

Jan Hartmann, Gerhard Schenkluh

# Leistung an der Treibstange einer Dampflokomotive

Es werden Versuche beschrieben, die mit der Lokomotive DHEF 1 (Cn2t, Krupp 1951) der Delmenhorst — Harpstedter Eisenbahnfreunde angestellt wurden mit dem Ziel, die Leistung der Maschine über Dehnungsmessungen an der Treibstange zu ermitteln. Es sollte untersucht werden, ob solche Messungen überhaupt sinnvoll sind und ob aus ihnen weitere Einsichten in den Arbeitsvorgang im Zylinder zu erhalten sind. Beide Fragen können nach den bisherigen Ergebnissen bejaht werden, jedoch ist eine Reihe von Punkten noch näher zu untersuchen. Die meßtechnische Durchführung der Arbeit lag in Händen des Labors für Schiffsfestigkeit der Fachhochschule Bremen, Fachbereich Schiffs- und Meerestechnik, dem beide Autoren angehören.

Das beste Verfahren zur Ermittlung der Leistung einer Dampflokomotive ist das "Indizieren". Man erhält dadurch nicht allein die Leistung (allerdings die Leistung des Zylinders, die nicht gleich der abgegebenen Leistung ist), sondern bekommt auch noch einen Einblick in die Vorgänge im Zylinder, der wichtige Hinweise für die Verbesserung der Steuerungsauslegung und damit der ganzen Maschine geben kann. Leider ist dies Verfahren heute nur noch selten anzuwenden, weil der Aufbau der Meßanlage kompliziert und langwierig ist und weil es kaum noch Personal gibt, das damit vertraut ist, was beides zu recht hohem Kostenaufwand führt, und weil manche der heute bei Museumsbahnen viel verwendeten kleinen Lokomotiven keine Indizierschlüsse haben.

Wenn auch der Wunsch nach einer Leistungsbestimmung von Seiten der Betreiber nur noch selten geäußert wird, so schien es doch nicht ganz uninteressant zu sein, ein Verfahren zur Leistungsbestimmung zu erarbeiten, das die beiden oben genannten Nachteile nicht besitzt. Wenn die Messung im Zylinder umgangen werden soll, so ist ein anderer Ort dafür zu finden. Dazu muß man sich klar machen, daß die Leistung in den Zylindern erzeugt wird (dies ist die indizierte Leistung  $P_i$ ), und dann über die Kolbenstangen und Treibstangen auf weiterhin recht verwickelten Wegen bis zum Zughaken fließt, wo sie als die effektive Leistung  $P_e$  abzunehmen ist. Der Weg von  $P_i$  nach  $P_e$  innerhalb der Dampflokomotive ist sehr verlustbehaftet.

Messen sollte man die Leistung an einer Stelle, an der der Leistungsfluß noch ungeteilt und wenig geschwächt ist. Solche Stellen sind die Kolbenstange und die Treibstange. Erstere kommt kaum in Frage, schon weil sie zu warm wird. Die Treibstange erscheint dagegen fast ideal. Das zu beschreibende Verfahren beruht nun darauf, daß zunächst über Dehnungsmessungen die in der Treibstange wirkenden Kräfte ermittelt werden. Diese werden mit der Geschwindigkeit multipliziert, die die Treibstange in ihrer eigenen Richtung hat, woraus sich die Leistung  $P_T$  ergibt.

Es muß erwähnt werden, daß Dehnungsmessungen an der Treibstange schon früher gemacht worden sind. Genannt sei nur die Arbeit von Lehr, 1938 (Lit.1). Sie sind aber in der eigentlichen "Dampflok-Ära" nicht als Alternative zum Indizieren gefragt gewesen und offenbar auch nicht als solche in Betracht gezogen worden, zumal sie damals recht schwierig waren. Seitdem hat aber das elektrische Messen von mechanischen Größen derartige Fortschritte gemacht, daß es heute erfolgversprechend zu sein scheint, die Fragestellung neu aufzunehmen.

