Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 43/44 (1904)

Heft: 3

Artikel: Rechnerische Bestimmung der Anfahrlinien der Motorwagen elektrischer Bahnen für verschiedene Motortypen

Autor: Kummer, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-24755

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: 13.07.2025

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

in mässigen Grenzen. Die Erregerspulen erreichen bei Dauerbetrieb bei einer Spannung von 800 *Volt* eine Uebertemperatur von 45° C. über die Temperatur der Umgebung, alle andern Maschinenteile weisen geringere Erwärmungen auf.

Rechnerische Bestimmung der Anfahrlinien der Motorwagen elektrischer Bahnen für verschiedene Motortypen.

Von Dr. *W. Kummer*, Ingenieur in Zürich.

(Schluss.)

Damit wären die verschiedenen Beziehungen, die sich aus der Annahme einer mechanischen Charakteristik nach dem Linienzug LMN der Abbildung 3 ergeben, dargelegt. Wie bereits bemerkt, gibt dieser Linienzug das Verhalten des Seriemotors bei Betrieb mit konstanter Spannung.

Nun ist aber zu bemerken, dass in den Anwendungen der Praxis der Seriemotor in der Anfahrtperiode nicht vollständig bei Betrieb mit konstanter Spannung verwendet wird. Vielmehr wird die erste Phase der Anfahrt, die sogenannte Schaltperiode unter Betrieb mit konstantem Strom gefahren, wobei sich somit für die ganze Anfahrt ein Linienzug nach QMN der Abbildung 3 (S. 15) ergibt. Das technische Verfahren, mittels dessen anfänglich ein Betrieb bei konstantem Strom und nachher bei konstanter Spannung erreicht wird, ist dasjenige der Widerstandsvorschaltung in der Schaltperiode; die Gleichstromserieparallelmethode bedeutet nur eine spezielle ökonomische Anwendung dieses Verfahrens, insofern es sich um das Prinzip der mechanischen Charakteristik handelt.

Die erste Phase des so gewonnenen neuen Typs eines Traktionsmotors — es möge ihm der Name des Seriemotors mit Anlasswiderstand gegeben werden — entspricht somit der Horizontalen QM der Abbildung 3 und wird durch dieselben Gleichungen, mit entsprechend gewählten Grenzen, befriedigt, wie der weiter oben behandelte Drehstrommotor mit konstanter Spannung und Frequenz und schaltbarem Rotorwiderstand. Die zweite Phase des Seriemotors mit Anlasswiderstand wird durch die Geschwindigkeitskurve: $t = -\frac{1}{gb}\, lg\,(a - r_1 - bv) + C_i$

geregelt, wobei aber C_i wie folgt zu bestimmen ist: Seien t_1 und v_1 die Zeit und Geschwindigkeit, die dem Punkte M entsprechen, dann ist:

$$t = t_1, \quad v = v_1, \quad C_i = t_1 + \frac{1}{bg} \cdot lg\,(a - r_1 - bv_1)$$

also:

$$t = \frac{1}{bg}\, lg\, \frac{a - r_1 - b \cdot v_1}{a - r_1 - b \cdot v}$$

$$v = \frac{a - r_1}{b} - \frac{a - r_1 - bv_1}{b}\, e^{-bg\,(t - t_1)}$$

welch letzte zwei Gleichungen zwischen den Punkten M und N der Abbildung 3 gültig sind. Zwischen den Punkten Q und M derselben gilt allgemein

$$v = \gamma_0 \cdot t$$

und für den Punkt M im besondern:

$$v_1 = \gamma_0 \cdot t_1.$$

Ferner ist für die Phase QM:

$$z = C_o = a - b \cdot v_1 = \text{konstant.}$$

Die Beschleunigung im Punkte M ergibt die Doppelgleichung: $\gamma_o = \frac{v_1}{t_1} = g\,(a - r_1 - b \cdot v_1).$

Nachdem auf diese Weise die Ausdrücke für die Geschwindigkeit während der beiden Phasen des Anlaufs des Seriemotors mit Widerstand festgelegt sind, erübrigt noch, die abgeleiteten Grössen des Arbeitsverbrauchs, des Weges u. s. w. zu bestimmen. Für die erste Phase gelten hier die bereits gegebenen Gleichungen des behandelten Drehstrommotors, für die zweite Phase sind die bezüglichen Werte abzuleiten aus der Geschwindigkeitskurve:

$$v = \frac{a - r_1}{b} - \frac{a - r_1 - b\,v_1}{b}\, e^{-bg\,(t - t_1)}$$

Diese Gleichung, wie auch ihre Derivierte

$$\gamma = \frac{dv}{dt} = g \cdot \left(a - r_1 - b\,v_1\right) e$$

sind dargestellt in der Abbildung 5. Auch hier nähert sich v einem Grenzwerte

$$v_{max} = \frac{a - r_1}{b}$$

während γ sich dem Grenzwerte o nähert; diese Grenzwerte werden theoretisch erst für $t = \infty$ erfüllt.

