zeile 11 eingetragen:

9 <6>  $a(x) = (v_{x-10} - v_{x+10}) / (t_{x-10} - t_{x+10}) = \Delta v_x / \Delta t_x$  [m/s<sup>2</sup>]

10	x-Koordinate x [m]	10	30	50	70	90
11	Beschl. im Pkt $a_x$ [m/s <sup>2</sup> ]	-0,196	-0,159	-0,131	-0,103	-0,090

Die Beschleunigung nach <6> (d.h. Zeile 11) wird in Abb. 7 eingetragen. In möglichst guter Annäherung wird durch die damit entstandene Punkteschar die Kurve  $a_x$  gelegt. Die dort abgelesenen Beschleunigungen sind in Zeile 13 eingetragen:

12	x-Koordinate x [m]	0	20	40	60	80	100
13	geglätt. Beschl. $a_x$ [m/s <sup>2</sup> ]	-0,215	-0,177	-0,143	-0,114	-0,095	-0,087



Einen ersten Hinweis darauf, ob eine Meßfahrt auswertbar sein wird, erhält man aus dem Ergebnis des ersten Zeitnehmers: Beträgt  $t_1 = 3$  s, so ist die mittlere Geschwindigkeit im ersten Abschnitt:

$$v_1 = 20 \text{ m} / 3 \text{ s} = 6,67 \text{ m/s}$$

$$V_1 = 6,67 \text{ m/s} \cdot (3,6 \text{ km/h/m/s}) = 24 \text{ km/h}$$

Dann sind die gewünschten 25 km/h am Anfang der Meßstrecke wohl eingehalten. Dies ist aber nicht mehr der Fall, wenn  $t_1$  größer als 3 s ist, dann sollte man sofort eine zusätzliche Meßfahrt in gleicher Richtung machen. Der Fall, daß die Geschwindigkeit zu wenig abfällt, ist nicht so einfach zu entdecken. Dazu muß man vielmehr die beschriebene Auswertung zunächst einmal durchführen. Wenn die  $v_x$ -Kurve in Abb. 7 nicht von Anfang an sehr deutlich abfällt und diese Tendenz beibehält, so fuhr die Lokomotive zu lange mit Dampf, die Fahrt ist unbrauchbar. Ein Abknicken dieser Kurve nach unten deutet auf vorzeitiges Bremsen. Dann kann man aber U. U. noch den Anfangsteil der Fahrt verwerten.

In der beschriebenen Art wurde im Dezember 1997 ein Versuch mit Lok DHEF 1 der Delmenhorst-Harpstedter Eisenbahnfreunde durchgeführt. Sein wesentliches Ergebnis ist in Tabelle 3 und Abb. 9 jeweils unter der lfd. Nr. 1 eingetragen. Ein weiterer Versuch fand im Mai 1998 bei der Museums-Eisenbahn Bruchhausen-Vilsen mit Lok Hermann statt, siehe Tab. 3 und Abb. 9 unter lfd. Nr. 2.

Die Versuche dauerten jeweils etwa eine halbe Stunde. Bei Versuch 1 wurde dazu eine Zuführungsfahrt zu einer Nikolausfahrt unterbrochen, die Zugbegleiter stellten die Zeitnehmer. Versuch 2 fand an einem Sonnabend vor Beginn des nachmittäglichen Betriebes statt, als Zeitnehmer stand u. a. Werkstattpersonal und sogar die Heizerin der Lok zur Verfügung.

Wenn man Versuche mit Wagen macht, so müssen diese abgestoßen werden und sich am Anfang der Meßstrecke von der Lokomotive getrennt haben.

Die hier geschilderte Art der Versuchsdurchführung verwendet bewußt nur einfachste Mittel und ist personalaufwendig, letzteres fällt aber bei den Verhältnissen von Museumsbahnen i. a. nicht sehr ins Gewicht. Findige Elektronikbastler werden jedoch elegantere Lösungen für die eigentliche Meßaufgabe, nämlich die Zeiten für das Durchlaufen gegebener Strecken zu messen, verwirklichen können. So wäre die Zeitnahme durch Lichtschranken an den Abschnittsgrenzen ein Weg. Noch besser erscheint es, den Radumfang der Lokomotive als Meßabschnittslänge zu verwenden. Das liefe darauf hinaus, die Zeit für eine Radumdrehung sehr genau zu messen. Dann sind an der Strecke überhaupt keine Vorbereitungen mehr nötig.