## Physikalische Zusammenhänge

Für den Leser, der damit weniger vertraut ist, sollen hier die physikalischen Zusammenhänge, auf denen die zu beschreibende Leistungsbestimmung aufbaut, kurz zusammengestellt werden. Leistung ist "Arbeit in der Zeiteinheit", man kann auch sagen: "Kraft multipliziert mit Geschwindigkeit", wobei letztere die Richtung der Kraft haben muß. Formelmäßig:

$$\langle 1 \rangle P = W / t \text{ [W]}$$

mit  $P$  = Leistung in [W],

$W$  = Arbeit = Kraft x Weg in [Nm],

$t$  = Zeit in [s]

$$\langle 2 \rangle P = F \times v \text{ [W]}$$

mit  $F$  = Kraft in [N],

$v$  = Geschwindigkeit in [m/s]

Man macht nun Gebrauch von Formel  $\langle 2 \rangle$ , indem man die in der Treibstange wirkende Kraft in jedem Augenblick mit Hilfe von Dehnungsmessungen bestimmt und sie mit der jeweiligen Geschwindigkeit der Treibstange multipliziert. Die Geschwindigkeit der Treibstange (in jedem Augenblick in Richtung der Treibstange) wird aus der Umfangsgeschwindigkeit am Treibzapfen abgeleitet. Die jeweilige Leistung in der Treibstange (sie soll hier als  $P_T$  bezeichnet werden, im Gegensatz zu der indizierten Leistung  $P_i$  und der effektiven Leistung  $P_e$ ) ergibt eine etwa sinusförmige Verteilung über der Zeit, deren Mittelwert etwas kleiner als  $P_i$  sein wird, aber ansonsten  $P_i$  entspricht.

Wird ein Körper belastet, hier z. B. wird die Treibstange gezogen, so verformt er sich. Die Treibstange wird um einen gewissen Betrag länger. Das Verhältnis der Größe dieses Betrages zur ursprünglichen Länge wird als "Dehnung"  $\epsilon$  bezeichnet:

$$\langle 3 \rangle \epsilon = dl / l \text{ [m]/[m]}$$

Aus der Dehnung schließt man über den "Elastizitätsmodul"  $E$  auf die Spannung  $\sigma$  im Werkstoff:

$$\langle 4 \rangle \sigma = \epsilon \times E \text{ [N/cm}^2\text{]}$$

Für die üblichen Maschinenbau-Stähle kann man annehmen:

$$E = 2,1 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$$

Die in dem Körper wirkende Kraft erhält man, indem man die Spannung mit der Querschnittsfläche  $A$  multipliziert, in der sie wirkt (hier war  $A = 33,1 \text{ cm}^2$ ):

$$\langle 5 \rangle F = \sigma \times A \text{ [N]}$$

Dabei wird eine gleichmäßige Verteilung der Spannung über den Querschnitt vorausgesetzt, was hier zulässig ist.

## Durchführung der Messungen

Um die Arbeit nicht unnötig zu komplizieren, wurde nur auf der linken Seite der Maschine gemessen, durch Verdoppelung der dort ermittelten Leistung bekommt man die Gesamtleistung der Maschine für den beabsichtigten Zweck genau genug. An der Treibstange wurden nahe dem Kreuzkopf, wo der Querschnitt der Stange am geringsten, die Spannung und damit die Dehnung also am größten ist, an Ober- und Unterseite Dehnungsmeßstreifen geklebt und zu einer Vollbrücke geschaltet.

Wird der Dehnungsmeßstreifen gelängt, so wird sein Widerstand größer. Diese Widerstandsänderung wird mittels einer Wheatstoneschen Brücke gemessen, womit man einen Wert für die Dehnung erhält. Dabei wird natürlich eine Spannung in Volt gemessen. Die Eichung erfolgt mittels eines Kalibriersignals  $U_a/U_e$ . Die Dehnungen werden vielfach in der Einheit  $\mu\text{m/m}$  angegeben, d. h. also millionstel Meter Längenänderung je ein Meter Ausgangslänge. Man kann Dehnungen bis herunter zu Beträgen von etwa 1 bis 2  $\mu\text{m/m}$  messen, jedoch ist die Genauigkeit dabei schon recht gering. Denn die absolute Längenänderung eines 6 mm langen Dehnungsmeßstreifens beträgt bei einer Dehnung von 1  $\mu\text{m/m}$  nur 0,000.006 mm! Im übrigen wird für Einzelheiten auf Lit.(4) hingewiesen.

