Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 65/66 (1915)

Heft: 12

Artikel: Das Adhäsionsgewicht elektrischer Fahrzeuge bei Motoren verschiedener Stromart

Autor: Kummer, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-32207

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: 31.12.2025

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

INHALT: Das Adhäsionsgewicht elektrischer Fahrzeuge bei Motoren verschiedener Stromart. — Der Neubau des „Rösslitor" in St. Gallen. — Zum heutigen Stand der Rostfrage und neue Gesichtspunkte und Mittel zur Rostverhinderung. — Miscellanea: Rhein-Weser-Kanal. Ausnützung der Wärme der Hochofenschlacken. Schutz von Schwachstromleitungen gegen Starkstrom. — Nekrologie: H. Ward Leonard. — Konkurrenzen: „Pont Butin" in Genf. J. Daler-Spital. — Korrespondenz betreffend Wasserwerk Eglisau. — Literatur: Eisenbetonbau. La Elettrificatione delle Ferrovie. — Vereinsnachrichten: Zürcher Ingenieur- und Architekten-Verein. Gesellschaft ehemaliger Studierender: Stellenvermittlung.

nTafel 23 und 26: Der Neubau des „Rösslitor" in St. Gallen.

Band 65. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und unter genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 12.

Das Adhäsionsgewicht elektrischer Fahrzeuge bei Motoren verschiedener Stromart.

Ein neuer Beitrag zu einer alten Streitfrage

von Prof. Dr. *W. Kummer*, Zürich.

Anlässlich der Erörterungen über die ersten praktischen Anwendungen der elektrischen Zugförderung mittels Einphasen-Wechselstroms ist von den Vertretern der Bahnsysteme mittels Gleichstroms und mittels Drehstroms gegen den Betrieb mittels Einphasenstroms der Einwand erhoben worden, das Adhäsionsgewicht von Einphasenlokomotiven mit unmittelbarem Antrieb durch Einphasenmotoren müsse erheblich unter demjenigen von Gleichstromlokomotiven und Drehstromlokomotiven vom selben Totalgewicht liegen, weil zufolge der pulsierenden Triebkraft der Einphasenmotoren ein Gleiten der Triebräder schon bei verhältnismässig niedrigen mittlern Zugkräften am Radumfang eintreten müsse. Eine Bestätigung für die Richtigkeit dieser Ansicht, wenigstens grundsätzlich und unter den obwaltenden Verhältnissen auch in quantitativer Hinsicht, ist im Jahre 1906 durch amerikanische Versuche, über die wir uns an Hand der Berichterstattung von *B. G. Bergmann*[1]) hier noch eingehender äussern werden, erbracht worden. Anderseits liegen aber auch schon seit vielen Jahren mannigfache Versuchsresultate vor, aus denen das Vorhandensein eines merkbaren Einflusses der pulsierenden Triebkraft von Einphasenmotoren auf das Adhäsionsgewicht der damit ausgerüsteten Fahrzeuge rundweg bestritten werden kann. Den ersten Versuch einer rechnungsmässigen Klärung der aus den sich widersprechenden Ansichten und Erfahrungen entstandenen Streitfrage hat Prof. *G. Osanna*, München, ebenfalls schon im Jahre 1906[2]) veröffentlicht, indem er den Verlauf der bei eintretendem Gleiten der Räder auf den Schienen zu erwartenden Gleitbewegungen bei Annahme eines von der Gleitgeschwindigkeit unabhängigen Adhäsionskoeffizienten untersuchte und daraus die durch Gleiten bedingten Effektverluste berechnete, die jedoch, wegen des ausgleichend wirkenden grossen Trägheitsmomentes der antreibenden, und von Osanna mit starrer Uebersetzung wirkend angenommenen Motoren, als vernachlässigbar klein ermittelt wurden. Die von Osanna gemachte Annahme eines konstanten, für die Reibung bei Ruhe und bei Bewegung gleichmässig anwendbaren Reibungskoeffizienten hat jedoch schon bald zu einem Widerspruch gegen seine Berechnungen geführt[3]), die auch von Vertretern der Einphasentraktion als nicht recht überzeugend empfunden wurden[4]).