## Ergebnisse

Nachdem der Verlauf von  $a$  berechnet worden ist, kann man  $F_w$  und  $f_w$  für jede erfaßte Geschwindigkeit nach den Gleichungen <1.1> bzw. <2.2> ausrechnen. Wir suchen jedoch keine Kurve, sondern einen handlichen Kennwert für den Eigenwiderstand. Hierzu wird folgendes vorgeschlagen (über andere Möglichkeiten könnte man sprechen):

$f_w$  wird für  $V = 25$  km/h und  $V = 20$  km/h berechnet. Als Kennwert, nach dem man verschiedene Fahrzeuge beurteilen und vergleichen kann, wird  $f_w$  für  $V = 25$  km/h angesehen. Mit Hilfe des zweiten Wertes erhält man die Neigung der idealisierten  $f_w$ -Kurve, diese müßte auch gewisse Rückschlüsse zulassen, wenn auch z. Z. darüber noch nichts Endgültiges ausgesagt werden kann.

Die Berechnungen werden hier am Beispiel des Versuches mit Hermann ausführlich erläutert. Wie man für beliebige Geschwindigkeiten  $V$  die Beschleunigung  $a$  aus dem Schaubild Abb. 7 abliest, ist dort durch strichpunktierte Linienzüge eingetragen. Daraus entnimmt man für die Meßfahrt 7:

$$a_{25,7} = -0,162 \text{ m/s}^2 \text{ und } a_{20,7} = -0,084 \text{ m/s}^2$$

Diese Rechnung wird für jede Meßfahrt durchgeführt, für die Richtungen bergauf und bergab wird der Mittelwert gebildet. Tabelle 1 zeigt dies (Man sieht daraus, daß nicht alle Meßfahrten ein brauchbares Ergebnis erbringen. Bei dem als Beispiel gewählten Versuch schien der Regler der Lok mehrfach verzögert zu schließen. Daß von den vier bergauf-Fahrten nur eine auswertbar war, mindert die Güte der Ergebnisse und ist an sich sehr bedauerlich. Deshalb nicht zu wenige Fahrten einplanen!)

**Tabelle 1:**

Beschleun.  $a_{25}$  ( $V = 25$  km/h) u.  $a_{20}$  ( $V = 20$  km/h)

Fahrt	$a_{25}$ ①	$a_{25}$ ②	$a_{20}$ ①	$a_{20}$ ②
1	-0,171		-0,037	
2		-0,225		-0,138 <sup>b</sup>
3	"		-0,043	
4		"		"
5	-0,165		-0,127	
6		"		"
7	-0,162		-0,084	
8		"		"

Mittelw. -0,166 -0,225 -0,073 -0,138

Anm. <sup>b</sup>: nicht auswertbar

Mit den Zahlen der letzten Zeile von Tab. 1 ergeben sich die Massenkräfte  $m \cdot a$  [N] nach Tabelle 2. Die Masse der Lokomotive betrug etwa 23.300 kg:

**Tabelle 2**

Berechnete Massenkräfte ( $m \cdot a$  [N])

V [km/h]	Richtung	Massenkraft
25	bergab	3.870 N
20	bergab	1.700 N
25	bergauf	5.240 N
20	bergauf	3.220 N

Der hier vorhandenen Neigung der Strecke von 1:400 = 0,0025 entspricht der Steigungswinkel  $\alpha$ :

$$\alpha = \arctan 0,0025 = 0,143^\circ \text{ (Taschenrechner)}$$

Die Steigungskraft  $F_s$  hat nach <3> die Größe:

$$F_s = 23.300 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot \sin 0,143 = 582 \text{ N}$$

Nun lassen sich die Eigenwiderstände für die verschiedenen Geschwindigkeiten berechnen:

Für die Fahrtrichtung bergab ist bei  $V = 25$  km/h:

$$\langle 2.2 \rangle F_w = 3.870 \text{ N} + 582 \text{ N} = 4.450 \text{ N}$$

$$f_w = F_w/m = 4.450 \text{ N} / 23.300 \text{ kg} = 0,191 \text{ N/kg}$$

Für die Fahrtrichtung bergauf ist bei  $V = 25$  km/h:

$$\langle 2.5 \rangle F_w = |582 \text{ N} - 5.240 \text{ N}| = 4.660 \text{ N}$$

$$f_w = F_w/m = 4.660 \text{ N} / 23.300 \text{ kg} = 0,2 \text{ N/kg}$$

Im Mittel also:  $f_{w25} = 0,196 \text{ N/kg}$

Entsprechend erhält man für  $V = 20$  km/h:

$$f_{w20} = 0,106 \text{ N/kg}$$

Dies sind in dem obengenannten Sinn die Ergebnisse des Versuches. Sie sind in Abb. 9 und Tabelle 3 in Zeile Hermann dargestellt.

