

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 83 (1965)  
**Heft:** 48

**Artikel:** Untersuchungen und Erkenntnisse über das Adhäsionsverhalten elektrischer Lokomotiven  
**Autor:** Weber, H.H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-68319>

### **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:** 10.02.2026

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

## Untersuchungen und Erkenntnisse über das Adhäsionsverhalten elektrischer Lokomotiven

DK 621.335.11

Von H. H. Weber, dipl. Ing., Sektionschef für Triebfahrzeugbau bei der Generaldirektion der Schweiz. Bundesbahnen, Bern \*)

### 1. Einleitung

Das Adhäsionsproblem, d. h. das Problem der Übertragung der Zugkraft zwischen Rad und Schiene, ist so alt wie die Eisenbahn. Im Jahre 1812 glaubte man noch, es bedürfe dafür eines Zahnradsystems. Jedoch wurde sehr bald erkannt, dass das natürliche Haftungsangebot zwischen Rad und Schiene genügt, um schwere Züge zu fördern, und später sind eingehende Messungen durchgeführt worden, um die Grenzwerte der Reibung zu finden. Wichert [1], Müller A. E. [2], Metzkwow [3] und Curtius und Kniffler [4], H. I. Andrews [5] sowie Nouvion und Bernard [6], nahmen umfangreiche und systematische Messungen mit verschiedensten Lokomotivbauarten, teils im Fahr-, teils im Bremsbetrieb, vor, um den Grenzwertkoeffizienten zwischen Rad und Schiene, der sich als Quotient der am Rad auftretenden Zugkraft und der Radlast manifestiert, zu ergründen. Johnson [7] hat das Haftwertproblem in statistischer Sicht behandelt.

Seit diesen Untersuchungen wurden die Triebfahrzeuge stetig weiter entwickelt; an Stelle der Rahmenbauarten traten die modernen Drehgestellokomotiven. Es wurde bald deutlich, dass konstruktive Massnahmen am mechanischen und elektrischen Teil die Grösse des Adhäsionskoeffizienten zwischen Rad und Schiene zu beeinflussen vermögen. Insbesondere hat man seit dem Einsatz von Gleichrichterlokomotiven bei Bahnen, die mit 50 Hz-Einphasen-Wechselstrom elektrifiziert sind, erkannt, dass die Geschwindigkeit-Zugkraftkennlinie des Triebfahrzeugs die Reibung zwischen Rad und Schiene massgeblich bestimmt. So wurde bei 50 Hz-Gleichrichterlokomotiven ein viel besseres Adhäsionsverhalten festgestellt, als bei 50 Hz-Direktmotorlokomotiven. Das ist, wie die weiteren Ausführungen zeigen werden, leicht zu erklären. Bei 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz-Lokomotiven war ein solcher Unterschied quantitativ aus theoretischen Überlegungen heraus nicht ohne weiteres erkenntlich. Zur eindeutigen Abklärung des Sachverhalts entschlossen sich die Schweizerischen Bundesbahnen, an der Prototyplokomotive Re<sup>4</sup>/<sub>4</sub>II 11106 vergleichende systematische Adhäsionsmessungen mit Wechselstrom und gewelltem Gleichstrom durchzuführen. Zu diesem Zweck wurde die Versuchslokomotive behelfsmässig mit Silizium-Traktionsgleichrichtern versehen und so eingerichtet, dass die Fahrmotoren entweder direkt mit Wechselstrom von 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz oder mit gewelltem Gleichstrom gespeist werden konnten. Mittels einer einfachen Handbetätigung konnte man innert weniger Sekunden, auch während der Fahrt, von einer Stromart auf die andere umschalten, so dass übereinstimmende Adhäsionsverhältnisse an der Schiene mit beiden Traktionsarten untersucht werden konnten.

Diese Versuche kamen im Herbst 1964 und Winter/Frühling 1965 zwischen Croy-Romainmôtier und Le Day auf der Linie Lausanne-Valorbe zur Durchführung.

### 2. Konstruktive Parameter, die für das Adhäsionsverhalten eines Triebfahrzeugs eine Rolle spielen

Folgende konstruktive Massnahmen begünstigen hauptsächlich das Adhäsionsverhalten einer Lokomotive:

— Achslastausgleich

\*) Der gleiche Aufsatz erscheint auch in der deutschen Fachzeitschrift «Elektrische Bahnen»

- Flache Geschwindigkeits-Zugkraftkennlinie
- Dämpfung der Drehmomentpulsationen
- Möglichst feine Zugkraftabstufung
- Automatisch wirkende Schleuderbremse mit guter Anpassung an die Adhäsionsverhältnisse

#### a) Der Achslastausgleich

Übt beispielsweise eine vierachsige Drehgestellokomotive eine Zugkraft  $Z$  aus, so entsteht ein Moment  $Z b_1$  (Bild 1). Dadurch wird das vorlaufende Drehgestell entlastet und das nachlaufende entsprechend zusätzlich belastet. Die Entlastung bzw. Belastung beträgt

$$\Delta F = \frac{Z(b_1 - b_2)}{a}$$

Die Zugkraftübertragung vom Drehgestell auf den Kasten erfolge auf der Höhe  $b_2$  über Schienenoberkante (SOK). Infolge des an den Drehgestellen auftretenden Kräftepaars  $Z/2 \cdot b_2$  werden die in der Fahr- richtung vorderen Radsätze (Achsen) der Drehgestelle zusätzlich entlastet und die hinteren Achsen entsprechend mehr belastet. Diese Entlastung ist  $Z b_2 / 2c$ . Die Achslaständerungen der einzelnen Achsen werden somit

$$\Delta Q_1 = - \frac{Z}{2a} \left[ b_1 + b_2 \left( \frac{a}{c} - 1 \right) \right]$$

$$\Delta Q_2 = - \frac{Z}{2a} \left[ b_1 - b_2 \left( \frac{a}{c} + 1 \right) \right]$$

$$\Delta Q_3 = + \frac{Z}{2a} \left[ b_1 - b_2 \left( \frac{a}{c} + 1 \right) \right]$$

$$\Delta Q_4 = + \frac{Z}{2a} \left[ b_1 + b_2 \left( \frac{a}{c} - 1 \right) \right]$$

