

# Dimensionierung von batteriegespeisten Lokomotiven

Autor(en): **Aslaksen, E. W.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **71 (1980)**

Heft 1

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-905194>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Dimensionierung von batteriegespeisten Lokomotiven

Von E. W. Aslaksen

621.335.2-835

*Batteriegespeiste Schmalspurbahnen mit einer Förderkapazität von etwa 100 Personen und Nennleistungen um 50 kW finden zunehmende Anwendung auf Messegeländen, in Vergnügungsanlagen usw. In der vorliegenden Arbeit werden zuerst die hauptsächlichen Berechnungsgrundlagen betrachtet. Um aber aus den allgemeinen Ausdrücken einige nützliche Tatsachen klarer zu machen, werden typische numerische Werte für Parameter wie Wirkungsgrad und Reibungskoeffizient eingesetzt. Es zeigt sich, dass die Nenngeschwindigkeit des Zuges eine sehr empfindliche Grösse ist. Ab einem Wert von 5...10 m/s steigen die Kosten für eine weitere Geschwindigkeitserhöhung sehr stark an, so dass es eine deutliche wirtschaftliche Optimalgeschwindigkeit gibt.*

*Sur des terrains de foires, dans des parcs d'attractions, etc. on trouve souvent des chemins de fer à voie étroite avec engins de traction alimentés par batterie, d'une puissance d'environ 50 kW et dont chaque convoi peut transporter une centaine de personnes. L'auteur considère tout d'abord les principales bases de calcul, introduisant ensuite des valeurs numériques typiques de rendement et de coefficient de frottement, pour pouvoir déduire des indications pratiques. La vitesse nominale du convoi est une grandeur très sensible, car, au-delà de 5 à 10 m/s, le coût d'un accroissement augmente considérablement, de sorte qu'il existe une vitesse économique optimale.*

## 1. Einleitung

Bei schienengebundenem Verkehr fallen die Antriebssysteme in zwei Gruppen, je nachdem ob die Fahrenergie mitgeführt oder laufend zugeführt wird. Zur ersten Gruppe gehören Dampf- und Diesellokomotiven sowie batteriegespeiste Lokomotiven, zur zweiten elektrische Lokomotiven mit Fahrdrat oder Stromschiene (Metro). Die batteriegespeiste Lokomotive wurde bis heute vorwiegend für den Bergbau unter Tage und auf gewissen Werkarealen eingesetzt, wo ein stromführender Leiter unzulässig wäre. Eine weitere Anwendung findet man auf Messegeländen, in weit ausgedehnten Shopping-Centern usw., wo die Emissionen einer Diesellokomotive unerwünscht sind, und ein stromführender Leiter unpraktisch wäre. Es sind vor allem die Anwendungen in dieser Gruppe, die im folgenden besprochen werden. Typische Werte einer solchen Anlage sind etwa: Gesamtfahrstrecke 5 km, 4...6 Haltestellen, Gesamtgewicht des beladenen Zuges 30 t und eine Passagierkapazität von 120 Personen; Antriebsleistung 40 kW und Höchstgeschwindigkeit 20 km/h. Es sind also ganz andere Werte, als man bei Vollbahnen antrifft.

Das Problem des batteriegespeisten Antriebs liegt in der relativ kleinen Energiedichte der heute verwendeten Bleiakkumulatoren. Sie beträgt nur etwa 15...30 Wh/kg, verglichen mit etwa 4 kWh/kg für Dieselöl. Damit wird die Minimalisierung des Batteriegewichts zu einer zentralen Aufgabe bei der Dimensionierung einer batteriegespeisten Lokomotive. In diesem Zusammenhang ist auch zu beachten, dass die Einsatzgebiete der batteriegespeisten Lokomotiven fast immer zu relativ kurzen Fahrstrecken zwischen zwei Haltestellen führen, so dass die Beschleunigungsphase stark ins Gewicht fällt. Dagegen sind die Fahrstrecken meistens ohne wesentliche Steigung, so dass eine Rekuperation nicht wirtschaftlich ist. Dies könnte sich allerdings mit den sinkenden Preisen für Leistungselektronik bald ändern.