Es muss daher als verdienstvoll bezeichnet werden, dass die Angelegenheit der rechnerischen Untersuchung des Einflusses der Stromart der Bahnmotoren auf die Adhäsionsverhältnisse im Zusammenhang mit Versuchen auf der preussischen Wechselstrom-Bahnstrecke Dessau-Bitterfeld durch *G. Brecht*, Berlin[5]), neuerdings in Fluss gebracht wurde. Anstatt aber, nach dem Vorgehen von Osanna, tatsächliche Gleitbewegungen zwischen Rad und Schiene vorauszusetzen, zieht Brecht, ebenso wie es B. G. Bergmann in dem bereits erwähnten Versuchsberichte von 1906[1]), zwecks einer allerdings mehr nur physikalischen Erörterung, versucht hatte, die elastische Deformation des Getriebes zwischen Antriebsmotor und Radumfang einer bei Stillstand des Zuges anziehenden Maschine in Betracht, wobei die schwingende Beanspruchung im Getriebe unter dem Einfluss der pulsierenden Triebkraft eines Wechselstrommotors untersucht wird. Diesen, von Bergmann erstmals eingehender entwickelten Grundgedanken als zutreffend anerkennend, werden wir in der nachfolgenden Rechnung ebenfalls von ihm ausgehen. Anderseits können wir der Rechnung Brechts, obwohl diese vom selben Grundgedanken ausgeht, deswegen nicht zustimmen, weil die ihr zu Grunde liegende Annahme, nur der nicht vom Widerstand „ausgeglichene" Teil der Zugkraft sei beim Energieaustausch zwischen Massenträgheit und Elastizität zu berücksichtigen, offenbar unzutreffend ist. Auch ist zu beachten, dass die Voraussetzung eines elastischen Triebwerks zwischen Motor und Radumfang es gar nicht zulässt, dass die übertragene Kraft am Motor zwischen 0 und 2, am Radumfang dagegen nur von wenigen Prozenten unter 1 bis ebensowenig Prozente über 1 schwingt, wie Brecht gerechnet hat; vielmehr schwingt für ein auf übergrossen Widerstand treibendes Getriebe mit einem oder mehreren elastischen Zwischengliedern die Uebertragungskraft sowohl am Motor, wie am Widerstand, in gleicher Weise zwischen 0 und 2, ob es sich nun um einen Motor mit der konstanten Triebkraft 1 oder um einen Motor mit einer um den Mittelwert 1 harmonisch pulsierenden Triebkraft handelt. Wie wir noch zeigen werden, beanstanden wir für die hier in Frage stehende Untersuchung grundsätzlich auch das von Brecht angenommene Schema eines Triebwerks mit nur einem elastischen Zwischengliede.

Um nun einwandfrei den Einfluss der Stromart verschiedener Bahnmotoren auf die Schwingungen der Zugkraft am Radumfang stillstehender Triebfahrzeuge auf Grund des Energieaustausches zwischen Elastizität und Massenträgheit rechnungsmässig festzustellen, legen wir der Kraftübertragung zwischen Motor und Radumfang das Schema eines Triebwerks mit *zwei* elastischen Zwischengliedern von verschiedenem Nachgiebigkeitsgrad zu Grunde. Dieses, in Abbildung 1 vorgeführte Schema kann auf den Triebradantrieb elektrischer Fahrzeuge insoweit Anwendung finden, als die Motormasse der treibenden Masse m_1, die Radkranzmasse dagegen der Zwischenmasse m_2 des Schemas entsprechen, und als der Nachgiebigkeitsgrad γ_1 sich auf die Deformation des Getriebes zwischen Motor und Radkranz, der Nachgiebigkeitsgrad γ_2 sich auf die Deformation des Radkranzes an der Berührungsstelle von Schiene und Rad beziehen. Dabei kann für das stillgestellte Fahrzeug das Getriebe ohne Einfluss auf unsere Betrachtung beliebig als ideales Getriebe mit nur rotierenden Massen oder auch als ideales Kurbelgetriebe z. B. für diejenige Kurbelstellung, der auf beiden Fahrzeugsseiten gleiche Stangenkräfte entsprechen, vorausgesetzt werden. Unserem Schema entsprechend, treten nun in den zwei elastischen Gliedern verschiedene Uebertragungskräfte auf, eine Uebertragungskraft K_1 im ersten elastischen Gliede und eine Uebertragungskraft K_2 im zweiten elastischen Gliede, wobei:

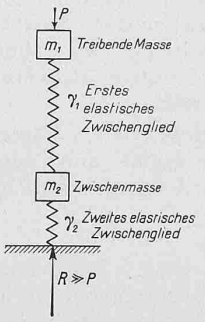

Abbildung 1.

$$K_1 = \frac{s_1 - s_2}{\gamma} \quad \text{und} \quad K_2 = \frac{s_2}{\gamma_2}$$

bei Einführung der Deformationen, bezw. Wege s_1 am Orte der konzentriert gedachten Masse m_1 und s_2 am Orte der konzentriert gedachten Masse m_2. Solange nun die Triebkraft P den Widerstand R noch nicht zu überwinden ver-

[1]) El. World, Band XLVIII, Seite 713.

[2]) Elektrische Bahnen und Betriebe 1906, Seite 229.

[3]) Elektrische Bahnen und Betriebe 1906, Seite 361.

[4]) Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen 1914, Seite 281.

[5]) Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen 1914, Seite 277 bis 284.

mag, wie dies eben bei einem forciert stillstehenden, beispielsweise festgebremsten Zuge der Fall ist, haben wir es mit einem Fall des „Massenvorlaufs" zu tun, wobei, unserem Schema gemäss, die Massen m_1 und m_2 in Frage kommen. Für diesen Vorlauf gilt das System simultaner Differentialgleichungen:

$$\begin{cases} P - m_1 \dfrac{d^2 s_1}{dt^2} = \dfrac{s_1 - s_2}{\gamma_1} \\ m_2 \dfrac{d^2 s_2}{dt^2} = \dfrac{s_1 - s_2}{\gamma_1} - \dfrac{s_2}{\gamma_2} \end{cases}$$

Den Unterschied im Verhalten von Motoren für verschiedene Stromarten können wir analytisch dadurch zum Ausdruck bringen, dass wir das eine Mal P als konstant voraussetzen, wodurch der Fall von Gleichstrom- oder Drehstrom-Motoren gekennzeichnet wird, während wir das andere Mal, um das Verhalten der Einphasen-Motoren im ungünstigsten normalen Grenzfall zu kennzeichnen, für P den Ansatz:

$$P = P_0 \cdot [1 - \cos(2\omega t)]$$

benutzen, wobei $\frac{\omega}{2\pi}$ die Periodenzahl des den Einphasenstrom speisenden Wechselstroms darstellt.

Für den letzteren, allgemeineren Ansatz geht unser System von Differentialgleichungen nach Vornahme der rein rechnerischen Operationen der Homogenisierung und der Eliminierung der Winkelfunktion über in das folgende:

$$\begin{cases} \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \dfrac{d^7 s_1}{dt^7} + \\ + \left[(\gamma_1 + \gamma_2) \cdot m_1 + \gamma_2 \cdot m_2 + \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot (2\omega)^2\right] \cdot \dfrac{d^5 s_1}{dt^5} + \\ + \left[(\gamma_1 + \gamma_2) \cdot m_1 \cdot (2\omega)^2 + \gamma_2 \cdot m_2 \cdot (2\omega)^2 + 1\right] \cdot \dfrac{d^3 s_1}{dt^3} + \\ + (2\omega)^2 \cdot \dfrac{ds_1}{dt} = 0 \\ \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \dfrac{d^7 s_2}{dt_7} + \\ + \left[(\gamma_1 + \gamma_2) \cdot m_1 + \gamma_2 \cdot m_2 + \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot (2\omega)^2\right] \cdot \dfrac{d^5 s_2}{dt^5} + \\ + \left[(\gamma_1 + \gamma_2) \cdot m_1 \cdot (2\omega)^2 + \gamma_2 \cdot m_2 \cdot (2\omega)^2 + 1\right] \cdot \dfrac{d^3 s_2}{dt^3} + \\ + (2\omega)^2 \cdot \dfrac{ds_2}{dt} = 0 \end{cases}$$

Würde man in unserem System von Ausgangsgleichungen für P einen konstanten Wert benutzen, also statt des Einphasenmotors den Gleichstrom- oder Drehstrommotor voraussetzen, dann ergäbe die Homogenisierung ein System von Differentialgleichungen fünfter Ordnung, die ohne weiteres auch aus dem obenstehenden System siebenter Ordnung folgen, wenn man $(2\omega)^2 = 0$ setzt.