Man erkennt, dass die Achslaständerungen ausser von der international genormten Grösse  $b_1$  auch noch vom Abstand  $b_2$  abhängig sind. Bei Drehgestellokomotiven klassischer Bauart bedeutet  $b_2$  den Abstand Drehzapfenlager/SOK. Gelingt es,  $b_2 = 0$  werden zu lassen, so wird

$$\Delta Q = \frac{Z b_1}{2a}$$

Das vordere Drehgestell wird also nur noch um den Betrag

$$\frac{Z b_1}{a}$$

entlastet, das hintere um denselben Betrag mehr belastet. Eine Achslaständerung im Drehgestell tritt nicht mehr auf, denn die Achsen je eines Drehgestells sind gleichmässig belastet.

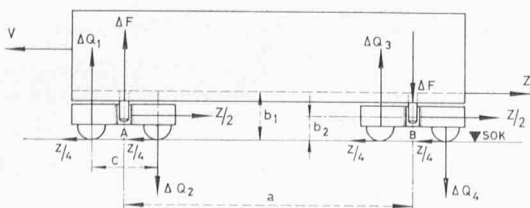


Bild 1. Drehgestell- und Achsentlastung bei einem vierachsigen Triebfahrzeug

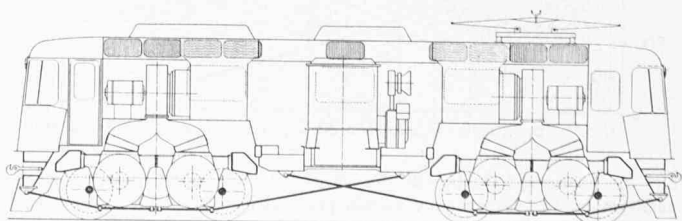


Bild 2. Prinzip der Tiefanlenkung zwischen Drehgestell und Kasten bei einem vierachsigen Triebfahrzeug (Lokomotive Re<sup>4</sup>/<sub>4</sub>II der SBB)

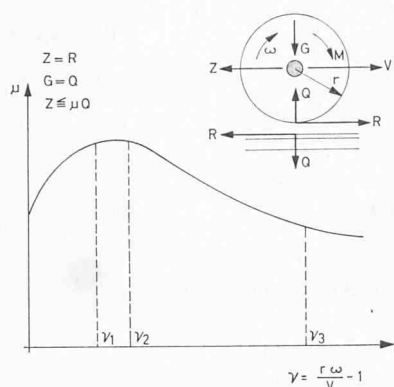
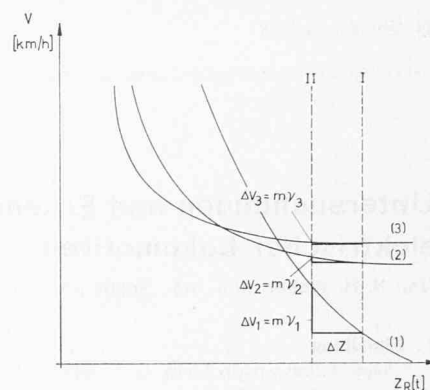


Bild 3 (links). Zusammenhang zwischen Adhäsionskoeffizient  $\mu$  und Makroschlupf  $\nu$

Bild 4 (rechts). Fahrzeugcharakteristik und Makroschlupf



Die konstruktive Verwirklichung wird durch die Anordnung von Zugstangen gemäss Bild 2 ermöglicht. Die Wirkungslinien der Zugstangenkräfte schneiden sich auf SOK; damit wird  $b_2 = 0$ . Diese als Tiefanlenkung bekannte Bauweise wird auch bei den neuesten Lokomotiven  $Re^{4/4II}$  der SBB angewendet. Sie hat den bedeutenden Vorteil gegenüber allen andern mechanischen Achsdruck-Ausgleichsmitteln, dass sie über den ganzen Bereich proportional der Zugkraft wirksam ist. Bei der 80 t schweren Lokomotive  $Re^{4/4II}$  beträgt bei einer Zugkraft von 26 t am Zughaken (höchste Anfahrzugkraft) der Achsdruck von Achse 1 18,27 t. Wäre die Lokomotive in bisher üblicher Bauart gebaut worden, so würde der Achsdruck bei der nämlichen Zugkraft auf etwa 16,5 t absinken. Weitere Angaben über Achslaständerungen siehe G. Borgeaud [8].

#### b) Der Einfluss der Fahrzeugcharakteristik

Metzkow [3] hat schon früh durch Messungen festgestellt, dass die Bremskraft des gebremsten Rades bei beginnendem Schlupf zwischen Rad und Schiene vorerst noch ansteigt. Wenn diese Zusammenhänge auch für das angetriebene Rad Gültigkeit haben, so muss sich der in Bild 3 dargestellte Verlauf von  $\mu$  in Funktion des Schlupfes  $\nu$  ergeben. Bei kleiner Gleitgeschwindigkeit  $\nu = r\omega/v - 1$  und sonst gleichen Bedingungen steigt der Reibungskoeffizient bis zu einem flachen Maximum und fällt bei zunehmendem Schlupf wieder ab.