In den nächsten Jahren werden voraussichtlich neue und verbesserte Batterietypen auf den Markt kommen, und damit

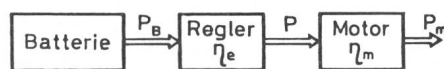


Fig. 1 Leistungsfluss

- $P_B$  der Batterie entnommene Leistung
- $P$  von den Antriebsmotoren aufgenommene Leistung
- $P_m$  mechanische Leistung
- $\eta_e$  Wirkungsgrad der Leistungselektronik
- $\eta_m$  Wirkungsgrad der Antriebsmotoren

werden die wirtschaftlichen Anwendungsmöglichkeiten zunehmen. Es scheint deshalb im jetzigen Moment angezeigt, die Dimensionierung von batteriegespeisten Lokomotiven etwas näher zu untersuchen [1; 2; 3; 4].

## 2. Definitionen

Als *Nennleistung*  $P_n$  der Lokomotive wird, abweichend von der üblichen Definition, die elektrische Eingangsleistung der Antriebsmotoren verstanden. Bei fremderregten Motoren, die bei elektronisch geregelten Gleichstromantrieben oft verwendet werden, und die im folgenden vorausgesetzt werden, gilt deshalb mit Ankerstrom und Ankerspannung

$$P_n = [U_a \cdot I_a]_{\text{Nennbetrieb}} = U_n \cdot I_n \quad (1)$$

Diese Definition ist sinnvoll, denn damit ist  $P_n$  zugleich die Nennleistung der für die Geschwindigkeitsregelung eingesetzten Leistungselektronik. Bei Nennbetrieb der Antriebsmotoren wird der Zug eine bestimmte Geschwindigkeit haben, die als *Nenngeschwindigkeit*  $v_n$  bezeichnet wird. Bei fremderregten Motoren wird diese nur wenig unterhalb der Maximalgeschwindigkeit liegen. Als *Nennschub*  $F_n$  wird die Grösse

$$F_n = P_n \eta_{mn} / v_n \quad (2)$$

bezeichnet.

Betrachtet man den Leistungsfluss von der Batterie bis zur Schiene (Fig. 1), so bestehen die folgenden Zusammenhänge:

$$\eta_m = P_m / (U_a I_a) \quad (3)$$

$$P_B = I_B \cdot U_B \quad (4)$$

wobei  $P_{Bn}$  die aus der Batterie bei Nennbetrieb entnommene Leistung ist, also

$$P_{Bn} = P_n / \eta_{en} \quad (5)$$

Nun wird die Leistung der Batterie nicht gleichmässig entnommen, sondern mit stark variierenden Stromstärken. Es ist deshalb zweckmässig, einen *Belastungsfaktor*  $q$  einzuführen,

$$q = \frac{\int_0^{T_A} P_B dt}{P_n T_A} \quad \text{bzw.} \quad q = \frac{\int_0^{T_A} P / \eta_e dt}{P_n T_A}, \quad (6)$$

wobei  $T_A$  die Betriebszeit zwischen Aufladungen ist. Damit ist die erforderliche Batteriekapazität  $Q$  gegeben durch

$$Q = q P_n T_A \quad (7)$$

Der Zug besteht aus einer Lokomotive und einigen Wagen, die Lokomotive mit einer Leermasse  $m_1$ , die Batterien mit einer Masse  $m_2$ . Die leeren Wagen haben zusammen die Masse  $m_3$ , und schliesslich beträgt die Nutzlast  $m_4$ . Die gesamte Masse des Zuges beträgt also  $m = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$ .

Wird der Reibungskoeffizient mit  $\alpha$  bezeichnet, so ist der Bahnwiderstand gegeben durch

$$F_r = \alpha m \quad (8)$$

Für die hier in Frage kommenden Geschwindigkeiten, unter 30 km/h, ist der Widerstand praktisch von der Geschwindigkeit unabhängig.

### 3. Berechnung der optimalen Nenngeschwindigkeit

Die Lokomotive wird während einer Betriebsperiode von Dauer  $T_A$  eine mehr oder weniger regelmässige Folge von Anfahrten, Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit, Bremsen, Stillstand, wieder Anfahren usw. durchführen. Um die verschiedenen Streckenverhältnisse sowie das unterschiedliche Verhalten der einzelnen Lokfahrer auf einen Nenner zu bringen, müssen gewisse vereinfachende Annahmen getroffen werden. Das Fahrprogramm wird als periodisch angesehen, wobei jede Periode aus einem Fahr-Teil und einem Stillstands-Teil besteht (Fig. 2). Es wird angenommen, dass die Beschleunigungs- und Bremsphasen je  $T_b$  dauern und auch eine gleich lange Strecke  $L_b$  beanspruchen.