Die Dehnungsmeßstreifen auf der Treibstange wurden über ein Kabel, das in einem kräftigen Schutzschlauch bogenförmig an die feststehenden Teile der Maschine herangeführt wurde, mit dem Verstärker verbunden, der im ersten Abteil des ersten Wagens des Zuges aufgestellt war. Mit Hilfe eines einfachen, mit einem weiteren Dehnungsmeßstreifen beklebten Flacheisens entstand ein Geber für den hinteren Totpunkt der Maschine, so daß auf dem Meßschrieb die genaue Zuordnung der jeweiligen Dehnung der Treibstange zur Rad- bzw. Kolbenstellung möglich war. Die Meßsignale für Dehnung und hinteren Totpunkt wurden auf Magnetband registriert und gleichzeitig auf Papier geschrieben.

Zur Belastung der Lokomotive wurde ein Zug zusammengestellt, der aus 3 dreiachsigen und 2 zweiachsigen Personenwagen bestand. Die Wagen hatten sämtlich Gleitlager und waren bis auf 6 Personen Begleit- und Meßpersonal unbesetzt, ihre Gesamtmasse einschließlich Personal betrug 88 t, die der Lokomotive war 42 t.

Die Messungen fanden am 25. 6. 1994 bei hochsommerlichem, schwachwindigem Wetter auf der Strecke der Delmenhorst — Harpstedter Eisenbahn zwischen den Haltepunkten Stelle und Groß-Mackenstedt statt. Die Strecke ist dort horizontal und gerade, erst kurz vor Groß-Mackenstedt befindet sich eine Kurve mit  $R = 500 \text{ m}$ . Der Unterhaltungszustand der Strecke ist wenig zufriedenstellend. Gefahren wurde mit drei verschiedenen Füllungen: Fahrt 1 mit 76 %, Fahrt 2 mit 30 % und Fahrt 3 mit 10 %.

Dabei hielt der Lokomotivführer die Geschwindigkeit über die Reglerstellung auf etwa 26 km/h. Da die einzelnen Messungen außerordentlich wenig Zeit benötigen (im Grundsatz genügt eine Radumdrehung der Lokomotive), konnten die 3 Messungen auf dem etwa 1,2 km langen Streckenstück hintereinander in einer einzigen Fahrt gemacht werden. Allerdings kam man bei Fahrt 3 doch schon in die Kurve hinein, was erst bei der Auswertung deutlich in Erscheinung trat. Jedoch ist den Meßschrieben zu entnehmen, daß sich hinsichtlich der Geschwindigkeit jeweils stationäre Zustände eingestellt hatten.

Bei der Einfahrt in den Haltepunkt Groß-Mackendstedt wurden die Dehnungen auch bei geschlossenem Regler gemessen: Fahrt 4 Füllung 0 %. Bei dieser Reglerstellung öffnet der Winterthur-Druckausgleicher selbsttätig, so daß man davon ausgehen kann, daß in dem Zylinder keine nennenswerte Kompression stattfindet.

