

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	71 (1980)
Heft:	1
Artikel:	Dimensionierung von batteriegespeisten Lokomotiven
Autor:	Aslaksen, E. W.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-905194

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

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 Fahrernergie mitgeführt oder laufend zugeführt wird. Zur ersten Gruppe gehören Dampf- und Diesellokomotiven sowie batteriegespeiste Lokomotiven, zur zweiten elektrische Lokomotiven mit Fahrdraht 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

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_B die aus der Batterie bei Nennbetrieb entnommene Leistung ist, also

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

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

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

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

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



Fig. 1 Leistungsfluss

P_B der Batterie entnommene Leistung

P von den Antriebsmotoren aufgenommene Leistung

P_m mechanische Leistung

η_e Wirkungsgrad der Leistungselektronik

η_m Wirkungsgrad der Antriebsmotoren

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 α 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

$$v = -t^2 \frac{F_n}{2 T_b m} + t (2 F_n/m - \alpha) \quad (9)$$

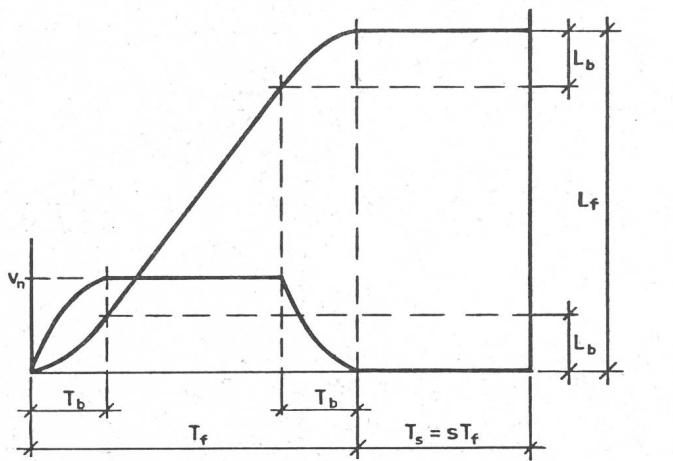


Fig. 2 Weg und Geschwindigkeit als Funktionen der Zeit während einer Periode

L_f , T_f Fahrtstrecke bzw. Fahrtdauer
 L_b , T_b Beschleunigungs- und Bremsstrecke bzw.
entsprechende Zeit
 T_s Haltezeit
 v_n Nenngeschwindigkeit

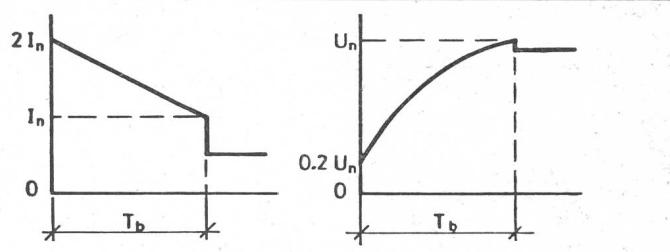


Fig. 3 Ankerstrom und Ankerspannung während der Beschleunigungsphase
Index n Nennwerte

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

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

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 $a_n = F_n/m = \eta_m P_n/v_n m$

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

$$\text{und } \frac{\partial T_f}{\partial v_n} = \frac{2,58 \eta_m P_n v_n^3/m - 0,86 \alpha v_n^2}{(1,5 \eta_m P_n/m - \alpha v_n)^2} + \frac{L_f}{v_n^2}$$

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

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

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 $\eta_m \approx 0,85$, $\alpha \approx 0,06 \text{ N/kg}$.

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

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

In Fig. 4 ist diese Beziehung graphisch dargestellt.

Wenn L_f 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.

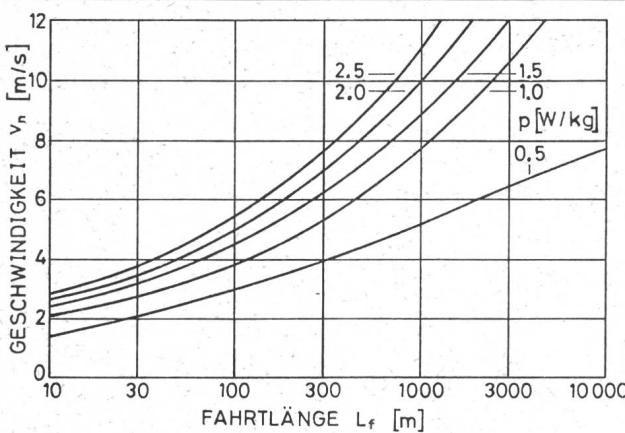


Fig. 4 Beziehung zwischen L_f , p und v_n

$p = P_n/m$ 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 benutzt ($0,15 \leq p/v_n \leq 0,3$ 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 η_{mn} und α 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

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

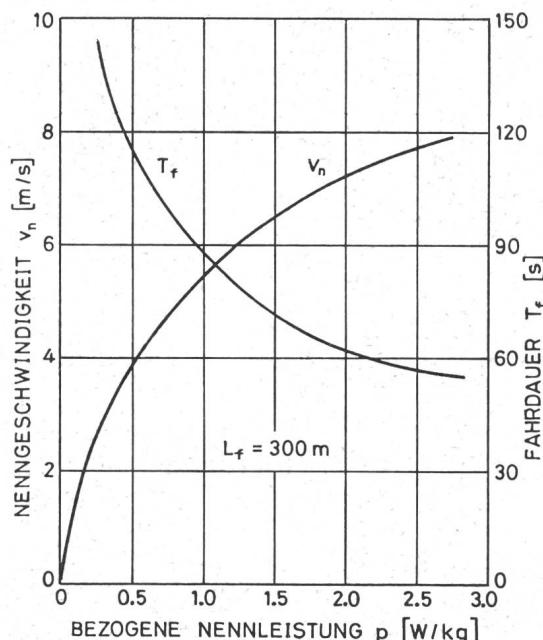


Fig. 5 Fahrdauer und Nenngeschwindigkeit als Funktionen der bezogenen Nennleistung

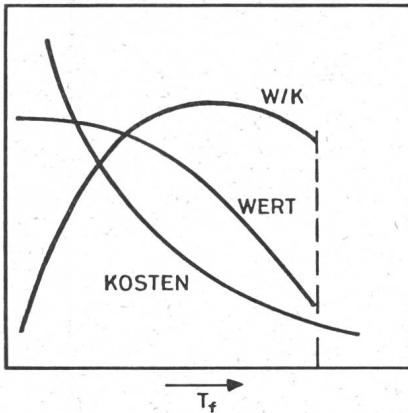


Fig. 6 Das Verhältnis von Wert (W) und Kosten (K) als Beurteilungskriterium

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 abzuflachen; 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

- [1] F. Christen: Der Aktionsradius der Akkumulatoren-Eisenbahnfahrzeuge. Dissertation Nr. 266 der ETH Zürich, 1922.
- [2] W. Milles und E. Riechmann: Batterie-Lokomotiven in Bergbaubetrieben unter Tage. Planung und Betrieb der Lokomotiven, Batterien und zugehörigen Anlagen. Essen, Verlag Glückauf, 1969.
- [3] Dimensionierung von Industrielokomotiven. Berlin, AEG,
- [4] 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, Härdlistrasse 14, 8958 Spreitenbach.