Bild 4 stellt qualitativ drei verschiedene Fahrzeugcharakteristiken dar (Fahrgeschwindigkeit in Funktion der Zugkraft), und zwar eine Charakteristik

- mit steilem Anstieg im Anfahrbereich einer 50 Hz-Direktmotorlokomotive (Kurve 1)
- mit viel flacherem Anstieg im Anfahrbereich einer  $16^{2/3}$  Hz-Direktmotorlokomotive (Kurve 2) sowie
- mit noch etwas flacherem Verlauf beim Anfahren einer Gleichrichterlokomotive (Kurve 3).

Die verschiedenen Steilheiten sind gegeben durch die verschiedenen grossen induktiven Spannungsabfälle und magnetischen Hauptpolflüsse in den Fahrmotoren.

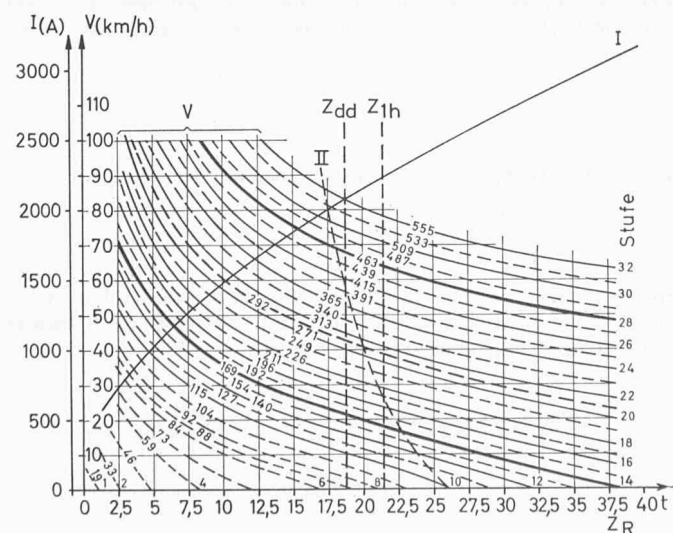


Bild 5. Fahrzeugcharakteristik der Versuchslokomotive  $Re^{4/4II}$  für Wechselstrombetrieb (ausgezogene Kurven gemessen, gestrichelte Kurven interpoliert)

I Motorstrom in Ampère  
V Fahrzeuggeschwindigkeit in km/h  
 $Z_R$  Totale Zugkraft am Radumfang in t

Bei der Zugkraft I beginne eine Achse zu gleiten; ihr Motor wird sich gemäss der  $V/Z$ -Charakteristik beschleunigen. Die Geschwindigkeitszunahme (Schlupfgeschwindigkeit) sei  $\Delta V$ . Wie Bild 4 zeigt, ist die Schlupfgeschwindigkeit beim Rückgang der Zugkraft von I auf II der 50 Hz-Lokomotive mit Direktmotoren weitaus grösser als bei der  $16^{2/3}$  Hz-Lokomotive mit Direktmotor oder Wellenstrommotor. Bei der 50 Hz-Lokomotive wird somit viel eher ein Wert des Schlupfes erreicht, bei dem das Gebiet hoher Reibungswerte (Bild 3) überschritten wird, während die nur leicht schlüpfende Achse bei den beiden andern Bauarten dank höher gewordenem Reibungswert nicht durchbrennt. Bilder 5 und 6 zeigen die gemessenen  $V/Z$ -Charakteristiken der Versuchslokomotive  $Re^{4/4II}$  11106 für Wechselstrom- und Gleichrichterbetrieb.

Die Bilder 7, 8 und 9 zeigen den Zusammenhang des Quotienten  $\Delta V/\Delta Z$  in Funktion der Zugkraft  $Z$  der Versuchslokomotive  $Re^{4/4II}$  bei Wechselstrom- und Gleichrichterbetrieb. Es wurden dabei je drei vergleichbare Fahrstufen (Spannungsstufen) untersucht (in Bild 5 und 6 dick ausgezogen), die sich hinsichtlich Geschwindigkeits- und Zugkraftbereich entsprechen. Bild 7 zeigt den Vergleich der Stufen, auf welchen man die maximale Zugkraft praktisch im Stillstand erreicht.

Das Gebiet der maximalen Zugkraft bei Stillstand wird praktisch nie erreicht, da sich das Triebfahrzeug schon vorher zu bewegen beginnt. Man erkennt auf dieser Stufe bei  $I_{max}$  einen noch ziemlich grossen Unterschied zwischen Wechsel- und Wellenstrombetrieb. Bei den nächsten Vergleichsstufen (Bild 8), die einer Fahrzeuggeschwindigkeit von etwa  $V = 20$  km/h bei Anfahrzugkraft entsprechen, ist der Unterschied praktisch unbedeutend und schon bei  $V = 40$  km/h (Bild 9) ist die Steilheit beider Kurven dieselbe. Auch aus diesen Überlegungen heraus musste erwartet werden, dass der Unterschied im Adhäsionsverhalten zwischen Wechsel- und Wellenstrombetrieb nur klein sein wird.

