

# **DIE BESTIMMUNG DES GEMEINSAMEN ZUGFÖRDERUNGS- UND HEIZENERGIEVERSORGUNGS-LEISTUNGSBEDARFES BEI HOHEN FAHRGESCHWINDIGKEITEN**

Von

L. DULIN

Lehrstuhl für Schienenfahrzeuge, Technische Universität Budapest

(Eingegangen am 16. Oktober 1971)

Vorgelegt von Prof. Dr. K. HORVÁTH

## **I. Einleitung**

Der Reisekomfort von Personen- und Schnellzügen erfordert die Anordnung einer elektrischen Zugheizung und zentrale Energieversorgung. Dieser Umstand sowie die Zugförderung mit hohen Geschwindigkeiten erfordern immer vordringlicher die neue Ermittlung der Zugförderungs-, Hilfsbetriebs-, Zugheizungs- und anderer Leistungen, bei denen mit wachsenden Zuggewichten, Beschleunigungen und Endgeschwindigkeiten, d. h. mit zunehmenden Leistungen gerechnet und neben der elektrischen Heizung, der zentralen Energieversorgung auch der Betrieb in der warmen Jahreszeit der Klimaanlage der Reisezugwagen berücksichtigt werden soll.

Um die hohen Anforderungen zu befriedigen, werden Dieselmotoren mit immer höheren Leistungen gebaut; es arbeiten bereits 4000—5000 PS Hochleistungsdieselmotoren und in der nächsten Zukunft werden auch 6000 PS Einheiten auf den Markt gebracht werden. Der Einsatz von Gasturbinen mit noch höherer Leistung gilt auch nicht als zeitweilige Lösung; für Spezialaufgaben werden nämlich von einer zunehmenden Zahl der Eisenbahnen Gasturbinenschienenfahrzeuge eingesetzt.

Die Entwicklung von Hochleistungsmotoren und Gasturbinen ermöglichte, die Frage der Hauptmotorheizung von Eisenbahnzügen aufzuwerfen und eingehend zu erforschen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war, den Leistungsbedarf für die Zugförderung sowie für Energieversorgung vom Hauptdieselmotor zu bestimmen und die bei einem vorhandenen Lokomotivbestand gegebenen Möglichkeiten unter Berücksichtigung der Entwicklungstendenzen zu prüfen. Die Wirtschaftlichkeits- und sonstigen Auswirkungen einer Hauptmotorheizung werden jedoch nicht behandelt.

## **2. Das Prinzip der Berechnung**

Durch die Umfangszugkraft der Diesellokomotive wird bei der Zugkraftentfaltung — also bei der Beförderung des Zuges — der Fahrwiderstand

am Umfang des getriebenen Rades überwunden und die für die Beschleunigung erforderliche Zugkraft gedeckt.

Bei zunehmender Geschwindigkeit und konstanter Motorleistung verläuft die Umfangszugkraft gemäß der Funktion  $Z_k = f(1/V)$ , wobei der Fahrwiderstand mit der Funktion  $W = f(aV + bV^2)$  beschrieben wird. Die für die Beschleunigung verfügbare Beschleunigungskraft ( $Z_k - W$ ) nimmt fortlaufend ab, um schließlich den Wert gleich Null zu erreichen, wo sich der Gleichgewichtszustand einstellt. Unter gegebenen Bedingungen (Neigungsverhältnisse, Wind usw.) kann sich der Gleichgewichtszustand auch bei der Höchstgeschwindigkeit des Zuges einstellen. Der Gleichgewichtszustand wird durch ( $Z_k = W$ ) gekennzeichnet. Die für die Gleichgewichtsgeschwindigkeit erforderliche Antriebsleistung wird aus der Beziehung

$$P_h = \frac{W \cdot V_e}{270 \cdot \eta_a} \quad [\text{LE}] \quad (1)$$

bestimmt, dabei bedeuten

$a, b$  Konstanten

$Z_k$  die Zugkraft am Radumfang [kp]

$W$  den zur Gleichgewichtsgeschwindigkeit gehörenden Fahrwiderstand [kp]

$V$  eine Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]

$P_h$  die für die Zugbeförderung erforderliche Motorleistung [PS]

$V_e$  die Gleichgewichtsgeschwindigkeit [km/h]

$\eta_a$  den Wirkungsgrad der Kraftübertragung [—]