Die Beschleunigungsphase ist in Fig. 3 separat dargestellt. Es wird angenommen, dass der Ankerstrom mit dem doppelten Nennstrom anfängt und dann linear bis auf den Nennstrom absinkt. Dies entspricht einer Fahrweise, die sowohl eine wirtschaftliche Entladung der Batterie, ohne zu hohe Stromspitzen, als auch eine relativ knappe Bemessung der Leistungselektronik zulässt. Der Schub ergibt sich daraus zu

$$F = (2 - t/T_b) F_n - \alpha \cdot m \quad (9)$$

Durch Integration erhält man für die Geschwindigkeit

$$v = -t^2 \frac{F_n}{2 T_b m} + t(2 F_n/m - \alpha)$$

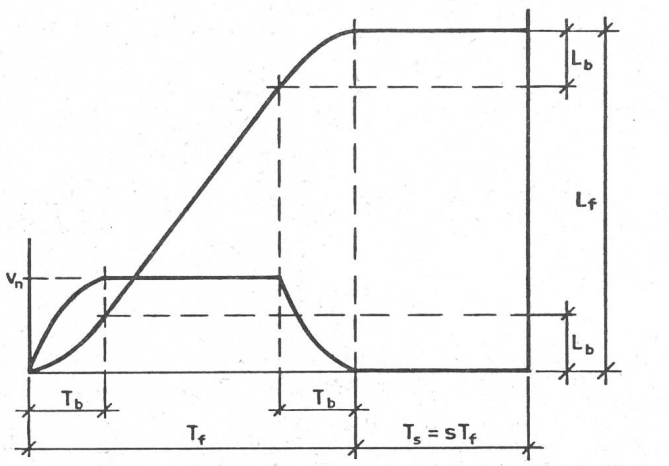


Fig. 2 Weg und Geschwindigkeit als Funktionen der Zeit während einer Periode

$L_t, T_f$  Fahrtstrecke bzw. Fahrdauer  
 $L_b, T_b$  Beschleunigungs- und Bremsstrecke bzw. entsprechende Zeit  
 $T_s$  Haltezeit  
 $v_n$  Nenngeschwindigkeit

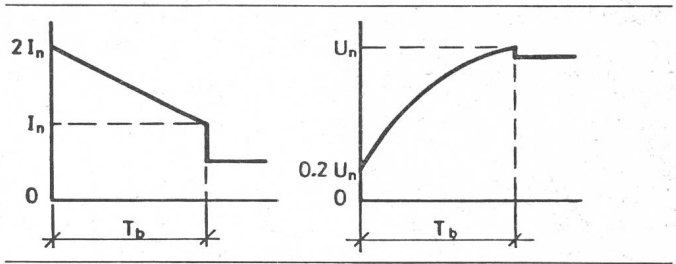


Fig. 3 Ankerstrom und Ankerspannung während der Beschleunigungsphase  
 Index n Nennwerte

und, da  $v(T_b) = v_n$  ist, gilt die Beziehung

$$T_b = v_n / (3/2 a_n - \alpha) \quad (10)$$

mit der Beschleunigung  $a_n = F_n/m$ .

Ebenso folgt der Weg  $L_b$  durch Integration

$$L_b = T_b^2 \left( \frac{5}{6} a_n - \frac{\alpha}{2} \right)$$

oder mit Gl. 10:

$$L_b = \frac{v_n^2}{\left( \frac{3}{2} a_n - \alpha \right)^2} \left( \frac{5}{6} a_n - \frac{\alpha}{2} \right) \approx 0,57 \frac{v_n^2}{1,5 a_n - \alpha} \quad (11)$$

Zwischen dem Beschleunigen und dem Bremsen wird mit konstanter Geschwindigkeit  $v_n$  gefahren. Die gesamte Fahrzeit  $T_f$  beträgt somit

$$T_f = 2 T_b + (L_t - 2 L_b) / v_n = \frac{0,86 v_n}{1,5 a_n - \alpha} + \frac{L_t}{v_n}$$