#### c) Massnahmen, um die Geschwindigkeit-Zugkraftcharakteristik im Anfahrbereich flach zu gestalten

Die Steilheit der Fahrzeugcharakteristik  $dV/dZ$  wird durch die ohmschen und induktiven Spannungsabfälle des Fahrmotors

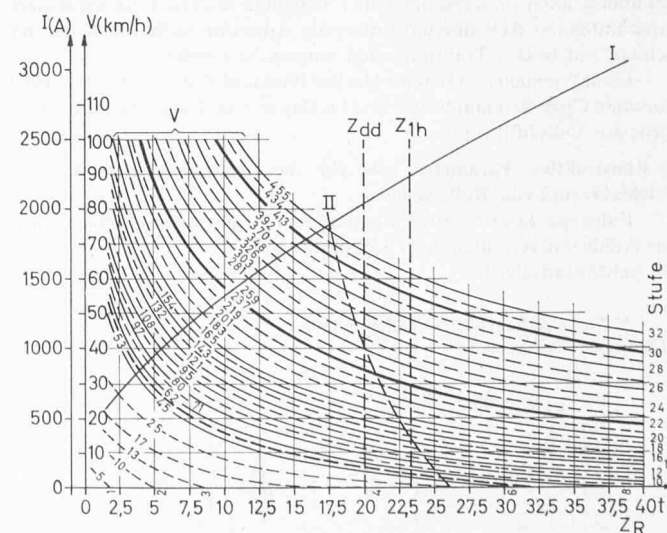


Bild 6. Gemessene Fahrzeugcharakteristik der Versuchslokomotive  $Re^{4/4II}$  für Gleichrichterbetrieb (Wellenstrombetrieb)

$Z_{dd}$  Dauerzugkraft am Radumfang in t  
 $Z_{1h}$  Stundenzugkraft am Radumfang in t  
II Adhäsionsgrenze nach Curtius und Kniffler

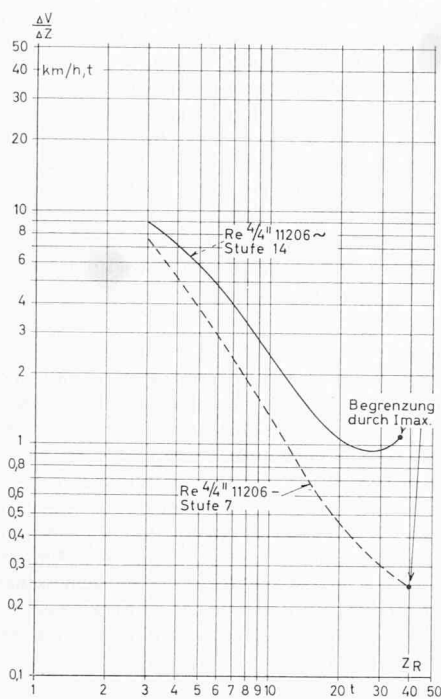


Bild 7. Stufenkurve bei maximaler Zugkraft (Stillstand)

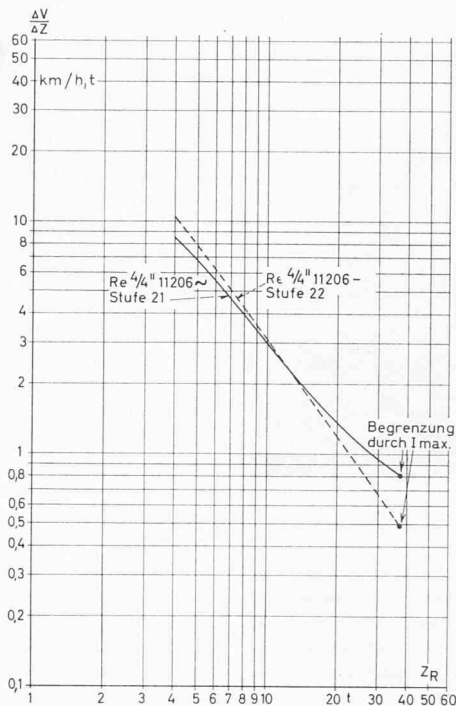


Bild 8. Stufenkurve bei etwa 20 km/h

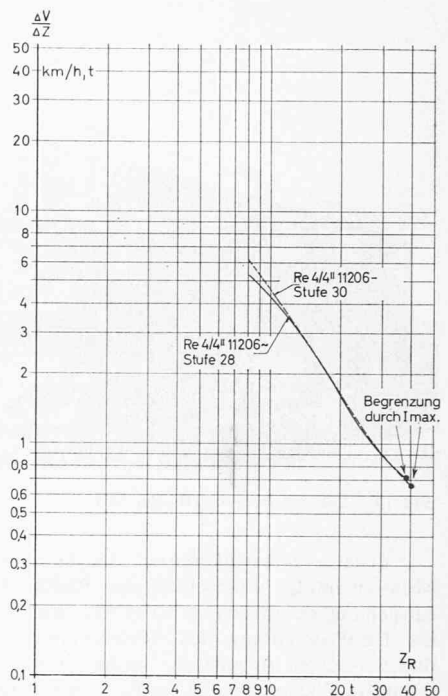


Bild 9. Stufenkurve bei etwa 40 km/h

Bilder 7, 8 und 9. Vergleich der Steilheiten entsprechender Stufenkurven für beide Betriebsarten der Versuchslokomotive Re 4/4 II 11106

und des Transformators und bei Gleichstromlokomotiven hauptsächlich durch die vorgeschalteten Widerstände bestimmt. Durch die Gleichrichtung des speisenden Stroms gelingt es, die induktiven Widerstände des Fahrmotors weitgehend zu verkleinern, so dass seine Charakteristik flacher wird als bei einem mit Wechselstrom gespeisten Fahrmotor. Der induktive Widerstand ist proportional zur Netzfrequenz, so dass der mit 50 Hz direkt gespeiste Fahrmotor in adhäsionstechnischer Beziehung am ungünstigsten ist, d. h. seine Charakteristik ist am steilsten. Beim mit  $16\frac{2}{3}$  Hz gespeisten Fahrmotor hingegen ist der Unterschied, wie schon dargelegt, gegenüber dem Wellenstrommotor gering.