Die zu den Gleichgewichtsgeschwindigkeiten gehörenden Widerstände können z. B. auch mit folgenden Formeln berechnet werden [1]:

vierachsiger Reisezugwagen

$$w_0'' = 2 + 0,00025 V^2 \quad [\text{kp/Mp}] \quad (2)$$

$B_0' - B_0'$  — Diesellokomotive mit elektrischer Kraftübertragung

$$W_0' = 3G_m + 0,04 V^2 \quad [\text{kp}] \quad (3)$$

$B' - B'$  — Diesellokomotive mit hydrodynamischer Kraftübertragung

$$W_0' = 4G_m + 0,02 V^2 + 0,04 Z_k \quad [\text{kp}] \quad (4)$$

$C_0' - C_0'$  — Diesellokomotive mit elektrischer Kraftübertragung

$$W_0' = 3,3G_m + 0,04 V^2 \quad [\text{kp}] \quad (5)$$

$C' - C'$  — Diesellokomotive mit hydrodynamischer Kraftübertragung

$$W_0' = 4G_m + 0,032 V^2 + 0,04 Z_k \quad [\text{kp}] \quad (6)$$

Hierin bedeuten

$w_0''$	Widerstand je 1 Mp des Zuggewichts [kp/Mp]
$W_0'$	Widerstand der Lokomotiven [kp]
$V$	Fahrzeuggeschwindigkeiten [km/h]
$G_m$	Lokomotivengewichte [kp]
$Z_k$	Umfangszugkraft der Lokomotiven [kp].

Die aus der Gleichgewichtsgeschwindigkeit und dem Fahrwiderstand berechnete Triebleistung während der Beförderung des Zuges unterschreitet — bei einem Dieselmotor entsprechender Leistung — die für Zugförderung und Heizung erforderliche Leistung. Die Differenz läßt sich für die Heizung des beförderten Zuges verwenden. Die Änderung des Streckenwiderstands führt zur Änderung der notwendigen Triebleistung, d. h. die für die Heizung zur Verfügung stehende Leistung ist während der Beförderung des Zuges in ständiger Änderung begriffen. Auf einer horizontalen, geraden Strecke erreicht die Heizleistung einen gewissen Höchstwert, während sie unter gewissen Streckenverhältnissen auch gleich Null sein kann. Die Veränderung der für die Heizung verfügbaren Leistung bedeutet jedoch keinesfalls, daß die Fahrgastraumtemperatur der Wagen im Zug extremen Schwankungen unterworfen sei. Diese Temperatur ist von einer Anzahl der Faktoren abhängig, die hier nicht erörtert werden sollen.

### 3. Berechnung

Um die erforderliche Heizleistung zu bestimmen, werden der Einfachheit halber maßgebende Wagenzüge aus Fahrzeugen geprüft, die gegenwärtig — z. B. auch in Ungarn — verkehren oder in der nächsten Zukunft verkehren werden. Bei den Untersuchungen verfolgen wir den Weg, zunächst mit graphischer Methode [1] die Gleichgewichtsgeschwindigkeiten zu ermitteln, sodann in der bereits beschriebenen Weise [1—6] die für die Beförderung des Zuges erforderlichen Leistungen zu errechnen; schließlich wird festgestellt, ob die eingebauten Leistungen der ausgewählten Lokomotiven eine befriedigende Heizung der beförderten Züge ermöglichen; zugleich wird auch die Grenzleistung bestimmt, die für eine Hauptmotorheizung die untere Grenze darstellt. Bei den Berechnungen wird aus folgenden Bedingungen ausgegangen [2—8]:

- auf Nebenbahnen wird der Personenzugbetrieb, auf Hauptbahnen der Schnellzugbetrieb geprüft;
- die Züge bestehen aus vierachsigen Wagen;
- für Wagen im Binnenverkehr beträgt der durch den Fortschritt bedingte Heizenergiebedarf pro Stunde 35 kWh;
- für ausländische, luftkonditionierte Wagen erreicht der Heizenergiebedarf 50 kWh pro Stunde;

Tabelle 1

Bezeichnung	Maßeinheit	1	2	3	4
Leistung der Diesellokomotive	[PS]	760	1200	1200	1800
Hilfsbetriebs-Leistungsbedarf	[PS]	90	100	100	130
Dienstgewicht der Lokomotive	[Mp]	48	72	64	76
Zusammensetzung des Zuges		5 Rzw	8 Rzw	8 Rzw	8 Rzw
Zuggewicht	[Mp]	245	360	360	360
Leistungsbedarf für Zugheizung	[PS]	238	380	380	380
Motorleistungsbedarf für Heizung	[PS]	285	457	457	457
Gleichgewichtsgeschwindigkeiten ohne Heizung					
0‰		70*	95	94,5	113,5
3‰		66	73,5	73	94
5‰	[km/h]	56,5	61	60	81,5
10‰		36	41	36,2	59
mit Heizung					
0‰		—	—	—	99,5
3‰		—	—	—	79
5‰	[km/h]	—	—	—	66,5
10‰		—	—	—	46
Zulässige fahrplänmäßige Grund- geschwindigkeit	[km/h]	64	90	90	100/95
Bemerkung		*zugelassene Geschwindig- keit der Loko- motive			