Jetzt soll  $v_n$  so gewählt werden, dass die Fahrzeit  $T_f$  bei konstanter Nennleistung  $P_n$  minimal wird. Dies ist eine in der Praxis oft gestellte Bedingung, da die kleinen Geschwindigkeiten solcher Bahnen ohnehin ein Problem darstellen. Mit  $a_n = F_n/m = \eta_m P_n / v_n m$

$$\text{wird } T_f = \frac{0,86 v_n^2}{1,5 \eta_{mn} P_n / m - \alpha v_n} + \frac{L_t}{v_n}$$

$$\text{und } \frac{\partial T_f}{\partial v_n} = \frac{2,58 \eta_{mn} P_n v_n / m - 0,86 \alpha v_n^2}{(1,5 \eta_{mn} P_n / m - \alpha v_n)^2} + \frac{L_t}{v_n^2}$$

Die Bedingung  $\partial T_f / \partial v_n = 0$  führt zur Beziehung

$$L_t = \frac{2,58 \eta_{mn} P_n v_n^3 / m - 0,86 \alpha v_n^4}{(1,5 \eta_{mn} P_n / m - \alpha v_n)^2} \quad (12)$$

Bis hierher sind die Berechnungen von allgemeiner Natur. Da aber Gl. (12) in dieser Form etwas kompliziert ist und da es in dieser Arbeit mehr um das Prinzipielle als um die exakten numerischen Werte geht, ist es zweckmässig, zwei vereinfachende Annahmen zu treffen, nämlich  $\eta_{mn} \approx 0,85$ ,  $\alpha \approx 0,06$  N/kg.

Ferner soll die Grösse  $p = P_n/m$  (W/kg) eingeführt werden. Dann vereinfacht sich Gl. (12) zu

$$L_t = \frac{2,2 p v_n^3 - 0,05 v_n^4}{(1,3 p - 0,06 v_n)^2} \quad (13)$$

In Fig. 4 ist diese Beziehung graphisch dargestellt.

Wenn  $L_t$  und  $p$  festliegen, kann  $v_n$  durch diese Resultate bestimmt werden, d.h. die Übersetzung des Getriebes wird bestimmt. Wenn nachfolgend nichts anderes erwähnt ist, wird  $v_n$  immer nach diesem Kriterium gewählt.

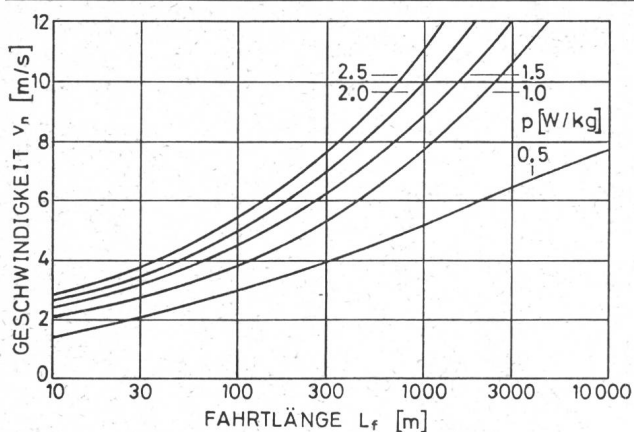


Fig. 4 Beziehung zwischen  $L_f$ ,  $p$  und  $V_n$   
 $p = P_n/m$  auf die Masse des Zuges bezogene Nennleistung

#### 4. Berechnung des Belastungsfaktors

Zuerst wird die Beschleunigungsphase (Fig. 3) betrachtet. Für die Ankerspannung  $U_a$  soll die folgende Beziehung gelten:

$$U_a = U_n (0,9 v/v_n + 0,1 I/I_n) \quad (14)$$

Indem man die Beziehung für  $v$ ,

$$v = (2 a_n - \alpha) t - a_n t^2 / 2 T_b \quad (\text{nach Gl. 9})$$

und die vorher gefundenen numerischen Werte für das Verhältnis  $p/v_n$  benützt ( $0,15 \leq p/v_n \leq 0,3$  für typische Anwendungsfälle), kann die Geschwindigkeit in der Beschleunigungsphase als

$$v = v_n (1,44 x - 0,44 x^2)$$

mit  $x = t/T_b$ , geschrieben werden. Damit ist die Ankerspannung

$$U_a \approx U_n (0,2 + 1,2 x - 0,4 x^2).$$

Ist der mittlere Wirkungsgrad der Leistungselektronik während der Beschleunigungsphase gleich  $\bar{\eta}_e$ , so ist der Energieverbrauch in diesem Zeitraum

$$W_{B1} = \frac{1}{\bar{\eta}_e} \int_0^{T_b} U_a I_a dt = \frac{0,93}{\bar{\eta}_e} P_n T_b.$$