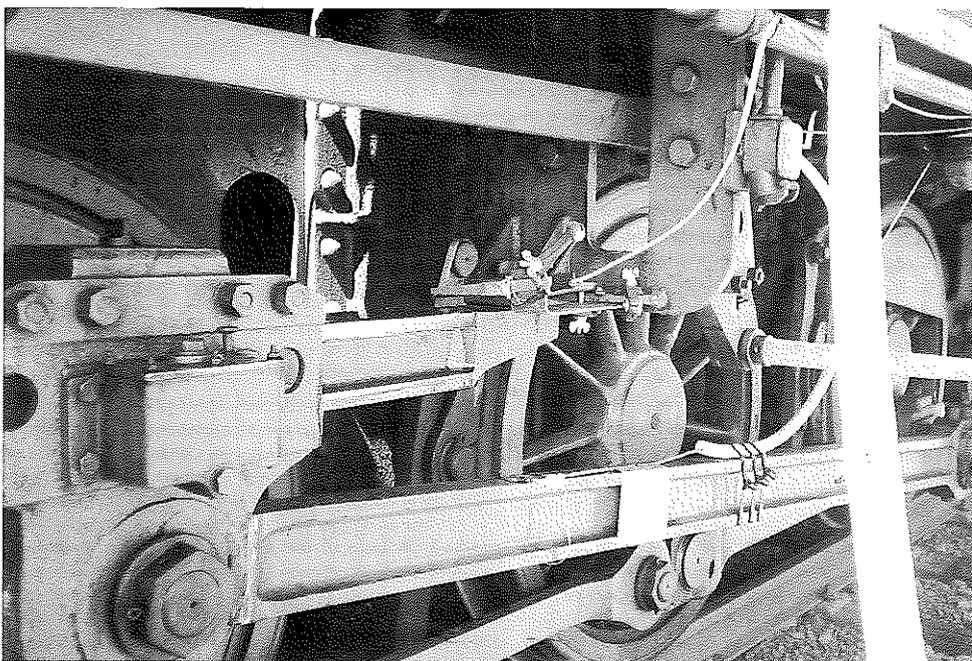
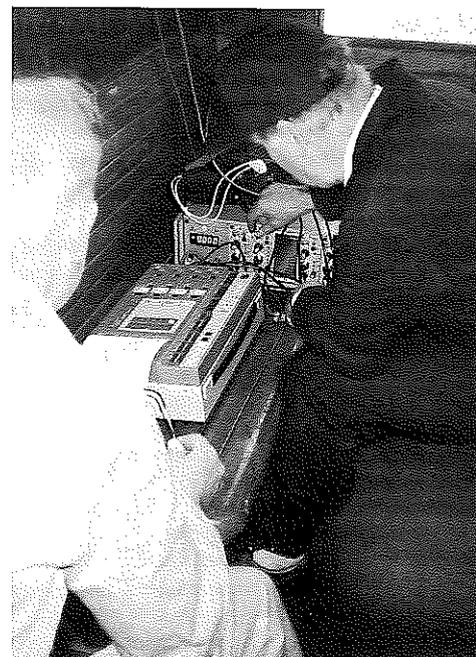
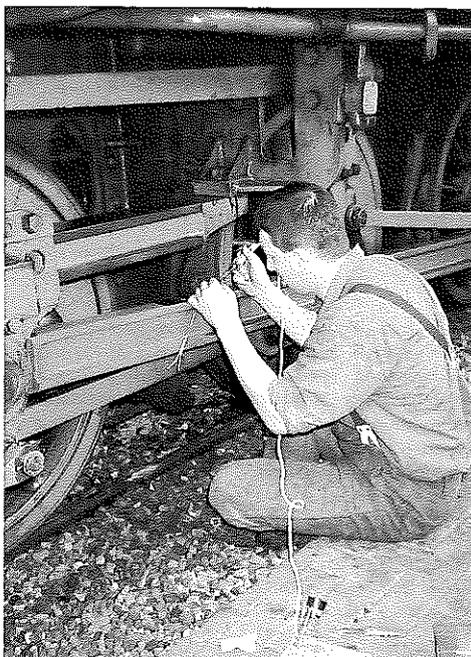
Im weiteren Verlauf der Strecke liegt zwischen Kirchseele und Groß-Ippener eine Steigung 1 : 80, bzw. 12,5 Promille. Diese Steigung wurde als Fahrt 5 Füllung 20 % mit nahezu ganz geöffnetem Regler mit größerer Geschwindigkeit befahren.

### Auswertung der Messungen

Fahrt 1: Der Verlauf der Dehnungen während einer Radumdrehung wurde in 18 gleiche Teile geteilt, dort wurden die Dehnungswerte aufgemessen und auf einem Rechenblatt ausgewertet. Für die Lokomotive ergibt sich eine Leistung:

$PT = 32,8 \text{ kW}$ .