Die parallel geschalteten Fahrmotoren weisen bei gleichem Raddurchmesser aller Achsen und schlupffreiem Lauf der Lokomotiven praktisch übereinstimmende Stromstärke auf. Dies gilt ebenfalls für die in Serie geschalteten Felder und Anker der einzelnen Motoren. Schaltet man die Feldwicklungen aller Motoren parallel (Bild 10), so nimmt der Strom eines schneller drehenden Rotors gegenüber den übrigen Rotorströmen ab. Der zugehörige Feldstrom hingegen vermindert sich wegen der Parallelschaltung nicht im gleichen Mass. Damit entsteht eine Feldverstärkung beim sich beschleunigenden Motor, was eine Verflachung seiner ursprünglichen Charakteristik bewirkt. Zudem nimmt die Zugkraft wegen des kleineren Rotorstroms ab und bei den übrigen normal drehenden Motoren zu. In der Charakteristik des durchdrehenden Motors wird  $\Delta V$  kleiner und  $\Delta Z$  grösser und damit  $\Delta V/\Delta Z$  ebenso klein oder sogar kleiner als beim Motor der Gleichrichterlokomotive. Man erzielt mit dieser Schaltung etwa die gleiche Wirkung des automatischen Zugkraftausgleichs, wie durch Shuntung der Rotoren beim vorlaufenden und der Felder beim nachlaufenden Drehgestell, wie dies bei Gleichstromlokomotiven der SNCF oder auch bei Gleichrichterlokomotiven ausgeführt worden ist.

Bild 11 zeigt die durch Messung und Rechnung ermittelte Wirkung der Parallelschaltung der Feldwicklungen für beliebig

gewählte Betriebspunkte. Die dünn ausgezogenen Linien sind die  $V/Z$ -Diagramme ohne eingeschaltete Parallelschaltpuffer, die dick ausgezogenen Linien stellen die durch direkte Parallelschaltung flacher gewordenen Charakteristiken auf den Spannungsstufen 3, 9, 13, 23 und 32 dar, während die gestrichelt gezeichneten, etwas steileren Kurven die Charakteristiken bei zusätzlich eingeschalteter Induktivität von  $3,3 \text{ m}\Omega$  ausdrücken.

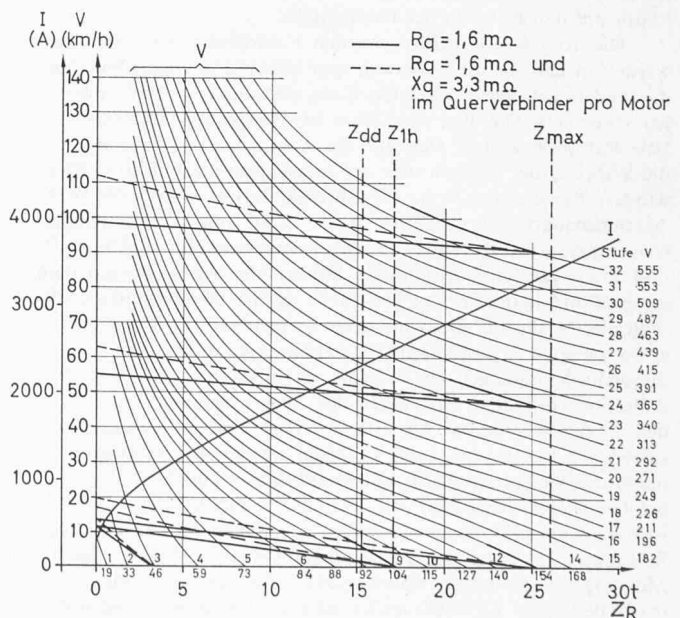


Bild 11. Wirkung der Parallelschaltpuffer auf die Charakteristik eines gegenüber den andern Triebbrädern schneller gleitenden Rades, Bezeichnungen wie Bilder 5 und 6, ausserdem:  $R_q$  Ohmscher Widerstand der Querverbinder,  $X_q$  Induktiver Widerstand der Querverbinder

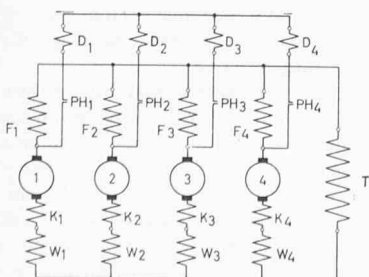


Bild 10. Schaltung der Parallelschaltpuffer. PH Parallelschaltpuffer, F Feldwicklung, K Kompensationswicklung, W Wendepolwicklung, D Drosselspeule, T Transformator, 1 bis 4 Rotoren der Fahrmotoren

—  $V/Z$  Charakteristik ohne Querverbinder (ausgeschaltete PH)  
—  $V/Z$  Charakteristik mit Querverbinder von  $1,6 \text{ m}\Omega$  Ohmschem Widerstand (eingeschaltete PH)  
- - -  $V/Z$  Charakteristik mit Querverbinder von  $1,6 \text{ m}\Omega$  Ohmschem Widerstand und  $3,3 \text{ m}\Omega$  induktivem Widerstand (eingeschaltete PH)