Ist der Regler ein Schaltregler, so dürfte  $\eta_{en} = 0,8$  und  $\bar{\eta}_e = 0,7$  etwa zutreffen. Mit dem Ausdruck  $T_b = v_n^2 / (1,3 p - 0,06 v_n)$  und der kinetischen Energie  $W_n = mv_n^2/2$ ,

$$\text{wird } W_{B1} \approx \frac{2,7 p}{1,3 p - 0,06 v_n} W_n. \quad (15)$$

Daraus folgt als grobe Näherung

$$W_{B1} \approx 2,5 W_n \quad (16)$$

was die am Anfang gemachte Bemerkung über die dominierende Bedeutung der Beschleunigungsphase illustriert.

Um den Energieverbrauch während der gleichmässigen Fahrt zu bestimmen, wird zuerst das Verhältnis  $L_b/L_f$  gebildet. Aus den früheren Ergebnissen entsteht

$$\frac{L_b}{L_f} = \frac{0,72 p v_n^3 - 0,034 v_n^4}{2,2 p v_n^3 - 0,05 v_n^4}, \quad (17)$$

und wiederum lässt sich eine Näherung finden:

$$L_b/L_f \approx 0,28 \quad (18)$$

Die der Batterie entnommene Leistung ist  $P_B = \alpha m v_n / \eta_{en} \eta_{mn}$ . Diese Leistung fliesst während einer Zeit ( $T_f - 2 T_b$ ), so dass

$$W_{B2} = \alpha m v_n (T_f - 2 T_b) / \eta_{en} \eta_{mn} \quad (19)$$

Die gesamte Periodendauer ist gleich  $T_f (1 + s)$ , da  $T_s = s T_f$  (Fig. 2). Demnach ist der Belastungsfaktor

$$q = \frac{W_{B1} + W_{B2}}{P_n T_f (1 + s)} = \frac{1}{1 + s} \frac{0,93 T_b}{\bar{\eta}_e T_f} + \frac{\alpha v_n}{P \eta_{en} \eta_{mn}} (1 - 2 T_b/T_f) \quad (20)$$

Aus den früheren Gleichungen kann man entnehmen, dass

$$T_f = \frac{3,87 \eta_{mn} P_n v_n^2 / m - 1,72 \alpha v_n^3}{(1,5 \eta_{mn} P_n / m - \alpha v_n)^2}$$

$$\text{und } \frac{T_b}{T_f} = \frac{1,5 \eta_{mn} P_n / m - \alpha v_n}{3,87 \eta_{mn} P_n / m - 1,72 \alpha v_n} \quad (21)$$

Mit den gleichen Werten für  $\eta_{mn}$  und  $\alpha$  wie vorher, bekommt man

$$\frac{T_b}{T_f} = \frac{1,3 p - 0,06 v_n}{3,3 p - 0,1 v_n} \quad (22)$$

Auch hier gibt es eine Näherung,

$$T_b/T_f \approx 0,35 \quad (23)$$

Mit den gewählten typischen Werten  $\eta_{en} = 0,8$ ,  $\bar{\eta}_e = 0,7$ , und  $\alpha = 0,06 \text{ m/s}^2$ , bekommt man

$$q = \frac{1}{1 + s} (W_{B1} + W_{B2}) = \frac{1}{1 + s} (0,46 + 0,026 v_n/p) \quad (24)$$