**Tabelle 3** Vergleich der Ergebnisse

lfd. Nr.	Lok	Masse [t]	$f_{w25}$ [N/kg]	$f_{w20}$ [N/kg]	Jahr d. Vers.
1	DHEF 1	42,0	0,290	0,165	1997
2	Hermann	23,3	0,196	0,106	1998

DHEF 1: Cn2t, 1.435 mm, Krupp 1951, Verschiebelok mit Winterthur-Druckausgleicher, Kolbenschieber und Heusinger-Steuerung

Hermann: Cn2t, 1.000 mm, Hohenzollern 1911, Flachschieber und Allan-Steuerung

In Abb. 9 ist außer den Kennwerten der beiden von uns untersuchten Lokomotiven noch die entsprechende Kurve nach Strahl eingetragen worden. Der auffälligste Unterschied ist der starke Abfall der  $f_w$ -Kurven der neu untersuchten Lokomotiven bei abnehmender Geschwindigkeit im Gegensatz zu der horizontalen Linie von Strahl (die Linie von Sanzin verläuft parallel dazu etwas höher). Über die Gründe für diesen Unterschied kann und sollte man sprechen.

Ein Grund wird sicher sein, daß unsere Versuchstechnik anders als die unserer berühmten Vorgänger war, wobei die Einzelheiten der Auswertung der damaligen Versuche nicht überliefert sind. Auch werden diese auf so geringe Geschwindigkeiten, wie sie für uns wichtig sind, wenig abgestellt gewesen sein. Jedenfalls zeigten die insgesamt von uns gefahrenen etwa 14 Meßfahrten bei allen Ungereimtheiten, die gelegentlich auftraten, ausnahmslos die gleiche Tendenz der stark abfallenden  $a$ - bzw.  $f_w$ -Kurven. Bis zum Nachweis des Gegenteils möchten wir sie daher für die untersuchten Geschwindigkeiten als vertrauenswürdig ansehen.

Daß die Eigenwiderstände der beiden Lokomotiven so weit auseinander liegen, überrascht natürlich auch. Lok DHEF 1 gilt als „schwer laufend“, was gleichbedeutend mit einem ungewöhnlich hohen Eigenwiderstand ist. Dabei ist sie aber im Lauf- und Triebwerk nicht etwa besonders schadensanfällig, das könnte man sonst leicht vermuten, wenn man den großen Eigenwiderstand nur auf ungenügende Schmierung od. dgl. zurückführt. So einfach ist es nicht.

Bisher sind nur C-Kuppler nach dem beschriebenen Verfahren untersucht worden. Da der Eigenwiderstand einer Lokomotive stark von der Zahl der Lager im Lauf- und Triebwerk abhängt, haben allgemein B-Kuppler kleinere, D-Kuppler und Ma-

schinen mit noch höheren Kupplungsgraden und solche mit Laufachsen und Tendern größere  $f_w$ .

### Eine zentrale Datensammlung

Hat man wie vorstehend beschrieben einen Auslaufversuch durchgeführt, so sagt einem das Ergebnis zunächst noch gar nichts, man weiß nicht einmal, ob man nicht einen schweren Meß- oder Auswertefehler begangen hat. Erst wenn man den Versuch nach einiger Zeit in genau gleicher Weise wiederholt, kann man aus der Tendenz der Ergebniswerte gewisse Schlüsse ziehen. Diesem unbefriedigenden Zustand wäre weitgehend abgeholfen, wenn gesicherte, nach dem gleichen Verfahren gewonnene Erfahrungswerte für den Eigenwiderstand von Lokomotiven vorliegen würden. Man könnte dann einen Einzelwert darin einordnen und somit schon bei dem ersten Versuch wichtige Erkenntnisse über den mechanischen Zustand der Maschine bekommen.

