

Ueber Drehmoment- und Geschwindigkeits-Verluste am Radumfang von Eisenbahnfahrzeugen

Autor(en): **Kummer, W.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **71/72 (1918)**

Heft 22

PDF erstellt am: **19.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-34851>

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.

INHALT: Ueber Drehmoment- und Geschwindigkeits-Verluste am Radumfang von Eisenbahnfahrzeugen. — Die Erweiterung des Hauptbahnhofs Zürich. — Das Theater in Langenthal, Kanton Bern. — Die elektrische Solothurn-Bern-Bahn. — Miscellanea: Brandproben an Eisenbetonbauten. Regelung von ein- und mehrphasigen Wechselstrom-Kommutatormaschinen mittels Gleichstrom. Leitsätze für den Bau evangelischer Kirchen. Normenausschuss der deutschen Industrie. Das Basler Münster Photographien-Weik. Verein deutscher Ingenieure. — Nekrologie: F. Leiber. — Konkurrenzen: Schulhausbau und öffentliche Anlage auf dem Milchbuck in Zürich. — Literatur. — Vereinsnachrichten Zürcher Ingenieur- u. Architekten-Verein. Gesellschaft ehem. Studierender: Maschineningenieur-Gruppe; Stellenvermittlung.

Band 72.

Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 22.

Ueber Drehmoment- und Geschwindigkeits-Verluste am Radumfang von Eisenbahnfahrzeugen.

Von Professor Dr. W. Kummer, Ingenieur, Zürich.

Zur rechnerischen Berücksichtigung der am Radumfang von Eisenbahnfahrzeugen auftretenden Energieverluste beschränkte man sich bisher auf die durch die sogenannte rollende Reibung hervorgerufenen Drehmoment-Verluste, für welche folgende Darstellung zweckmässig ist: Wird der Raddruck normal zum Geleise, d. h. der sogenannte Schienendruck mit G , in kg , bezeichnet, so tritt am Umfang des Rades ein Drehmoment $G \cdot \delta$ der rollenden Reibung auf, dessen Arm δ als Erfahrungskonstante in der Dimension einer Länge erscheint. Für Eisenbahnräder, von etwa 1 m Durchmesser, auf guten Schienen ist:

$$\delta = 0,0005 \text{ bis } 0,00055 \text{ m.}$$

Es soll hier auf die Streitfrage, ob δ vom Radhalbmesser r unabhängig ist, oder ob δ der Quadratwurzel aus dem Radhalbmesser proportional wächst, nicht eingetreten werden.¹⁾ Dreht sich der Radsatz mit der Winkelgeschwindigkeit ω , so entspricht dem Reibungsmoment $G \cdot \delta$ ein Reibungseffekt $G \cdot \delta \cdot \omega$, den wir von nun an als den Drehmoment-Verlust V_d am Radumfang auffassen und durch:

$$V_d = G \cdot \delta \cdot \omega$$

formulieren.

Dass bei der Arbeitsübertragung durch rollende Reibung auch Geschwindigkeitsverluste in Form von Gleitungen oder Schlüpfungen auftreten, ist erstmals 1875 durch O. Reynolds²⁾ demonstriert worden. Zur rechnerischen Verwertung brauchbare Messungen sind aber erst 1918 durch J. Jahn³⁾ bekannt gegeben worden. Obwohl Jahn, ebenso wie Reynolds, seine Messungen mehr nur zur mechanischen Erklärung des Wesens der rollenden Reibung verwendet wissen will, glauben wir doch, nachstehende Verallgemeinerungen, zum Zwecke rechnerischer Verwertung, aus den Versuchen Jahns folgern zu dürfen. Dazu scheint uns besonders die bemerkenswerten Übereinstimmung des aus den Versuchen Jahns sich ergebenden Zusammenhangs zwischen dem Adhäsionskoeffizient und der Gleitgeschwindigkeit mit anderweitigen Darstellungen dieses Zusammenhangs, auf Grund älterer und neuerer Versuche über gleitende Reibung, die Berechtigung zu liefern. Es sollen also zunächst die Begriffe des Adhäsionskoeffizienten und der Gleitgeschwindigkeit festgelegt werden. Der Adhäsionskoeffizient, den wir in der Folge mit f bezeichnen, ist durch die Beziehung:

$$f = \frac{\text{Kraft am Radumfang in } kg}{\text{Schienendruck in } kg}$$

festgelegt. Andererseits ist die Gleitgeschwindigkeit oder Schlüpfung s , ausgedrückt als Zahl zwischen 0 und 1, wobei die Zahl 0 der Abwesenheit jeglichen Gleitens, die Zahl 1 dagegen dem reinen Gleiten bei Fehlen jeglicher Rollbewegung entspricht, als verhältnismässiger Unterschied zwischen dem Wege x eines bestimmten Punktes des Radumfangs in einer gewissen Zeit am Schienenrand gegenüber dem in derselben Zeit zurückgelegten Wege $\omega \cdot r$ am Radumfang selbst zu definieren, also durch:

$$s = \frac{x - \omega \cdot r}{x}$$

Schlüpfungen $s < 1$ bezeichnet Jahn als „scheinbare“. Trotzdem er in seinen Versuchen beim Abwärtsrollen und beim

gelischer Kirchen. Normenausschuss der deutschen Industrie. Das Basler Münster Photographien-Weik. Verein deutscher Ingenieure. — Nekrologie: F. Leiber. — Konkurrenzen: Schulhausbau und öffentliche Anlage auf dem Milchbuck in Zürich. — Literatur. — Vereinsnachrichten Zürcher Ingenieur- u. Architekten-Verein. Gesellschaft ehem. Studierender: Maschineningenieur-Gruppe; Stellenvermittlung.

Aufwärtsrollen eines rund 110 kg schweren Rollkörpers auf schmaler eiserner Schienenbahn nicht dieselben Werte f und s feststellte, beschränken wir uns in der Folge auf die Wiedergabe der beim Abwärtsrollen gefundenen Werte, die uns aus verschiedenen Gründen, besonders auch wegen ihrer pessimistischeren Zahlenwerte, einer gewissen Verallgemeinerung fähig scheinen. Zu dieser Wiedergabe haben wir die folgende Abbildung gezeichnet, welche f als Funktion von s darstellt. Die betreffende Kurve:

$$f = F(s)$$

ist in der Tat von grundsätzlich übereinstimmendem Verlauf, wie die von Ch. Jacob¹⁾

bekannt gegebenen Kurven des Koeffizienten der gleitenden Reibung in Abhängigkeit von kleinen Gleitgeschwindigkeiten. Obwohl es für den Zweck der vorliegenden Studie nicht unbedingt nötig wäre, aber zur Erläuterung der von verschiedenen Forschern vorgenommenen Messungen des Reibungskoeffizienten zwischen Rad und Schiene bei hohen Geschwindigkeiten dient, möge erwähnt werden, dass für sehr hohe Gleitgeschwindigkeiten, die also oberhalb der von Jahn untersuchten liegen, der Koeffizient f bei $s = 1$ wieder abnimmt; dieses Verhalten des Reibungskoeffizienten bei hoher Geschwindigkeit kann nach F. Charron²⁾ aus der schmierenden Wirkung stark bewegter, Rad und Schiene umgebender Luft erklärt werden. Auf Grund unserer Kurve:

$$f = F(s)$$

kann nun für jedes s punktweise auch der zugehörige Wert des Gleitverlustes, d. h. des Geschwindigkeitsverlustes am Radumfang dargestellt werden; dieser Verlust ist nämlich im Relativmass pro 1 kg Schienendruck ohne weiteres darstellbar durch das Produkt $f \cdot s$. In der Abbildung ist der Verlauf von $f \cdot s$ über s ebenfalls dargestellt; es kann natürlich der Gleitverlust solange nicht in richtigen Effekteinheiten aufgetragen werden, als s selbst noch im Relativmass gegeben wird. Bei Vorliegen einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit des Zugs, die, in m/sek ausgedrückt, durch $v = r \cdot \omega$ bezeichnet werden möge, folgt dann für den, dem Schienendruck G entsprechenden Gleit- oder Geschwindigkeitsverlust V_g :

$$V_g = G \cdot f \cdot s \cdot v = G \cdot f \cdot s \cdot r \cdot \omega.$$

Für die Zulässigkeit praktischer Anwendung dieser Beziehung ist nun entscheidend, ob der grundlegende Zusammenhang:

$$f = F(s),$$

für den unsere Abbildung vorläufig nur bei kleinen Werten von v einigermaßen zuverlässig ist, auch bei verhältnismässig hohen Werten von v noch gültig bleibt. Nach den Bemerkungen Jahns erscheint dies wahrscheinlich; es ist aber noch nicht ganz gewiss. Es möge hier die Annahme der Gewissheit lediglich deshalb gemacht werden, weil sonst überhaupt keine zahlenmässigen Grundlagen mehr bestehen. Unter dieser Annahme haben wir nunmehr grundsätzlich folgenden Gesamtverlust V am Radumfang von Eisenbahnfahrzeugen in Betracht zu ziehen:

$$V = V_d + V_g = G \cdot \omega \cdot (\delta + f \cdot s \cdot r).$$

Von dieser Verlustsumme tritt der Verlust V_d unter allen Umständen, und zwar anscheinend unabhängig von der Grösse der bei einem gegebenen Fahrzeuge ausgenützten

¹⁾ Die bezügliche Literatur findet man auf Seite 18—20 der Schrift Boedecker, Wirkungen zwischen Rad und Schiene, Hannover 1887, aufgeführt.

²⁾ O. Reynolds, On rolling-friction, Philosophical Transactions, London 1876, Vol. 166, part I, page 155.

³⁾ J. Jahn, Die Beziehungen zwischen Rad und Schiene, Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 1918, Seite 121, 145, 339.

¹⁾ Ch. Jacob, Ueber gleitende Reibung, Ann. der Physik, 1912, S. 126.

²⁾ F. Charron, Rôle lubrifiant de l'air dans le frottement des solides, Comptes-Rendus, 1910, Tome 150, page 906.

Kraft am Radumfang auf. Andererseits tritt der Verlust V_g nur dann auf, wenn $f \cdot s$ fühlbar wird, was nach der Abbildung erst oberhalb eines gewissen Minimums von f der Fall ist. Dieses Minimum von f liegt zwischen 0,08 und 0,10. Mit andern Worten: Wenn eine Lokomotive von rund 100 t Adhäsionsgewicht Zugkräfte am Radumfang von nur 8000 bis 10000 kg zu entwickeln hat, so kann der Geschwindigkeitsverlust am Radumfang noch füglich vernachlässigt werden, während er für grössere Zugkräfte am Radumfang berücksichtigt werden muss. Es können im Weiteren auch folgende praktische Schlüsse gezogen werden: Geht man mit der Ausnützung der Adhäsion einer Lokomotive nur bis zu $f = \frac{1}{7} = 0,143$, so ist nach der Abbildung angenähert mit einem $s = 0,0015$ und einem $f \cdot s = 0,00021$ zu rechnen; geht man aber bis $f = \frac{1}{5} = 0,200$, so entsprechen diesem f nach der Abbildung die Werte $s = 0,030$ und $f \cdot s = 0,006$. Da man nun, mit Rücksicht auf das viel gleichförmigere Drehmoment der antreibenden Motoren, bei elektrischen Lokomotiven grössere Werte von f zulassen kann, als bei Dampflokomotiven, so wird der Verlust V_g somit auch für erstere bedeutungsvoller als für letztere. Andererseits bleibt V_g für getriebene Achsen praktisch stets verschwindend klein. Unter Benutzung des Begriffs der nutzbaren Leistung L_n am Radumfang einer treibenden Fahrzeugachse, für die D das unmittelbar an ihr angreifende Drehmoment bedeutet, wobei:

$$L_n = D \cdot \omega$$

ist, lässt sich der Wirkungsgrad η des Radumfangs einer solchen Achse folgendermassen bilden:

$$\eta = \frac{D \cdot \omega - V}{D \cdot \omega} = \frac{D \cdot \omega - G \cdot \omega \cdot (\delta + f \cdot s \cdot r)}{D \cdot \omega} \\ = 1 - \frac{G}{D} (\delta + f \cdot s \cdot r)$$

Weil f als Quotient aus Umgangskraft und Schienendruck definiert ist, wobei letzterer durch G , erstere genau durch:

$$\frac{1}{r} \cdot [D - G \cdot (\delta + f \cdot s \cdot r)]$$

oder mit guter Annäherung durch $\frac{1}{r} \cdot D$ gebildet werden, so gilt ebenfalls mit guter Annäherung:

$$f = \frac{D}{r \cdot G}$$

und folgt weiter mit guter Annäherung:

$$\eta = 1 - (\delta \cdot \frac{G}{D} + s).$$

Sowohl in dieser gut angenäherten, als auch in der genauen Formel:

$$\eta = 1 - \frac{G}{D} (\delta + f \cdot s \cdot r)$$

erscheint der Ausdruck $\frac{G}{D}$, der zur Beurteilung der Gewichtsausnützung von Lokomotiven, insbesondere von solchen ohne Laufachsen, als wichtiges Kriterium verwendbar ist, wie wir seit 1910 wiederholt dargelegt haben.¹⁾

Als Beispiel für die zahlenmässige Darlegung des Wirkungsgrades am Radumfang von Triebachsen soll die Lötchberglokomotive von 1911, Typ C+C, behandelt werden. Diese Maschine, mit den Baudaten:

$$G = 90\,000 \text{ kg}; r = 0,675 \text{ m}$$

gibt bei normaler Ausnützung ein Drehmoment:

$$D_{\text{normal}} = 8650 \text{ mkg}$$

wobei $f = 0,142$ und $s = 0,0015$ folgen. Nehmen wir weiter an, es sei der Arm der rollenden Reibung:

$$\delta = 0,0005 \text{ m},$$

so folgt für den Wirkungsgrad:

$$\eta_{\text{Normallast}} = 0,993 = 99,3 \%$$

Denken wir uns nun im kurzzeitigen Betrieb diese Maschine soweit überlastet, dass $f = 0,200$ wird, was vom Standpunkt der Betriebsicherheit, dank dem gleichförmigen Antrieb, noch gut möglich ist, dann wird:

$$D_{\text{maximal}} = 12\,150 \text{ mkg}$$

¹⁾ Vergleiche insbesondere Seite 41 bis 42 und 187 bis 190 unseres, 1915 erschienenen Werks: «Die Maschinenlehre der elektrischen Zugförderung».

und muss dann $s = 0,030$ folgen. Für gleichbleibendes δ , wie oben, folgt nun:

$$\eta_{\text{Maximalast}} = 0,966 = 96,6 \%$$

Der Vergleich der die Wirkungsgrade bei Normalast und bei Maximalast bedingenden Einzelverluste lässt erkennen, dass im ersten Fall der Drehmoment-Verlust, im zweiten Fall dagegen der Geschwindigkeits-Verlust massgebend ist.

Unser Beispiel zeigt damit deutlich, dass die bei elektrischen Lokomotiven mögliche hohe Ausnützung der Adhäsion auf die Berücksichtigung der Geschwindigkeits-Verluste am Radumfang führen muss.