Rzw = Reisezugwagen

- der Energiebedarf für Speisewagen im Binnenverkehr ist 70 kWh pro Stunde;
- der Energiebedarf pro Stunde ausländischer Speisewagen erreicht 100 kWh;
- Neigungsverhältnisse: 0; 3; 5 und 10‰;
- fahrplanmäßige Grundgeschwindigkeiten: auf Nebenbahnen 65 km/h, auf Hauptbahnen 100 km/h, auf Hauptbahnen (internationale Schnellzüge) 120 km/h;
- Zugbelastungen: Personenzug — fünf Wagen, Schnellzug (inländisch) — acht Wagen, Schnellzug (international und inländisch) — zwölf Wagen, Schnellzug (international) — sechzehn Wagen;
- untersuchte Lokomotiven:

760 PS Dieselhydraulisch	1800 PS Dieselhydraulisch
1200 PS Dieselelektrisch	2400 PS Dieselelektrisch
1200 PS Dieselhydraulisch	2700 PS Dieselelektrisch
1800 PS Dieselelektrisch	3150 PS Dieselelektrisch

5	6		7	8		
1800	2400	2400	2700	3150	3150	3150
130	210	210	300	300	300	300
76	84	84	120	120	120	120
12 Rzw	8 Rzw	11 Rzw + 1 Spw	11 Rzw + 1 Spw	12 Rzw	11 Rzw + 1 Spw	15 Rzw + 1 Spw
540	360	540	540	540	540	720
571	380	620	620	620	885	810
686	457	745	755*	745	1060	970
99,5	129,5	115	121,5	127	127	113
78	109	92	100	103	103	91
65,5	97	79	85,5	91	91	78
43	72	55	62,5	66	66	54
80	119	97,5	105,5	113	106	98
57	98	74,5	85	89	81	74
45,5	85	61	72	77	68	61
30,5	61	41	48,5	53	48	41
95/—	120/110	110/95	115/100 *Nennleistung des Heizgenerators	120/120	120/105	110/95

Spw = Speisewagen

— Wirkungsgrade der Heizenergieerzeugung und -verteilung:

$$\eta_{\text{Generator}} = 0,85; \quad \eta_{\text{Übertragung}} = 0,98; \quad \eta_{\text{Verteilung}} = 0,83;$$

- bei der Zugkraftberechnung wurden die Hilfsbetriebsleistungen mit dem Vorbehalt berücksichtigt, daß nicht alle Hilfsmaschinen gleichzeitig mit maximaler Leistung arbeiten;
- bei vorhandenen Lokomotiven verläuft der Wirkungsgrad der Übertragung der tatsächlichen Lage gemäß, in anderen Fällen beträgt er im ganzen Geschwindigkeitsbereich  $\eta_a = 0,75$ ;
- während der Beschleunigung liefert die Lokomotive keine Heizenergie. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

#### 4. Schlußfolgerungen

Aus den Angaben in Tabelle 1 lassen sich folgende Feststellungen machen:

Zu 1. Die 760 PS-Diesellokomotive für Nebenbahnen kann im Nebenbahnverkehr ohne Hauptmotorheizung mit dem maßgebenden Personenzug

gerade die zulässige fahrplanmäßige Grundgeschwindigkeit halten. Die eingebaute Motorleistung ist selbst bei etwaiger verminderter Heizleistung für die Einhaltung einer Geschwindigkeit, die als zeitgemäß gelten dürfte, ungeeignet,

Zu 2 und zu 3. Die 1200 PS Hauptbahn-Diesellokomotiven sind im Hauptbahndienst mit dem maßgebenden Schnellzug selbst ohne Heizung unfähig, eine Geschwindigkeit von 100 km/h zu erreichen. Diese Lokomotiven sind wegen der unzulänglichen eingebauten Leistung für Zugheizung nicht geeignet.