Es erhebt sich jetzt die Frage, wie weit diese Leistung vertrauenswürdig ist. Dazu ist der Wider-



*Oben links: Der auf die Triebstange aufgeklebte Dehnungsmeßstreifen wird mittels Löten angeschlossen.*

*Oben rechts: Die Meß- und Schreibgeräte werden in einem Personenwagen aufgestellt.*

*Mitte: Es sind nur wenige, leichte Eingriffe in die Maschine, die die Leistungsmessung über Dehnungsmeßstreifen ermöglichen. Kein Bohren und kein Schweißen verändert die historische Substanz. Hierin liegt ein erheblicher Vorteil der Methode.*

*Unten: Fertig, nun muß nur noch angeheizt und ein Zug angehängt werden. Dann kann es losgehen.*

*Harpstedt, 23. und 25. 6. 1994*



stand des Wagenzuges berechnet worden, wobei zunächst nach Lit.(2) eine Formel von Strahl für den Laufwiderstand von Wagen mit Gleitlagern in Relation zum Zuggewicht benutzt wurde (etwas modifiziert und auf das Internationale Einheitensystem umgestellt):

$$\langle 6 \rangle w_l = 20 + (0,007 + d) \times (v^2 / 10) \text{ in [N/t].}$$

Mit  $d = 0,033$  für gewöhnliche Personenzüge und mit  $v = 26,2 \text{ km/h} = 7,28 \text{ m/s}$  erhält man:

$$w_l = 22,7 \text{ N/t}$$

$$\text{und: } W_l = w_l \times m_z = 22,7 \text{ N/t} \times 88 \text{ t} = 2.000 \text{ N}$$

Da bei gleichbleibender Fahrgeschwindigkeit die effektive Zugkraft  $Z_e$  der Lokomotive gleichgroß dem Laufwiderstand  $W_l$  des Zuges sein muß, läßt sich die effektive Leistung  $P_e$  aus dem Laufwiderstand berechnen nach  $\langle 2 \rangle$ :

$$P_e = Z_e \times v = 2000 \text{ N} \times 7,28 \text{ m/s} = 14,6 \text{ kW.}$$

Die Leistungen und Zugkräfte der Lokomotive wurden nach einem Verfahren durchgerechnet, das Giesl-Gieslingen (Lit. (3)) angegeben hat. Danach hat die Maschine einen mechanischen Wirkungsgrad  $\eta_{MECH} = 0,87$ , was zwar sehr hoch, angesichts des Fehlens eines Tenders und von Laufachsen aber nicht unmöglich ist.  $\eta_{MECH}$  ist das Verhältnis  $P_i/P_e$ , für  $PT/P_e$  müßte  $\eta_{MECH}$  etwas größer sein, da  $PT$  um einige Verluste (Kolben-, Stopfbuchsen- und Kreuzkopfreibung) kleiner als  $P_i$  ist. Sieht man aber davon einmal ab, so wäre lokomotivseitig:

$$P_e = P_i \times \eta_{MECH} = 32,8 \text{ kW} \times 0,87 = 28,5 \text{ kW.}$$

Offenbar ist also der Laufwiderstand des Zuges erheblich größer als angenommen, das ist angesichts des Zustandes der befahrenen Strecke auch denkbar. Um einen Anhalt für die möglichen Verluste zu erhalten, sei Lit.(2) herangezogen. Dort sieht man, daß der Widerstandsbeiwert für sehr schlecht unterhaltene Strecken bei einer Geschwindigkeit von etwa  $25 \text{ km/h}$  um etwa  $40 \%$  über dem von Vollbahnen für geringe Fahrgeschwindigkeiten liegen kann. Dies gilt für Zug und Lokomotive. Damit erhält man:

$$P_{eZug} = 2000 \text{ N} \times 1,4 \times 7,28 \text{ m/s} = 20,4 \text{ kW,}$$

$$P_{eLok} = 32,8 \text{ kW} \times 0,87 / 1,4 = 20,4 \text{ kW.}$$

Danach sind also  $P_{eLok}$  und  $P_{eZug}$  gleich, wie es sein muß. Diese Rechnung ist zwar mit einer gewissen Vorsicht zu bewerten, sie zeigt aber doch, daß die ermittelte Leistung der Lokomotive in einer möglichen Größenordnung liegt.

Bei der Bewertung dieses Ergebnisses darf man aber nicht außer acht lassen, daß die effektive Leistung der Lok bei Fahrt 1 weniger als  $10 \%$  der Höchstleistung beträgt und daß die Dehnungen an der unteren Grenze dessen liegen, was man überhaupt noch messen kann. Die Messungen sind also wenig genau, und man kann durchaus nicht sagen, ob die Fehler sich gegenseitig ausgleichen werden.