Der maximale Effekt ergibt sich hier ebenfalls zu:

$$E_{max} = \frac{a^2}{4b}$$

mit einer ihm entsprechenden Geschwindigkeit von:

$$(v)_{E_{max}} = \frac{a}{2b},$$

blos ist hier der Zeitpunkt dieses maximalen Effekts ein anderer; er folgt nämlich aus:

$$e^{-bg\,(t - t_1)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{a - 2r_1}{a - r_1 - bv_1} = \frac{1}{2}\, \frac{g}{\gamma_0} \cdot \left(a - 2r_1\right)$$

Seien A_1 und s_1 Arbeit und Weg während der ersten Phase, entsprechend der Linie OA in Abbildung 5 und seien A_2 und s_2 Arbeit und Weg während der zweiten Phase, entsprechend der Linie AB in derselben Abbildung, so folgt:

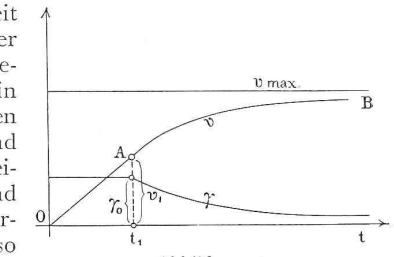

Abbildung 5.

$$A_1 = r_1 \int_o^{t_1} v\,d\,t + \frac{1}{g} \int_o^{v_1} v\,d\,v = \frac{v_1^2}{2} \left(\frac{r_1}{\gamma_0} + \frac{1}{g}\right)$$

$$s_1 = \frac{v_1^2}{2\,\gamma_o}$$

$$s_2 = \int_{t_1}^{T} v\,d\,t = \int_{t_1}^{T} \frac{a - r_1}{b}\,dt - \int_{t_1}^{T} \frac{a - r_1 - bv_1}{e}\, e^{-bg\,(t - t_1)}\,dt$$

$$= \frac{a - r_1}{b} \Big[t\Big]_{t_1}^{T} + \frac{a - r_1 - bv_1}{b} \left[\frac{1}{bg}\, e^{-bg\,(t - t_1)}\right]_{t_1}^{T}$$

$$s_2 = \frac{a - r_1}{b} \Big[T - t_1\Big] + \frac{1}{bg} \Big[v_1 - v_e\Big] = v_{max} \left(T - t_1\right) + \frac{1}{bg} \left(v_1 - v_e\right)$$

Kommt es auf einige Prozent Genauigkeit nicht an, so kann man schreiben:

$$s_2 = \infty\, v_e \left[T - t_1 - \frac{1}{bg} \left(1 - \frac{v_1}{v_e}\right)\right]$$

Ferner folgt:

$$A_2 = \int_{t_1}^{T} r_1\, v\,d\,t + \int_{v_1}^{v_e} \frac{1}{g}\, v\,d\,v = r_1\, v_{max} \left(T - t_1\right) + \frac{r_1}{bg} \left(v_1 - v_e\right) + \frac{1}{g} \cdot \frac{1}{2} \left(v_e^2 - v_1^2\right)$$

Kommt es auch hier auf einige Prozent Genauigkeit nicht an, so folgt:

$$A_2 = \infty\, r_1\, v_e \left[T - t_1 - \frac{1}{gb} \left(1 - \frac{v_1}{v_e}\right)\right] + \frac{1}{2\,g} \left(v_e^2 - v_1^2\right)$$

Die totale Arbeit und der totale Weg, A und s sind durch die Summen:

$$A = A_1 + A_2 \text{ und } s = s_1 + s_2$$

dargestellt.

Man erhält die Mittelwerte der Geschwindigkeit und des Effekts wie folgt:

$$v_{mittel} = \frac{s_1 + s_2}{(t_1 + T - t_1)} = \frac{s}{T}$$

$$E_{mittel}\ \frac{A_1 + A_2}{t_1 + (T - t_1)} = \frac{A}{T}$$

Ein explizites Anschreiben dieser Werte wird unterlassen, da es zu keinen neuen Schlüssen führen würde.