Die Erweiterung des Hauptbahnhofs Zürich.

Seit Bekanntmachung des generellen Entwurfes der S. B. B. vom Juni 1916 zur Erweiterung des Hauptbahnhofs Zürich (veröffentlicht in Band LXVIII, S. 230, vom 11. November 1916) haben sich verschiedene Kreise mit dem Problem eingehend befasst.

In erster Linie waren es die von Regierungsrat und Stadtrat von Zürich mit der Begutachtung der Vorlage beauftragten *Experten*, die Ingenieure Dr. Ing. C. O. Gleim (Hamburg) und Prof. W. Cauer (Charlottenburg) in Verbindung mit Architekt Prof. Dr. K. Moser (Zürich), die ihre Auffassung samt Gegenvorschlägen in einem umfassenden Gutachten vom April 1918¹⁾ niedergelegt haben. Gleichzeitig sind die Zürcher Bahnhof-Fragen von einzelnen Teilnehmern am Wettbewerb für Zürich und seine Vororte studiert und bearbeitet worden, leider nur von Einzelnen, weil ein irreführender Satz in einer der Wettbewerbs-Beilagen die Meisten vom Studium der Hauptbahnhof-Erweiterung bzw. Umänderung abgehalten hat. Wenn auch dieser Wettbewerb naturgemäss keine ohne weiteres brauchbaren Vorschläge bringen konnte, so war er doch durch die stellenweise mit sehr grosser künstlerischer Freiheit vorgetragenen Ideen äusserst anregend. Er hat ernsthafte, noch im Gang befindliche Studien ausgelöst, von denen noch berichtet werden soll. Endlich haben Regierungsrat und Stadtrat eine besondere Kommission zum Studium aller dieser Vorschläge eingesetzt, deren technische Subkommission für den Bahnhof-Neubau aus den Ingenieuren E. Brunner-Vogt (Küsnacht), J. Bünzli, Direktor der S. O. B. (Wädenswil) und Prof. H. Studer (Zürich) zusammengesetzt ist.

Es ist somit die allgemeine Diskussion der für die Entwicklung Zürichs hochwichtigen Bahnhof-Frage eröffnet; sie wird natürlich in den nächsten Monaten auch die Schweiz. Bauzeitung beschäftigen. Da es sich dabei um z. T. ziemlich komplizierte Zusammenhänge handelt, deren Beurteilung im Einzelnen nur dem Fachmann möglich ist, glauben wir, mit einer kurzen systematischen Einführung in das vorliegende Verkehrsproblem einem Grossteil unserer Leser das Verständnis für die spätern Ausführungen erleichtern zu sollen.

I. Zur Einführung.

In den Abbildungen 1 bis 6 haben wir einige Schemata aufgestellt, die nicht Geleise, sondern nur (in Wirklichkeit normalerweise zweispurige) *Linien* darstellen. Alles Andere, im Betrieb nicht minder wichtige, wie Güterlinien, Dienst- und Abstellgeleise, ist zunächst weggelassen.

Die für Zürich wichtigen Transitlinien internationaler Bedeutung zeigt Abbildung 1. Es sind: 1. Die Nord-Südlinie Schaffhausen-Gothard; 2. die Richtung Südwest-Nordost, also Westschweiz-Ostschweiz, und 3. die Richtung Nordwest-Südost, Basel-Arlberg. Ihre Fortsetzungen ins benachbarte Ausland sind im Schema eingeschrieben, desgleichen die wichtigern schweizerischen Anschlusslinien. Diese drei Hauptrichtungen bedingen sechs Ein- bzw. Ausfahrlinien aus dem Hauptbahnhof Zürich, die indessen sich auf drei reduzieren, weil sie paarweise gemeinschaftlich verlaufen und zwar von Zürich bis Oerlikon, bzw. Brugg, bzw. Thalwil (Abbildung 2).

¹⁾ Siehe unter Literatur auf Seite 222 dieser Nummer.