Die Auswertung von Fahrt 2 erfolgte grundsätzlich wie die von Fahrt 1. Es ergab sich aber eine ganz wesentlich größere Leistung, die nicht zu erklären ist. Deshalb soll diese Meßreihe nicht weiter in Betracht gezogen werden.

Bei Fahrt 3 zeigte sich ein weiterer Leistungszuwachs. Er ist aber daraus zu erklären, daß sich der Zug schon in der Kurve vor Groß-Mackendstedt befand, was durch Auszählen der Radumdrehungen

seit dem Anfahren nachzuweisen ist. Es soll hier wieder wie bei Fahrt 1 der Vergleich der vom Zug verlangten und der von der Lokomotive erbrachten effektiven Leistungen  $P_e$  angestellt werden:

Der Krümmungswiderstand ist nach Lit.(2) anzunehmen zu:

$$\langle 7 \rangle w_k = [(1,584 \times s) + (1,034 \times A)] / R, \text{ in [N/t].}$$

Mit Spurweite  $s = 1,44 \text{ m}$ , mittlerem Achsstand  $A = 6,6 \text{ m}$ , Krümmungsradius  $R = 500 \text{ m}$  errechnet sich:

$$w_k = 18,2 \text{ N/t.}$$

Man muß aber wohl damit rechnen, daß sich auch der Krümmungswiderstand aufgrund der Gleislage um  $40 \%$  erhöht:

$$w_k = 18,2 \text{ N/t} \times 1,4 = 25,5 \text{ N/t.}$$

Der Krümmungswiderstand wird mit Zugmasse einschließlich Lokomotive ( $m_z = 88 \text{ t} + 42 \text{ t} = 130 \text{ t}$ ):

$$W_k = w_k \times m_z = 25,5 \text{ N/t} \times 130 \text{ t} = 3.320 \text{ N.}$$

Insgesamt ist der Widerstand in der Gleiskrümmung die Summe aus Krümmungswiderstand  $W_k$  und Laufwiderstand der Wagen  $W_l = 2.800 \text{ N}$ :

$$W_{kl} = W_k + W_l = 6.120 \text{ N.}$$

Betrachtet man die Verhältnisse einmal so, als ob der Krümmungswiderstand der Lokomotive dem Widerstand des Wagenzuges zuzuschlagen sei, so ist folgende effektive Leistung erforderlich:

$$P_{eZug} = W_{kl} \times v.$$

bei  $v = 25 \text{ km/h} = 6,94 \text{ m/s}$  ergibt sich:

$$P_{eZug} = 6120 \text{ N} \times 6,94 \text{ m/s} = 42,5 \text{ kW.}$$

Dem ist die effektive Leistung der Lokomotive gegenüberzustellen, wobei hier vom geraden Gleis auszugehen ist, da ihr Krümmungswiderstand ja schon in  $W_{kl}$  enthalten ist. Es ist dann:

$$P_{eLok} = 73 \text{ kW} \times 0,87 / 1,4 = 45,4 \text{ kW,}$$

was durchaus in der Größenordnung von  $P_{eZug}$  liegt.

Fahrt 4: Beim Auslaufen kehrt sich der Kraft- und Leistungsfluß in der Lokomotive um, d. h. jetzt treiben die Räder die Maschine an. Im Meßschrieb zeigt sich das ganz deutlich dadurch, daß die Dehnung während der ersten halben Radumdrehung im negativen Bereich liegt, während sie bei den anderen Schrieben dort immer positiv ist.

Die ermittelte Leistung von  $21 \text{ kW}$  ist die Leistung, die durch die Reibung von Kolben, Stopfbuchsen und Kreuzkopf vernichtet wird. Diese Reibungskräfte sind einigermaßen geschwindigkeitsunabhängig. Die gesamte Verlustleistung  $P'_e - P'_i$  beträgt bei  $v' = 29,1 \text{ km/h}$  etwa  $43 \text{ kW}$ , davon sind  $21 \text{ kW}$  etwa  $49 \%$ , nach Umrechnung auf  $v'$  würden es noch mehr werden. Für die genannten 3 Verlustquellen erscheint das zwar zu viel, jedoch passen die Werte größenordnungsmäßig zusammen. Überdies ist bei den winzigen, zugrunde liegenden Dehnungen erneut auf die Ungenauigkeit der Dehnungsmessung hinzuweisen.