Zu 4 und zu 5. 1800 PS-Hauptbahn-Diesellokomotiven sind mit dem maßgebenden Zug aus acht Wagen für das Halten einer fahrplanmäßigen Grundgeschwindigkeit von 100 km/h ohne Heizung und von 95 km/h mit Heizung geeignet. Für die Beförderung von maßgebenden Zügen aus zwölf Wagen mit zeitgemäßen Hauptbahngeschwindigkeiten sind sie auch ohne Heizung ungeeignet. Es läßt sich jedoch feststellen, daß die Leistung von 1800 PS für die Beförderung und Heizung von kürzeren Zügen ausreicht, wenn keine häufigen Anfahrten erforderlich sind und die Züge keinen Speisewagen führen. Der Dieselmotor arbeitet auf dem gesamten Traktionsabschnitt in der Umgebung der Nennleistung, und die geringste Störung im fahrplanmäßigen Verkehr kann zum Ausgangspunkt wachsender Verspätungen werden.

Zu 6. Die 2400-Hauptbahn-Diesellokomotive eignet sich mit einem maßgebenden Zug aus acht Wagen zum Einhalten einer modernen fahrplanmäßigen Grundgeschwindigkeit sowohl ohne wie auch mit Heizung. Ist nur eine fahrplanmäßige Grundgeschwindigkeit von 95 km/h erforderlich, kann diese Lokomotive auch den Heizbedarf eines Zuges mit zwölf Wagen (einem Speisewagen) decken.

Zu 7. Die 2700 PS-Hauptbahn-Diesellokomotive ist imstande, mit einem maßgebenden Zug aus elf Wagen die zeitgemäßen, fahrplanmäßigen Grundgeschwindigkeiten einzuhalten, u. U. die Störungen im Fahrplan zu beheben. Dabei sind auch für den Dieselmotor günstige Betriebsbedingungen gewährleistet.

Es läßt sich also feststellen, daß für die Beförderung von Schnellzügen mit mittleren und großen Zuglasten im Binnenverkehr der Einsatz von mindestens 2700 PS starken Diesellokomotiven erforderlich ist.

Zu 8. In der nächsten Zukunft sollen die internationalen Schnellzüge Geschwindigkeiten von 160 km/h und darüber erreichen; diese Züge müssen mit zunehmenden Beschleunigungen befördert werden und bei den Höchstgeschwindigkeiten hinreichende Beschleunigungsreserven haben, um auch in Steigungen die Höchstgeschwindigkeit halten zu können. Diese Forderung läßt sich lediglich durch den Einsatz von Lokomotiven mit Leistungen über 3150 PS erfüllen.

Um das Gesagte nachzuweisen, wurden in Abb. 1 auf der Grundlage früherer Berechnungen des Verfassers, mit den technischen Daten eines auf gerader Strecke in der Ebene fahrenden Zuges von 400 Mp Gewicht und einer

$C'_0$ — $C'_0$ -dieselelektrischen Lokomotive, die Kurven der spezifischen Zugkraft und des spezifischen Widerstands in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt, wobei als Parameter die spezifische Leistung gewählt wurde.

Aus der Abbildung ist zu erkennen, daß bei der Geschwindigkeit von 160 km/h, z. B. auf einer Strecke mit 5‰ Steigung eine zusätzliche spezifische Zug-