Sowohl das eine, als auch das andere System homogener linearer Differentialgleichungen ergibt nun eine ausserordentlich einfache und elegante Lösung, wenn in allen Ausdrücken mit

$$(\gamma_1 + \gamma_2) \cdot m_1$$

die Grösse γ_2 neben γ_1 vernachlässigt wird. Angesichts der Eigenart der durch γ_1 und γ_2 gekennzeichneten Nachgiebigkeiten von Triebwerksteilen scheint uns für Lokomotiven und Motorwagen die Vernachlässigung von γ_2 neben γ_1 als allgemein und ausnahmslos zulässig.

Man erhält dann für den Fall des Antriebs mittels Einphasenmotoren als allgemeine Lösungen der beiden Differentialgleichungen die Ausdrücke:

$$s_1 = A_1 + B_1 \cdot \sin\sqrt{a_1} \cdot t + C_1 \cdot \cos\sqrt{a_1} \cdot t + D_1 \cdot \sin\sqrt{a_2} \cdot t + \\ + E_1 \cdot \cos\sqrt{a_2} \cdot t + F_1 \cdot \sin\sqrt{a_3} \cdot t + G_1 \cdot \cos\sqrt{a_3} \cdot t$$

$$s_2 = A_2 + B_2 \cdot \sin\sqrt{a_1} \cdot t + C_2 \cdot \cos\sqrt{a_1} \cdot t + D_2 \cdot \sin\sqrt{a_2} \cdot t + \\ + E_2 \cdot \cos\sqrt{a_2} \cdot t + F_2 \cdot \sin\sqrt{a_3} \cdot t + G_2 \cdot \cos\sqrt{a_3} \cdot t$$

wobei

$$\sqrt{a_1} = \sqrt{\frac{1}{m_1 \cdot \gamma_1}} \quad ; \quad \sqrt{a_2} = \sqrt{\frac{1}{m_2 \cdot \gamma_2}} \quad ; \quad \sqrt{a_3} = 2\omega$$

Für den Fall des Antriebs mittels Gleichstrommotoren oder Drehstrommotoren ergeben sich für s_1 und s_2 Ausdrücke, die aus denjenigen für Antrieb mittels Einphasenstrom hervorgehen, mit $F_1 = F_2 = G_1 = G_2 = 0$.

Die Integrationskonstanten interessieren uns nur insoweit, als wir solche zur Bildung des Ausdruckes:

$$K_2 = \frac{s_2}{\gamma_2}$$

benötigen, indem hier ja nur die Schwingungen der Zugkraft am Radumfang, d. h. eben die Schwingungen von K_2 in Frage kommen.

Nach Durchführung der Bestimmung der Konstanten $A_2, B_2, C_2, D_2, E_2, F_2, G_2$ ergibt sich für den Fall des Einphasenstroms:

$$K_2 = P_0 \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{1}{(1+\gamma_1 \cdot m_1 \cdot 4\omega^2)} \cdot \frac{1}{(1+\gamma_2 \cdot m_2 \cdot 4\omega^2)}\right) \cdot \cos\sqrt{\frac{1}{\gamma_2 \cdot m_2}} \cdot t \right. \\ \left. - \frac{1}{(1+\gamma_1 \cdot m_1 \cdot 4\omega^2)} \cdot \frac{1}{(1+\gamma_2 \cdot m_2 \cdot 4\omega^2)} \cdot \cos(2\omega t)\right]$$

Für den Fall des Antriebs mittels Gleichstrommotoren oder Drehstrommotoren folgt mit Rücksicht auf die alsdann geltenden Konstanten A_2, B_2, C_2, D_2, E_2 der Ausdruck:

$$K_2 = P \cdot \left[1 - \cos\sqrt{\frac{1}{\gamma_2 \cdot m_2}} \cdot t\right]$$