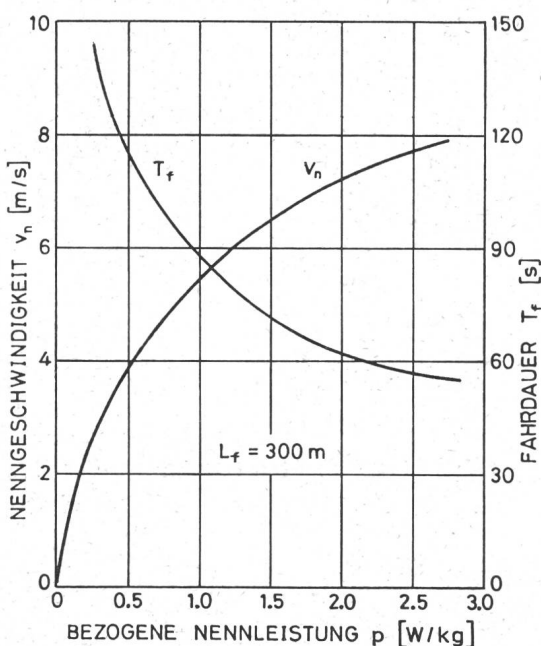


Fig. 5 Fahrtdauer und Nenngeschwindigkeit als Funktionen der bezogenen Nennleistung

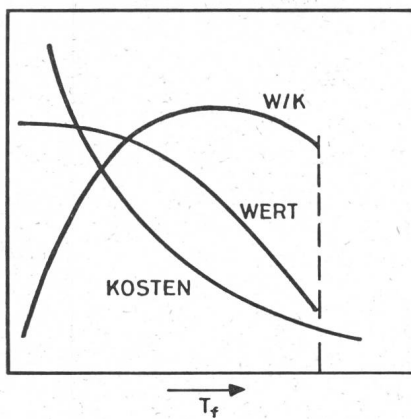


Fig. 6 Das Verhältnis von Wert (W) und Kosten (K) als Beurteilungskriterium

Es sei daran erinnert, dass diese sowie die früheren Beziehungen nur unter der Bedingung  $\partial T_f / \partial v_n = 0$  Gültigkeit haben. Zwei Tatsachen sind in Gl. (24) für  $q$  besonders hervorzuheben. Erstens ist die Beschleunigungsphase dominierend. Die Grösse  $v_n/p$  hat typischerweise einen Wert von 5; also beträgt das zweite Glied in der Klammer nur etwa 0,13. Daraus folgt, als Faustformel

$$q = 0,6/(1 + s) \quad (25)$$

Zweitens nimmt  $q$  mit zunehmendem Wert von  $v_n$  zu, d.h. bei konstantem Wert von  $p$  bei zunehmendem Wert von  $L_f$  (Fig. 4). Ist es unsicher, bei welchem Wert von  $L_f$  die Lokomotive eingesetzt wird, so sollte man deshalb den niedrigsten Wert nehmen.

## 5. Wahl der Nennleistung $P_n$

Bei der Auslegung einer Lokomotive wird man meistens davon ausgehen, dass die Fahrverhältnisse, charakterisiert durch die drei Parameter  $T_A$ ,  $L_f$  und  $s$  und die zu ziehende Last  $m_L = (m_3 + m_4)$  gegeben sind. Die Lokomotive wird also für gegebene Werte dieser Parameter optimiert. Eine erste Frage ist dann nach der Grösse der Nennleistung  $P_n$ . In diesem Zusammenhang ist es wichtig, auf eine Beziehung zwischen Masse und Leistung hinzuweisen.

Wie gezeigt wurde, kann der Belastungsfaktor  $q$  unter den getroffenen Annahmen in erster Näherung als nur von  $s$  abhängig angesehen werden. Also wird das Batteriegewicht  $m_2$  proportional  $P_n$ , z.B.  $m_2 = c_1 P_n$ . Die Masse der leeren Lokomotive,  $m_1$ , setzt sich aus drei Teilen zusammen: Der erste Teil ist von  $P_n$  und  $m_2$  unabhängig (Führerstand sowie alle Kleinteile wie Kupplungen, Puffer usw.). Der zweite Teil ist nur von  $P_n$  abhängig (Motoren, Getriebe, Regelung usw.). Der dritte Teil ist nur von  $m_2$  abhängig (für die Batterie notwendige Trägerkonstruktion). Da aber  $m_2 = c_1 P_n$ , reduziert sich die Zerlegung auf zwei Teile, der eine konstant, der andere proportional  $P_n$ , z.B.  $m_1 = c_2 + c_3 P_n$ . Damit wird die gesamte Masse