Von dieser Ausgangslage her ist der Plan entstanden, im Bereich des Verbandes der deutschen Museums- und Touristikbahnen (VDMT) eine zentrale Sammlung von Eigenwiderstandswerten von Dampflokomotiven zu schaffen. Dafür hat der Verfasser die Federführung übernommen. Er ist dabei völlig auf die Bereitschaft der Mitgliedsvereine zur Durchführung der dazu notwendigen Versuche angewiesen und hofft, daß diese in ausreichendem Maße vorhanden ist. Es wäre etwa folgendermaßen vorzugehen:

- An sich sind Versuche mit Lokomotiven aller Bauarten sinnvoll und wünschenswert. Da die beiden beschriebenen Versuche mit der in Deutschland oft vorhandenen Bauart Ct gemacht wurden, wäre, falls man wählen kann, diese Bauart vorzugsweise zu untersuchen. Die Spurweite spielt keine Rolle.
- Findet sich in einem Verein ein Mitglied, das Interesse an dieser Arbeit und dafür die Unterstützung des Vereinsvorstandes hat, so wird es hiermit gebeten, sich mit dem Verfasser in Verbindung zu setzen. Dann könnten, auf die vorliegenden Verhältnisse abgestimmt, alle Einzelheiten besprochen und Unklarheiten über die Durchführung beseitigt werden. Dies ist wichtig, damit die Vergleichbarkeit der gewonnenen Daten wirklich sicher gestellt ist. Es sei darauf hingewiesen, daß sich eine Beschreibung des Auslaufversuchs auch in dem neuen VDMT-Merkblatt „Technische Versuche an Dampflokomotiven“ findet.
- Auch bei der eigentlichen Durchführung des Versuches und seiner Auswertung würde der Verfasser mit Rat und Tat zur Hilfe bereit sein. Letzten Endes ist das Ergebnis eine Fortschreibung der Tab. 3 und der Abb. 9. Der jeweils letzte Stand wird an dieser Stelle veröffentlicht werden.

Oben: Zeitnehmer an der markierten Meßstrecke.  
Foto: A. Petershagen

Unten: Kandidat Lok Hermann der Museums-Eisenbahn Bruchhausen-Vilsen bei Rangierarbeiten am Ostersonnabend, den 15. 4. 1995, Foto: Regine Meier

• Es soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß die Versuche nicht aufwendig sind. Die Lokomotive wird etwa eine halbe Stunde auf der Meßstrecke benötigt, dazu sechs Zeitnehmer mit Stoppuhren. Die Auswertung ist in wenigen Stunden erledigt.

• Schließlich möchte der Verfasser nochmals betonen, daß man derartige Untersuchungen (dies gilt auch für Leistungsmessungen u. dgl., siehe das erwähnte VDTM-Merkblatt) zu den kulturellen Aufgaben der Museumsbahnvereine rechnen kann und sie auch von daher eine Berechtigung haben.

Es bleibt noch die erfreuliche Pflicht, sowohl den beiden Vereinsvorständen als auch allen an den Versuchen beteiligten Mitgliedern sehr herzlich für ihr Entgegenkommen und ihre Mithilfe zu danken! Wenn auch der Aufwand an Zeit und Mitteln für diese Versuche an sich nicht groß war, so bedeuteten sie natürlich doch einen gewissen Eingriff in die Betriebsroutine und in die persönliche Zeitpla-

nung der Beteiligten, der aber in freundlichster Weise in Kauf genommen wurde.

Jan Hartmann Tilburger Str. 69 28259 Bremen  
Telefon: (04 21) 58 25 87

### Literatur

- 1 Giesl-Gieslingen, Adolph, Lokomotiv-Athleten, Wien '76
- 2 Hartmann, Jan, Auslaufversuch mit einer Dampflokomotive, unveröffentlichtes Manuskript 1998
- 3 Hartmann, Jan, Auslaufversuch Lok Hermann, unveröffentlichtes Manuskript 1998
- 4 Henschel (Hsg.), Henschel Lokomotiv-Taschenbuch, Düsseldorf 1960
- 5 Sanzin, R., Versuche über den Widerstand von Dampflokomotiven, ZVDI 1911, S. 1458 ff.
- 6 Strahl, Verfahren zur Bestimmung der Belastungsgrenzen von Dampflokomotiven, (Abschn. 4 Die Fahrwiderstände), ZVDI 1913, S. 326 ff.
- 7 Wende, Dietrich, Fahrodynamik, Berlin 1983