Für die Vergleichung der Stromarten sind nun massgebend die Zahlenwerte der Ausdrücke $\gamma_1 \cdot m_1$, sowie $\gamma_2 \cdot m_2$ und ω bezw. $4\omega^2$ Wir glauben für den praktisch wichtigsten Fall grösserer Lokomotiven für alle Stromarten schätzen zu dürfen:

$$\gamma_1 \cdot m_1 = \sim 10^{-3} \text{ bis } 10^{-4}$$
$$\gamma_2 \cdot m_2 = \sim 10^{-6} \text{ bis } 10^{-7}$$

unter Zugrundelegung der Einheiten *m*, *kg* und *sek*. Für Einphasenstrom von etwa 16 Perioden ist weiter:

$$\omega = \sim 10^2$$
$$4 \cdot \omega^2 = \sim 4 \cdot 10^4$$

Es ist dann im Allgemeinen

$$(\gamma_1 \cdot m_1 \cdot 4\omega^2) > 1 \; ; \; (\gamma_2 \cdot m_2 \cdot 4\omega^2) < 1$$

Der Ausdruck:

$$\frac{1}{(1+\gamma_1 \cdot m_1 \cdot 4\omega^2)} \cdot \frac{1}{(1+\gamma_2 \cdot m_2 \cdot 4\omega^2)} = z$$

stellt dann einen sehr kleinen Bruch mit positivem Zahlenwert dar, der neben 1 vernachlässigt werden kann, sodass für Einphasenstrom

$$K_2 = P_0 \cdot \left[1 - \cos\sqrt{\frac{1}{\gamma_2 \cdot m_2}} \cdot t - z \cdot \cos(2\omega \cdot t)\right]$$

geschrieben werden darf. Wegen des kleinen Zahlenwertes von z hat aber im Ausdruck K_2 das Glied $z \cdot \cos(2\omega t)$ einen kleinen Amplitudenwert, weshalb K_2 bei Einphasenmotoren im allgemeinen nahezu dieselben Schwingungen ausführen wird, wie bei Gleichstrom und Drehstrom. Aus diesem Grunde wird sich dann auch im allgemeinen für Einphasenlokomotiven dasselbe Adhäsionsgewicht herausstellen, wie für Gleichstromlokomotiven und Drehstromlokomotiven vom selben Totalgewicht.

Ausnahmen von diesem, im allgemeinen zutreffenden Verhalten sind jedoch zu erwarten, entweder, wenn:

$$\gamma_1 \cdot m_1 \cdot 4\omega^2 = \sim 1 \; ; \quad \text{bezw. } 2\omega = \sim\sqrt{\frac{1}{\gamma_1 \cdot m_1}}$$

oder, wenn:

$$\gamma_2 \cdot m_2 \cdot 4\omega^2 = \sim 1 \; ; \quad \text{bezw. } 2\omega = \sim\sqrt{\frac{1}{\gamma_2 \cdot m_2}}$$

Der zweite dieser Sonderfälle dürfte angesichts der Grössenordnung von $\gamma_2 \cdot m_2$ auch bei höheren Periodenzahlen gänzlich ausgeschlossen sein, während anderseits der Sonderfall:

$$\gamma_1 \cdot m_1 \cdot 4\omega^2 = \sim 1$$

im Bereiche der Möglichkeit liegt und auf:

$$z = \sim \frac{1}{2}$$

führt, wobei dann für Einphasenfahrzeuge:

$$K_2 = P_0 \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \cos\sqrt{\frac{1}{\gamma_2 \cdot m_2}} \cdot t - \frac{1}{2} \cdot \cos(2\omega t)\right]$$

zu setzen ist. Alsdann hat man es mit übereinander gelagerten Einzelschwingungen von K_2 zu tun, die für Werte:

$$\sqrt{\frac{1}{\gamma_2 \cdot m_2}} = 2\,(n \cdot \pi + \omega)$$

mit entsprechend hohen ganzzahligen Multiplikatoren n resonanzartig wirken, wobei die Zugkraft am Radumfang grösste Schwingungsweiten aufweist, die mit der Wechselstromtriebkraft P synchron sind. Ob sich die Uebereinanderlagerungen genau oder nur angenähert demgemäss ausbilden, bleibt sich insoweit gleich, als nun für die schwingende Kraft K_2 Impulse genügender Stärke und von genügend langer Schwingungsdauer vorliegen werden, derart, dass die Adhäsionsgrenze abwechselnd überschritten und unterschritten wird und das Gleiten der Räder auf den Schienen für kleinere Mittelwerte von K_2 auftritt, als bei Antrieb mittels Gleichstroms oder Drehstroms, wo die Schwingungsdauer von K_2 viel zu kurz ist, um auf die Adhäsion einwirken zu können.