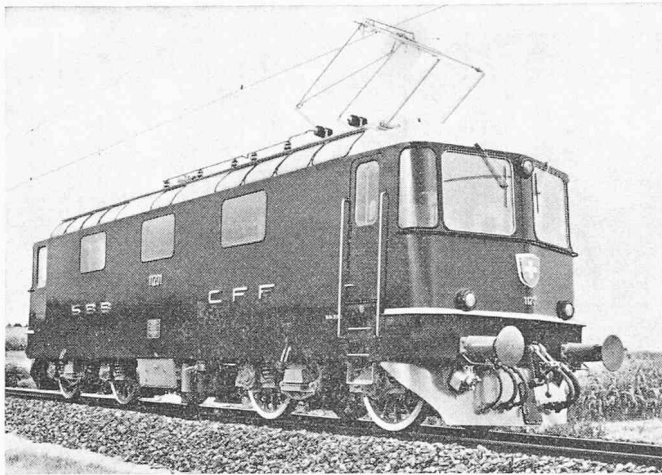


Bild 12. Lokomotive Re 4/4 II der SBB

Etwaige Stromdifferenzen der einzelnen parallel geschalteten Motoren infolge unterschiedlicher Raddurchmesser oder ungenauer Einstellung der neutralen Zone der Bürstenbrücke erfahren durch die Parallelschaltung der Feldwicklungen eine Verstärkung. Um diesen Nachteil zu mildern, werden in die Querverbindungen kleine induktive Widerstände  $D_1$  bis  $D_4$  eingeschaltet (Bilder 10 und 11).

#### d) Die Schleuderbremse

Die Wirkung der Schleuderbremse lässt sich aus dem bisherigen leicht erklären. Durch kurzzeitiges leichtes Anbremsen der Räder wird die Schlupfgeschwindigkeit der schleudernden Achse verringert, bis sie beruhigt ist.

#### e) Die Drehmomentpulsation

Der mit Wechselstrom gespeiste Einphasen-Seriekollektormotor weist an der Welle ein pulsierendes Drehmoment von doppelter Netzfrequenz auf. Der mit Wellenstrom gespeiste Motor entwickelt entsprechend der Wirkung der vorgeschalteten Glättungsdröselspule und des Hauptpolshunts eine kleinere Pulsation des Drehmoments. Die Pulsationen wirken von der Welle aus über das Getriebe des Achsantriebs auf die Achse und als Reaktionen über den Stator auf den Rahmen des Drehgestells.

Die vom Rotor herkommenden Pulsationen des Drehmoments werden in den für die Federung und Dämpfung eingeschalteten und das Federspiel überbrückenden Konstruktionsteilen mehr oder weniger absorbiert. Die über den Stator ins Drehgestell übertragene vertikale Pulsation könnte sich auf die Achslast auswirken, wenn nicht die Wirkung der Massen und der Achsfedern die Pulsation dämpfen würden. Für die vom Rotor herrührende Pulsation spielt die Wahl der Antriebsbauart eine wichtige Rolle. Sind nur wenig dämpfende, schwingungsabsorbierende Konstruktionselemente zwischen Rotor und Triebäder eingeschaltet, so können die Schwingungen deutlich am Rad und an der Schiene festgestellt werden. Wählt man jedoch eine Antriebsart, die die Schwingungen weitgehend absorbiert, wie z. B. einen geeignet konzipierten Tangential-Federantrieb, so sind Drehmomentschwingungen am Fahr-Motor nicht mehr schädlich für das Adhäsionsverhalten. Messungen der Achsentlastungen und Pulsationen an der Schiene, die die SBB im Jahre 1962 im Stillstand an verschiedenen Lokomotiven durchführten, zeigten die Wirkungen einzelner Antriebsbauarten deutlich. Die Achslasten sind dabei direkt an der Schiene gemessen worden [10]. Die Grösse der vertikalen Pulsationen wurde bei der neuerdings durchwegs angewendeten Antriebsbauart im Stillstand und nahe der Adhäsionsgrenze zu 3 bis 5% gefunden. Messungen während der Fahrt ergaben, dass die durch die Laufkinematik bedingten Vertikallastschwankungen viel grösser und bedeutender sind als die aus den Drehmomentvibrationen der Fahr-Motoren herrührenden geringen Kraftschwankungen. Bei Messungen der Tangentialkräfte an Triebachsen konnten keine Kraftschwankungen durch Pulsation festgestellt werden. Wesentliche Unterschiede der vertikalen und tangentialen Momentankräfte zwischen Schiene und Rad, herrührend von der Stromart der Fahr-Motoren, konnten also nicht festgestellt werden.

#### f) Die Zugkraftsprünge beim Überschalten von Stufe zu Stufe

Eine stetige, stufenlose Steigerung der Zugkraft wäre ein gutes Mittel, um die Adhäsion ohne Störung der Kontinuität der Zugkraftzunahme ganz ausfahren zu können. Stufenlose Steuerungen sind heute

mit wirtschaftlich vertretbaren Mitteln noch nicht erhältlich. Weiter ist die Verwendbarkeit von gesteuerten Gleichrichtern mit Rücksicht auf die Rückwirkungen auf die Stromnetze sowie die elektrischen Anlagen und Einrichtungen für Fernmeldewesen und die Signal- und Sicherungsanlagen der Bahnen, im besondern in grossen Bahnhöfen, noch nicht abgeklärt. Man behilft sich mit hohen Stufenzahlen, die mit der bekannten Hochspannungssteuerung ohne Schwierigkeiten und mit annehmbarem Aufwand erreichbar sind. Dabei ist es notwendig, dass die Zugkraft beim Überschalten von Stufe zu Stufe nicht über- oder unterpendelt, sondern möglichst stetig zunimmt. Durch geeignete Wahl der Überschaltwiderstände oder -Dröselspulen usw. wird dies heute weitgehend erreicht. (Siehe auch den Abschnitt 3c «Durchführung der Versuche».)