Es ist hier noch auf den Zusammenhang des konstanten a, b und v_1 hinzuweisen. Aus der Wahl der Grössen v_{max}, v_1 und γ_o folgen a und b durch die Beziehung:

$$\gamma_o = g(a - r_1 - bv_1) = g\left[a - r_1 - v_1 \frac{a - r_1}{v_{max}}\right]$$

$$a = \frac{\gamma_o}{g} \cdot \frac{v_{max}}{v_{max} - v_1} + r_1, \quad b = \frac{1}{v_{max} - v_1} \cdot \frac{\gamma_o}{g}$$

weil: $b = \frac{a - r_1}{v_{max}}$.

Aus $\gamma_o = g\,(C_o - r_1)$

ist ferner auch C_o abzuleiten.

Auch E_{max} ist nach Wahl von γ_o, v_{max} und v_1 sofort explizit anzugeben, nämlich:

$$E_{max} = \frac{a^2}{4b} = \frac{1}{4}\left(v_{max} - v_1\right)\frac{g}{\gamma_o}\left[r_1 + \frac{v_{max}}{v_{max} - v_1}\frac{\gamma_o}{g}\right]^2$$

Da man bestrebt ist, für E_{max} möglich keine Werte zu erhalten, für Differenzen $v_{max} - v_1$ die positive Werte kleinerer Grösse als v_{max} haben, so ist diese Differenz $v_{max} - v_1$ so gross als möglich, d. h. v_1 möglichst klein anzunehmen.

Es sollen nun die drei untersuchten Motortypen mit den Anfahrlinien nach den Abbildungen 2, 4 und 5 noch an einem besondern Zahlenbeispiel verglichen werden. Für die drei Typen mögen folgende Konstanten gemeinsam gewählt werden:

$$r_1 = 0{,}012 \ \frac{kg \text{ Widerstandskraft}}{kg \text{ bewegtes Gewicht}}$$

$$v_e = 12{,}25 \ m/\text{Sek.}$$

Für den Fall der Seriegleichstrommotoren sei die theoretische Maximalgeschwindigkeit zu:

$$v_{max} = 12{,}50 \ m/\text{Sek.}$$

angenommen. Die ferner zu wählende Anfangsbeschleunigung γ_o kann nicht für alle drei Typen gleich angenommen werden, wenn man zweckmässig vergleichbare Werte erhalten will. Im vorliegenden Zahlenbeispiel, dessen Resultate in der folgenden Tabelle zusammengestellt sind, wurde γ_o jeweilen derart gewählt, dasss die mittlern Motorleistungen und Zugkräfte nicht allzu verschiedene Werte erhielten. Für den Typ mit den Anfahrlinien nach Abbildung 5 sind ausser den schon genannten Konstanten die Zeit t_1 und die dadurch eindeutig bestimmte Geschwindigkeit v_1 zu wählen. In der Tabelle sind für diese Werte zweierlei Annahmen gemacht worden.

	Drehstrommotor mit schaltbarem Rotorwiderstand	Seriemotor ohne Schaltwiderstand	Seriemotor mit Schaltwiderstand	
			$V_1 = 4{,}00$; $t_1 = 6{,}67$.	$V_1 = 6{,}00$; $t_1 = 10{,}0$.
γ_v	0,45	0,90	0,60	0,90
Motor-Konstanten	$C_o = 0{,}0577$	$a = 0{,}1037$ $b = 0{,}00734$	$C_o = 0{,}0732$ $a = 0{,}1019$ $b = 0{,}00720$	$C_o = 0{,}0732$ $a = 0{,}130$ $b = 0{,}00941$
T	27,2	54,6	56,6	45,6
$(t)_{Emax}$	27,2	11,6	13,1	11,6
$(V)_{Emax}$	12,25	7,06	7,08	6,91
E_{max}	0,707	0,366	0,361	0,449
s	166,7	512,2	520,7	407,2
A	9,62	13,8	13,9	12,5
$V_{mittel} = \frac{s}{T}$	6,125	9,38	9,20	8,93
$E_{mittel} = \frac{A}{T}$	0,353	0,253	0,246	0,275
$z_{mittel} = \frac{A}{s}$	0,0577	0,0269	0,0267	0,0308

Alle in der Tabelle eingetragenen Zahlwerte sind auf die Grundeinheiten 1 Meter, 1 Kilogramm und 1 Sekunde bezogen. Die Grössen E und A, sowie die Motorkonstanten beziehen sich ferner auf das Kilogramm als Einheit des Zugsgewichts. Die Zugsgewichte sowie die Grössen E und A und die Motorkonstanten können ohne weiteres auf jedes beliebige Zugsgewicht umgerechnet werden.