$$m = (c_1 + c_3) P_n + c_2 + m_L \quad (26)$$

$$\text{und } p = P_n/m = \frac{P_n}{(c_1 + c_3) P_n + c_2 + m_L}$$

Der Parameter  $p$  hat eine obere Grenze; für  $P_n \rightarrow \infty$  wird

$$p = p^* = 1/(c_1 + c_3)$$

Damit hat auch  $v_n$  eine obere Grenze. Je mehr man sich dieser nähert, um so unwirtschaftlicher wird die Lokomotive, indem ein immer grösserer Teil der Batterieenergie für den Transport der Batterie selbst verwendet wird. Als Richtlinie könnte man  $p_{\max} = p^* = 0,5/(c_1 + c_3)$  nehmen.

Um ein gewisses Gefühl für diese Begrenzung zu bekommen, wird  $q = 0,6/(1 + s)$  gesetzt;  $c_3$  hat typischerweise einen Wert um 0,12. Damit wird

$$p^* = \frac{1}{0,0375 T_A/(1 + s) + 0,12}$$

mit  $T_A$  in h. Jetzt man z.B.  $T_A = 12$  h und  $s = 1$ , so wird  $p^* = 2,9$ . D.h., man würde in diesem Fall  $p$  nicht grösser als 1,5 wählen.

Normalerweise wird man  $p$  nahe an  $p^*/2$  wählen, weil man an einer höchstmöglichen Geschwindigkeit interessiert ist. Sind aber kleinere Geschwindigkeiten akzeptabel, so ist es natürlich wirtschaftlicher, einen kleineren Wert von  $p$  festzulegen. Aus dem Ausdruck

$$T_f = \frac{3,3 p v_n^2 - 0,1 v_n^3}{(1,3 p - 0,06 v_n)^2}$$

und den Kurven in Fig. 4 können die Funktionen  $v_n(p)$  und  $T_f(p)$  ermittelt werden. Fig. 5 zeigt das Resultat für  $L_f = 300$  m; für andere Werte von  $L_f$  werden die Kurven eine ähnliche Form haben. Daraus ist ersichtlich, dass es sehr teuer zu stehen kommen kann, wenn man  $p$  (oder  $v_n$ ) zu hoch wählt. Die Kurve  $T_f(p)$  fängt schon früh an abzufachen; im vorliegenden Fall sinkt  $T_f$  zwischen  $p = 1$  und  $p = 2$  um weniger als 30%, die Kosten der Lokomotive werden sich aber etwa verdoppeln.

## 6. Schlussfolgerungen

Um die Dimensionierung einer batteriegespeisten Lokomotive bei vorgegebenen Werten von  $T_A$ ,  $L_f$  und  $s$  zu beurteilen, muss man zuerst angeben, was einem die Geschwindigkeit Wert ist, bzw. was einem die Zeit  $T_f$  Wert ist. Dabei muss nur ein relatives Mass für diesen Wert angegeben werden. Andererseits kann man angeben, was die Kosten in Funktion von  $T_f$  sein werden. Es entsteht damit ein Bild wie in Fig. 6. Das Verhältnis Wert/Kosten ist ein Mass für die Güte der Dimensionierung. Dabei ist folgendes zu beachten:

- Es besteht ein Maximum.
- Gegen kleinere Werte von  $T_f$  fällt das Verhältnis Wert/Kosten sehr rasch ab.
- Unterschiede in der Dimensionierung, die im Betrieb kaum bemerkbar sind, können ohne weiteres Kostenunterschiede von  $\pm 30\%$  bedeuten.

## Literatur

- F. Christen: Der Aktionsradius der Akkumulatoren-Eisenbahnfahrzeuge. Dissertation Nr. 266 der ETH Zürich, 1922.
- W. Milles und E. Riechmann: Batterie-Lokomotiven in Bergbaubetrieben unter Tage. Planung und Betrieb der Lokomotiven, Batterien und zugehörigen Anlagen. Essen, Verlag Glückauf, 1969.
- Dimensionierung von Industrielokomotiven. Berlin, AEG.
- K. Sachs: Elektrische Triebfahrzeuge. Ein Handbuch für die Praxis sowie für Studierende in zwei Bänden. 1. Auflage, Zürich, SEV, 1953.

## Adresse des Autors

Erik W. Aslaksen, Aslaksen AG, Hårdlistrass 14, 8958 Spreitenbach.