In den Fällen einer bei Einphasenbetrieb ungünstig schwingenden Kraft K_2 am Radumfang ist eine Abhülfe offenbar auf äusserst einfache Weise möglich, indem, wie aus unsern rechnerischen Beziehungen hervorgeht, die einfach zu bewirkende Vergrösserung von γ_1, d. h. ein Einbau besonders elastischer Uebertragungsmittel zwischen Motor und Radumfang, ohne weiteres die Amplitude der Impulse mit langer Schwingungsdauer unterdrückt.

Hätten wir anstelle des Schemas eines Triebwerks mit zwei elastischen Zwischengliedern unserer Rechnung, nach dem Beispiel Brechts, das Schema eines Triebwerks mit nur einem elastischen Zwischengliede zu Grunde gelegt, wobei also in Abbildung 1 die Masse m_2 und das Glied γ_2 wegfallen würden, und somit für den Triebradantrieb elektrischer Fahrzeuge ein einheitlicher Nachgiebigkeitsgrad γ_1 zwischen Motor und Radumfang angenommen würde, wie es zu Untersuchungen über Triebwerkbeanspruchung im allgemeinen genügt, so hätten wir für die Kraft K am Radumfang bei konstanter Triebkraft im Falle von Gleichstrom- oder Drehstrombetrieb gefunden [1]):

$$K = P \cdot \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{\gamma_1 \cdot m_1}} \cdot t \right]$$

während bei Antrieb durch einen Einphasenmotor die genaue Rechnung ergäbe [2]):

$$K = P_0 \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{1}{1 - \gamma_1 \cdot m_1 \cdot 4\,\omega^2} \right) \cos \sqrt{\frac{1}{\gamma_1 \cdot m_1}} \cdot t + \right.$$
$$\left. + \frac{1}{1 - \gamma_1 \cdot m_1 \cdot 4\,\omega^2} \cos (2\,\omega\, t) \right]$$

Man sieht, dass, abgesehen von der Schwingungszahl, diese Darstellung den allgemeinen Fall des ähnlichen Verhaltens des Einphasenbetriebes mit dem Gleichstrom- und Drehstrombetriebe bestätigt, während diese Darstellung für den kritischen Resonanzfall mit:

$$\gamma_1 \cdot m_1 \cdot 4\,\omega^2 = \sim 1\,; \quad \text{bezw. } 2\,\omega = \sim \sqrt{\frac{1}{m_1 \cdot \gamma_1}}$$

versagt, indem sie mit dem auf das Gleichstromverhalten führenden Ausdruck:

$$K = P_0 \cdot \left[1 - \cos \sqrt{\frac{1}{\gamma_1 \cdot m_1}} \cdot t \right]$$

offenbar, wie die im Nachfolgenden erörterten amerikanischen Versuche übrigens bestätigen, nicht zutreffen kann. Deswegen scheint uns die Zugrundelegung des Schemas eines Triebwerks mit nur einem elastischen Zwischengliede auch grundsätzlich unzulässig.