### 3. Die Adhäsionsmessungen

Wie eingangs erwähnt, wurde eine Lokomotive Re 4/4 II (Bild 12) für wahlweisen Wechsel- und Wellenstrombetrieb eingerichtet, indem man sie behelfsmässig mit Siliziumgleichrichtern ausrüstete und für die Umschaltung auf die eine oder andere Betriebsart der Fahrmotoren während der Fahrt einrichtete. Für die Glättung des Wellenstroms verwendete man zwei Einheiten der vorhandenen Bremsdröselspulen und ersetzte die Getriebe (1:2,636) durch solche mit einem grösseren Übersetzungsverhältnis (1:3,8), um die Anfahrzugkraft von 26 auf 36,4 t erhöhen zu können. Die gemessenen Fahrzeugcharakteristiken sind in den Bildern 5 und 6 wiedergegeben. Durch den Einbau der verschiedenen Zusatzapparaturen stieg das Lokomotivgewicht von 80 auf 84 t.

#### a) Die Messanordnung

Bild 13 zeigt schematisch die Messanordnung. Die Messeinrichtungen waren in einem Dynamometerwagen und einem Oszillographenwagen untergebracht. Folgende Messgrössen wurden gemessen und registriert:

##### Für die Zugkraft

— die Motorströme  $I$  über Stromwandler oder Shunt je nach Betriebsart

— Zugkraft  $Z_S$  in der Zugstange der Tiefanlenkvorrichtung

— Zugkraft  $Z_H$  am Haken mittels Amsler-Dynamometerwagen

##### Für den Schlupf

Die Drehzahlen mit je einem Drehzahl-Messwertgeber an der 1. und 4. Achse (die Motoren der 2., 3. und 4. Achse waren bei diesen Messungen ausgeschaltet). Diese Messwertgeber sind Gleichstromgeneratoren, die gegeneinander geschaltet eine dem Schlupf proportionale Gleichspannung abgeben.

##### Für die Drehgestellast

Nachdem die Tiefanlenkung die gleichmässige Belastung der Achsen jedes Drehgestells bewirkt, musste für die Achslastbestimmung nur das auf den Lokomotivkasten wirkende Moment der Zugkraft  $Z \cdot b$  berücksichtigt werden.

Mittels Potentiometern wurden schliesslich die Bewegungswege  $s$  Achse/Drehgestell und Kasten/Drehgestell gemessen und gleich wie die übrigen Messwerte mittels Schleifenoszillographen registriert.

#### b) Messparameter

Bild 13a zeigt die Messparameter, die für die Adhäsionsmessungen berücksichtigt wurden. Es zeigte sich schon bald, dass dem zusätzlichen pneumatisch-mechanischen Achsdruckausgleich keine weitere Bedeutung mehr zukam, da die Tiefanlenkung diese Aufgabe der Entlastung angepasster besorgte. Der Parameter  $SZ$  fiel daher für die weiteren Versuchsreihen aus. Für jeden der übrigen Parameter wurden pro Geschwindigkeitsstufe rd. 60 bis 80 Einzelmessungen durchgeführt. Die Geschwindigkeitsstufen waren 0, 5, 15, 30 und 45 km/h. Sämtliche Messungen wurden bei trockenen Schienen, d. h. guter Adhäsion und bei leicht feuchtem, d. h. schlechtem Schienenzustand, durchgeführt. Da die Niederschlagsmengen während der Versuchsperiode gering waren, mussten die Schienen mehrmals mittels Tankwagen unmittelbar vor der Versuchsfahrt gespritzt werden. Es konnte der Feuchtigkeitszustand der Schienenaufläufen nachgeahmt werden, wie er bei beginnendem Regen auftritt, wo die Adhäsion bekannterweise besonders ungünstig ist.

Für die Vergleichsversuche mit der Versuchslokomotive musste noch geprüft werden, in wie weit die Ungleichheit der Stufenzahl, die bis zum Erreichen der Anfahrzugkraft bei Stillstand zur Verfügung stand, zu berücksichtigen war. Aus den Bildern 5 und 6 erkennt man, dass bis zum Erreichen der Zugkraft von 37,5 t bei Wechselstrombetrieb 13 Stufen, bei Wellenstrombetrieb jedoch nur 8 Stufen zur Verfügung standen. Dieser Unterschied rührt von der identischen Transformator-Anzapfungsdisposition für beide Betriebsarten her.