Obschon die Tabelle keinen Anspruch darauf macht, für jeden Typ die günstigsten Verhältnisse zu kennzeichnen, so erlaubt sie dennoch eine eingehende Vergleichung der verschiedenen Typen unter den festgesetzten Annahmen. In erster Linie fällt die Tatsache auf, dass der Seriemotor ohne Anlasswiderstand und der Seriemotor mit Anlasswiderstand im Falle $v_1 = 4{,}0$ und $t_1 = 6{,}67$ beinahe gleiche Resultate ergeben. Vom mechanischen Standpunkte aus bedeutet also die Benutzung des Anlasswiderstandes und somit auch die Benutzung des Serieparallelverfahrens keinen Fortschritt auf dem Gebiete der Traktion. Natürlich ist dieser Schluss nur bedingt richtig, da die vorstehenden Untersuchungen, die auf ihn führten, eben nicht die vom Fahrzeug aufgenommene Energie, sondern blos diejenige vom Fahrzeug an die Schienen und an die zu bewegende Masse abgegebene Energie behandeln. Der Wirkungsgrad der Motoren, der Anlasser und aller übrigen zwischen der Energiequelle und den Motoren liegenden Apparate überhaupt ist somit zu 100 % angenommen. Dass zur vollständigen Lösung des Problems diesbezügliche Korrekturen anzubringen sind, die eventuell bei Vergleichung der verschiedenen Motortypen die Resultate stark beeinflussen, versteht sich von selbst. Der theoretische Wert der vorliegenden Untersuchungen wird indessen dadurch nicht beeinträchtigt; im Gegenteil können diese und ähnliche theoretische Untersuchungen allein auf den richtigen Weg führen, um einen bestimmten Typ eines Traktionsmotors unabhängig von der Rolle der Zwischenapparate korrekt beurteilen zu können.

Benutzt man die Tabelle zur Vergleichung der Seriemotoren mit oder ohne Schaltwiderstand mit dem Drehstrommotor mit schaltbarem Rotorwiderstand, so kommt man auf folgende, empirisch längst bekannte Resultate: Obschon der Drehstrommotor seinen Anlauf nur mit beträchtlich geringerer Anfangsbeschleunigung antritt, hat er den Anlauf schon in der halben Zeit beendigt; dazu braucht er allerdings eine grössere Maximalleistung und eine grössere mittlere Leistung. Diese letztern Eigenschaften machen ihn, wie bekannt, ungeeignet für Betriebe mit kleinem Abstand der Haltstellen (eigentlicher Tramwaybetrieb), wo das Verhältnis der Anfahrzeit zur totalen Fahrzeit von Station zu Station einen numerisch grossen Wert hat. Für den Normalbahnbetrieb, wo dieses Verhältnis numerisch einen sehr kleinen Wert hat, ist aber dieses nachteilige Verhalten des Drehstrommotors ohne Belang, insofern die für eine mittlere Leistung berechneten Motoren, sowie die Leitungen und die Zentrale die verlangte Ueberlastung beim Anfahren ohne Nachteil ertragen.

Durch Berechnung der charakteristischen Grössen für andere Annahmen, insbesondere für verschiedene Werte von r_1 unter Berückstichtigung verschiedener Steigungen, können noch weitere praktisch interessante Schlüsse gezogen werden.

Dies liegt aber ausserhalb der Aufgabe der vorliegenden Untersuchungen, deren Zweck war zu zeigen, dass:

1. eine Behandlung à priori der Anfahrlinien nicht nur möglich, sondern notwendig ist zur richtigen Bestimmung der Motorkonstanten und dass,

2. durch eine derartige Behandlung à priori sämtliche Fragen, die den Konstrukteur des Elektromotors wie jenen des Fahrzeuges interessieren, aufgerollt werden.

Insbesondere dürfte die analytische Berechnungsweise der elektrischen Traktionsmotoren zur oft aufgeworfenen Frage der Leistungsbezeichnung des Motors einen neuen Gesichtspunkt liefern, indem sie die verlangte Maximalleistung in schärfster Weise zu bestimmen erlaubt.