Anlässlich der Erörterung amerikanischer Versuche in der bereits erwähnten Veröffentlichung aus dem Jahre 1906 [1]) hat *B. G. Bergmann* die behandelten resonanzartigen Störungen der Adhäsionsverhältnisse von Einphasenfahrzeugen im wesentlichen auch schon als solche erkannt, weshalb wir auf die interessante Arbeit noch besonders hinweisen möchten. Bei jenen Versuchen liess man ein mit zwei Einphasenmotoren von je 100 *PS* ausgerüstetes Drehgestell von 10,6 *t* Totalgewicht mittels einer Druckstange gegen ein feststehendes pneumatisches Dynamometer antreiben, wobei unter Benutzung von je nur einem Motor, der abwechselnd mit Gleichstrom und mit Einphasenstrom von variierter Frequenz gespeist wurde, Zugkräfte bis zum Eintritt des Gleitens der Räder des Drehgestells auf den Schienen entwickelt wurden. Die erzielten Versuchsresultate sind durch Bergmann in ein Kurvenblatt eingetragen worden, das wir unter Umrechnung der Polwechsel in Perioden und der Zugkraft in *kg* in Abbildung 2 hier wiedergeben; dabei sind die Versuchsresultate bei Wechselstrombetrieb durch kleine Ringe genau nach Beobachtung, die Versuchsresultate bei Gleichstrombetrieb durch kleine Kreuze unmittelbar über der Abszissenaxe eingetragen. Die ausgezogene Kurve rührt auch von Bergmann her, der damit einerseits die Annäherung der Adhäsionsverhältnisse bei Wechselstrom hoher Periodenzahl an diejenigen bei Gleichstrom und anderseits, durch den Wendepunkt der Kurve an der Ordinatenaxe, den Fall der Resonanz zwischen der Pulsation der Wechselstromtriebkraft und der Pulsation der schwingenden Kraftübertragung im federnden Drehgestells veranschaulichen wollte. Obwohl die Ueberlegungen Bergmanns nicht, wie die unsrigen, vom Schema eines Triebwerks mit zwei elastischen Zwischengliedern ausgehen, können wir uns in der Hauptsache doch seinen Deduktionen anschliessen, wobei wir aber unsere Darstellung als die den tatsächlichen Verhältnissen genauer angepasste und in theoretischer Hinsicht besser befriedigende ansehen. Zu der von Bergmann gezeichneten, in obenstehender Abbildung ausgezogen dargestellten Kurve möchten wir bemerken, dass wir den Wendepunkt der Kurve nicht auf der Ordinatenaxe selbst, sondern rechts von derselben vermuten, da wir es in Anbetracht unserer Rechnung für unmöglich halten, dass für eine bestimmte Periodenzahl die Adhäsion vollständig verschwinde.

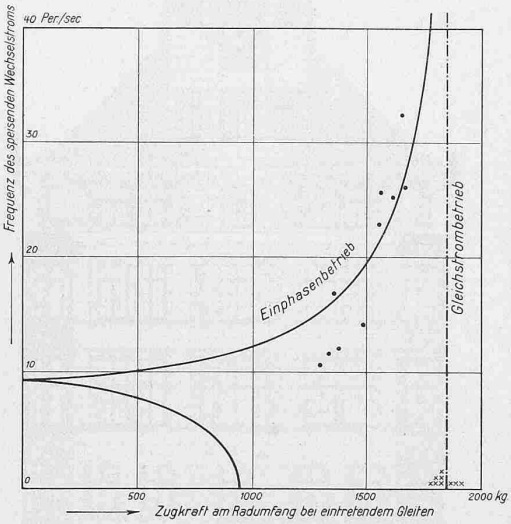

Abbildung 2.

Zusammenfassung.

Die Adhäsionsverhältnisse von Einphasen-Fahrzeugen mit unmittelbarem Antrieb durch Einphasenmotoren sind im allgemeinen dieselben, wie diejenigen der Fahrzeuge, die mittels Gleichstrommotoren oder Drehstrommotoren angetrieben werden. Eine Ausnahme tritt für Einphasen-Fahrzeuge dann ein, wenn die Schwingungszahl des federnden Antriebsapparates zwischen Motor und Radkranz zufällig übereinstimmt mit der Frequenz der pulsierenden Antriebskraft, wobei die Adhäsion auf ein Minimum sinkt; durch Erhöhung des Nachgiebigkeitsgrades des federnden Antriebsapparates kann jedoch die Adhäsion bis auf den normalen Betrag, wie er bei Antrieb mittels Motoren von konstanter Triebkraft erreichbar ist, gesteigert werden.

[1]) Vergl. Seite 158 in Bd. LXIII (14. März 1914), in der Arbeit des Verfassers über «Triebwerkbeanspruchungen usw.»

[2]) Seite 177 in Bd. LXIII (28. März 1914) enthält die bezügliche Formel für eine besondere und vereinfachende Annahme.

[1]) El. World, Band XLVIII, Seite 713.