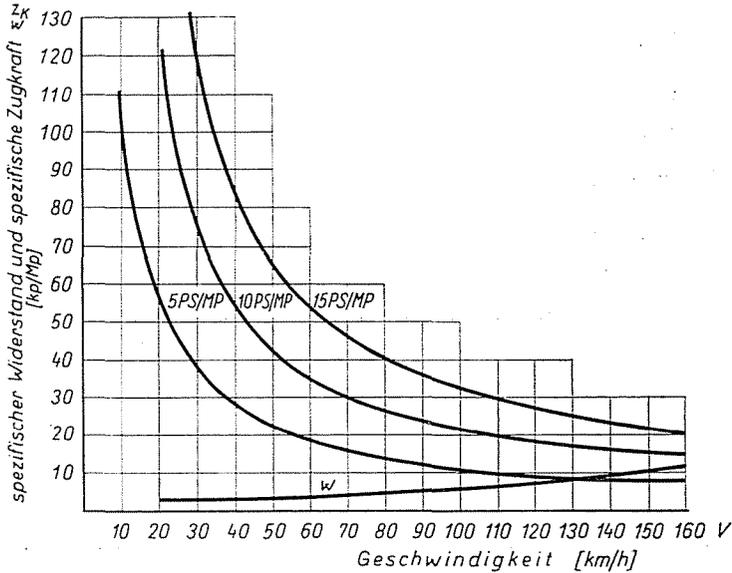


Abb. 1

kraft in der Höhe von 5 kp/Mp erforderlich ist, um den Widerstand von 5 kp/Mp zu überwinden, was eine spezifische Leistung von 12 PS/Mp vorstellt. Mit guter Näherung beträgt also der Leistungsbedarf eines internationalen Schnellzugs 6000 PS für Zugförderung und 885 PS für Heizung [8]. In Abb. 2 ist durch das Geschwindigkeit — Wegdiagramm die Wichtigkeit eines derartigen Leistungsbedarfs und die Bedeutung der Anpassung an die den ungarischen Verhältnissen entsprechenden Geschwindigkeiten eindeutig gerechtfertigt. Es ist zu erkennen, daß der maßgebende Zug von vorhin bei 5 PS/Mp spezifischer Leistung die Geschwindigkeit von 100 km/h auf einem etwa 4 km langen Weg, 120 km/h auf einem etwa 11 km langen Weg erreicht. Bei einer spezifischen Leistung von 10 PS/Mp beträgt jedoch der für die Beschleunigung erforderliche Weg nur 1,5 bzw. 3,2 km. Der bedeutende Wegunterschied ist selbstverständlich mit einem bedeutenden Unterschied in den Fahrzeiten verbunden.

Daher lassen sich also die Beförderung mit 120 km/h von mittler- und hochbelasteten Schnellzügen im inländischen Verkehr, die Beförderung mit 160 km/h der internationalen Schnellzüge und deren Hauptmotorheizung nur

durch eine wesentliche Erhöhung der Leistung erzielen. Dieser Umstand erfordert in der nächsten Zukunft den Einsatz von 4000–5000 PS-Diesellokomotiven und für Aufgaben mit noch höherem Leistungsbedarf von 7000–8000 PS elektrischen Lokomotiven.

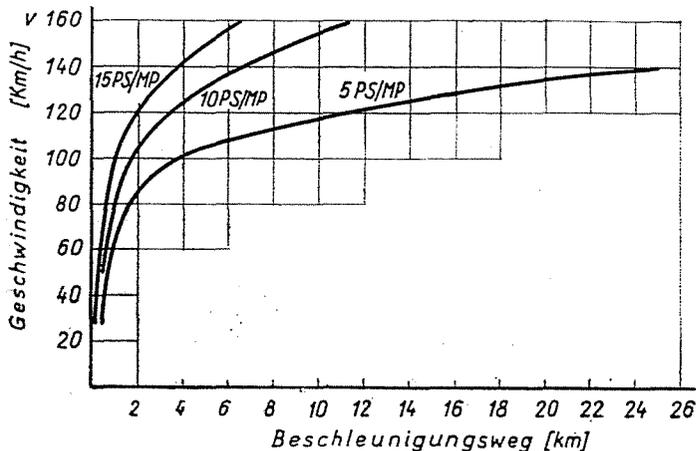


Abb. 2

### Zusammenfassung

Von einem vorhandenen Diesellokomotivenbestand und den üblichen Zuglasten ausgehend wird die Möglichkeit der Einhaltung einer zeitgemäßen, fahrplanmäßigen Grundgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Zugheizung durch den Hauptmotor geprüft und es werden die erforderlichen Leistungen bestimmt. Unter Berücksichtigung der europäischen Praxis werden die zweckmäßigen Geschwindigkeiten, die notwendigen Beschleunigungen sowie die für deren Realisierung erforderlichen Leistungen festgestellt.

### Literatur

1. PÁPAY, I.: Fahrdynamik des Schienenverkehrs.\* Lehrstoffheft.
2. KNAU, H.: Die zentrale elektrische Energieversorgung von Reisewagen. Glasers Annalen 1966/10.
3. HACKSTEIN, J.: Die elektrische Heizung bei Dieselzugförderung. Elektrische Bahnen 1967/5.
4. GAEBLER, A.: Diesellokomotiven der DB mit Stromerzeuger für die elektrische Zugheizung. ETR 1964/11.
5. MARTIN, P.: La Chauffage des Trains et la Traction Diesel. Revue Générale des Chemins de Fer 1963/9.
6. BÖHM, F.: Heizung, Lüftung und Klimatisierung von Reisezugwagen, Rückblick und Ausblick. Die Bundesbahn 1964/7.
7. ALTMANN, L.: Zur Frage der Zugheizung bei Zugförderung mit Diesellokomotiven. Österreichische Ingenieur Zeitschrift 1967/2.
8. MEZEI, I.: Energieversorgung der elektrischen Zugheizung bei Dieselzugförderung.\* Közlekedéstudományi Szemle, 2/1967.

\* In ungarischer Sprache.

László DULIN, 1502 Budapest, Postfach 91, Ungarn