Die Fahrt 5 führte als einzige bis in das Gebiet der vollen Leistung der Maschine. Es wird wieder die vom Zug verlangte Leistung der von der Lokomotive erbrachten Leistung gegenübergestellt:

Der Zusatzwiderstand infolge einer Steigung von

$12,5 \text{ Promille}$  ist nach einer einfachen Ableitung:

$$w_s = 125 \text{ N/t.}$$

Es wird wieder der Zusatzwiderstand der Lokomotive dem des Wagenzuges hinzugeschlagen, dann ist:

$$W_s = m_z \times w_s = 130 \text{ t} \times 125 \text{ N/t} = 16,3 \text{ kN,}$$

$$\text{und } W_l = 2,8 \text{ kN}$$

$$W_{ges} = W_s + W_l = 19,1 \text{ kN.}$$

Damit ist mit  $v = 32,8 \text{ km/h} = 9,11 \text{ m/s}$ :

$$P_{eZug} = 19,1 \text{ kN} \times 9,11 \text{ m/s} = 174 \text{ kW.}$$

Die Maschine leistete  $PT = 266 \text{ kW}$ , daraus erhält man mit dem um den Faktor  $1,4$  modifizierten mechanischen Wirkungsgrad:

$$P_{eLok} = 266 \text{ kW} \times 0,87 / 1,4 = 165 \text{ kW.}$$

Wenn der Streckenzustand etwas besser ist als bei den vorhergehenden Fahrten angenommen wurde, d. h. der Faktor  $1,4$  nicht ganz erreicht wird, so stimmen auch hier die abgegebene und die aufgenommene Leistung überein, d. h. die Messung ist als glaubwürdig anzusehen.

## Schlussfolgerungen

Wir folgern aus den angeführten Meß- und den daraus abgeleiteten Rechenergebnissen, daß Dehnungsmessungen an den Treibstangen ein Mittel sind, um die Leistung einer Dampflokomotive mit relativ einfachen Mitteln festzustellen. Vertrauenswürdig sind die Ergebnisse allerdings nur im Bereich der Höchstleistung, dies trifft aber für die meisten Leistungsmessungen zu.

Wichtig erscheint es auch zu sein, daß man aus den Meßschrieben Hinweise auf den Druckverlauf im Zylinder bekommt, insbesondere auf die Kompression, die Voreinströmung und die Voröffnung der Schieberkanäle. Eine nähere Auswertung in dieser Richtung, zu der auch die Frage der Wirkung der hin- und hergehenden Triebwerksmassen gehört, muß aber Fachleuten vorbehalten werden, die darin viel Erfahrung haben.

Unabhängig von den vorstehenden Schlüssen wären aber Vergleichsfahrten wünschenswert, bei denen die Leistung gleichzeitig über sorgfältiges Indizieren und über Dehnungsmessungen an den Treibstangen bestimmt würde. Sie würden sicher noch viele Hinweise zur Sicherung und Verbesserung der Ergebnisse liefern, vor allem auch die Verluste besser zu erfassen gestatten.

Die Verfasser danken den Delmenhorst — Harpstedter Eisenbahnfreunden, insbesondere den an der Durchführung der Meßfahrt direkt Beteiligten, sehr herzlich dafür, daß sie ihnen diese Untersuchung möglich gemacht haben.

## Literatur

- (1) Lehr, E., Dynamische Dehnungsmessungen an einer Lokomotiv-Pfeuelstange, Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 1938, S. 541
- (2) Henschel-Werke GmbH, Kassel (Hsg), Henschel Lokomotiv-Taschenbuch, Ausgabe 1960, Kassel und Düsseldorf 1960
- (3) Giesl-Gieslingen, A., Lokomotiv-Athleten, Wien 1976
- (4) Hoffmann, K., Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen, Darmstadt 1987