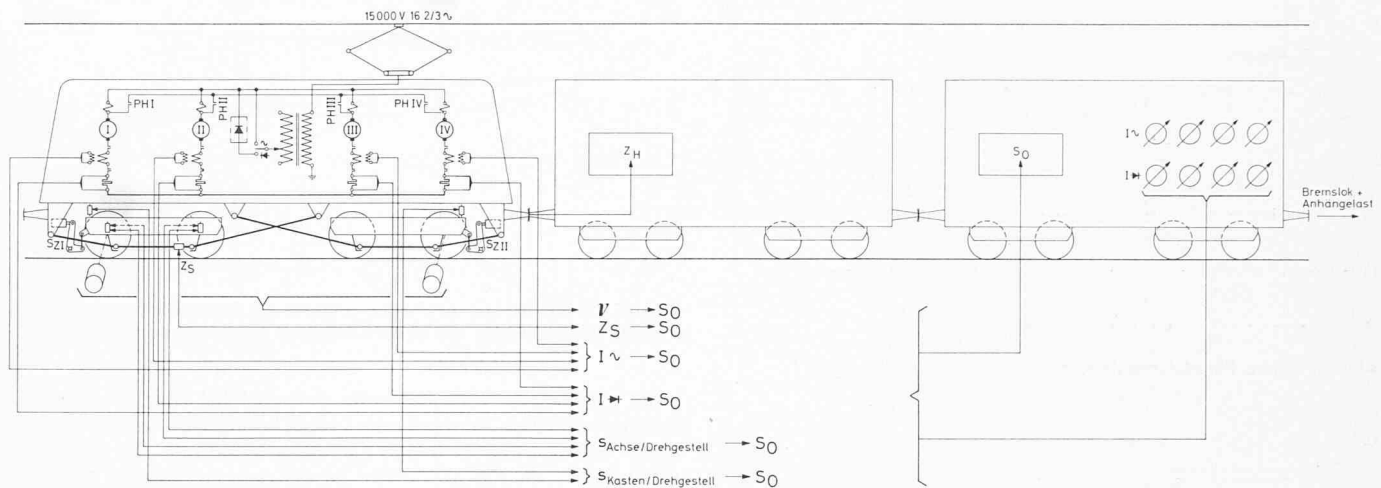


Bild 13. Messanordnung für die Adhäsionsmessungen mit der Versuchslokomotive Re 4/4 II 11206

PH Parallelschaltpuffer SZ Seilzug S<sub>0</sub> Schleifenszillograph

Wie diesem Umstand in der Bewertung der Versuchsergebnisse Rechnung getragen wurde, wird unter dem Abschnitt c) behandelt.

#### c) Durchführung der Versuche

Der Versuchszug bestand aus der Versuchslokomotive Re 4/4 II, dem Dynamometerwagen, einem Oszillographenwagen sowie zwei Bremslokomotiven (1 Ae 6/6 und 1 Re 4/4 II). Im normalen Betrieb verändert der Lokomotivführer die Zugkraft, indem er die Spannung an den Fahrmotoren durch Zu- und Abschalten von Spannungstufen des Transformators variiert. Bei den Versuchen konnte die Adhäsionsgrenze entweder so ermittelt werden, dass man bei konstant gehaltener Bremskraft die Zugkraft der Versuchslokomotive bis zum Beginn des Schleuderns steigerte (Beschleunigungsverfahren) oder indem man bei konstant gehaltener Zugkraft die Bremskraft soweit praktisch stufenlos steigerte, bis Schleudern einsetzte (Verzögerungsverfahren). Beim zweiten Verfahren können sich die Zugkraftsprünge nicht bemerkbar machen, und es wurden daher bei diesem Verfahren etwas höhere Adhäsionskoeffizienten gemessen.

Beide Verfahren sind bei Beginn der Versuche systematisch auf ihre Einwirkung auf die Messergebnisse untersucht worden. Diese Untersuchung drängte sich besonders deshalb auf, weil die Zugkraftabstufung, wie die Bilder 5 und 6 zeigen, bei Wechsel- und Wellenstrombetrieb nicht gleich war. Bei den Versuchen mit Wechselstromspeisung der Motoren ergaben die Messungen beim Verzögerungsverfahren durchschnittlich 6%, bei Wellenstrombetrieb 7% höhere Adhäsionswerte (siehe Bild 14). Daraus geht hervor, dass die unterschiedliche Abstufung zwischen Wellenstrom- und Wechselstrombetrieb kaum einen Einfluss auf die Versuchsergebnisse hatte, was den Vergleich zwischen beiden Betriebsarten erleichterte. Die weiteren Versuche wurden demzufolge nach dem Beschleunigungsverfahren durchgeführt, um Messwerte zu erhalten, die dem praktischen Betrieb entsprechen.

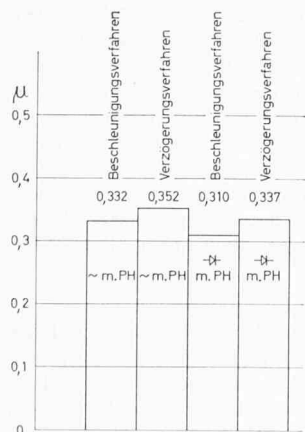


Bild 14. Vergleich der Messresultate zwischen Beschleunigungs- und Verzögerungsverfahren (Einfluss der Stufenzahl).

- s Bewegung zwischen Kasten und Drehgestell bzw. Achse und Drehgestell  
 ν Schlupf  
 I Fahrmotorströme  
 Z<sub>H</sub> Zugkraft am Haken  
 Z<sub>S</sub> Zugkraft in der Zugstange

	→	~	→	~	→	~	→	~
→	•							
~		•						
PH			•	•		•	•	
SZ					•	•	•	•

Bild 13a (rechts). Auszumessende Parameterkombinationen bei guten und schlechten Adhäsionsverhältnissen

Ursprünglich war geplant, den Adhäsionskoeffizienten nur an der ersten vorlaufenden Achse zu messen. Man erkannte während der Versuche, dass infolge der Wirkung der Tiefzugvorrichtung die 1. und die 2. Achse praktisch miteinander zum Gleiten oder Schleudern kamen, so dass es nicht sinnvoll gewesen wäre, den Adhäsionskoeffizienten nur für die 1. Achse zu messen. Nachdem man sich durch Abwägung vergewissert hatte, dass die beiden Drehgestelle genau symmetrisch und gleich belastet sind, war es zulässig, den Adhäsionskoeffizienten auf das vorlaufende Drehgestell zu beziehen. Die vom vorlaufenden Drehgestell ausgeübte Zugkraft wurde aus der Zughakenkraft Z<sub>H</sub> bestimmt. Die Zugkraft am Rad ergibt sich aus

$$Z_R = Z_H + G_{Lok} (w_1 \pm s \pm 102 a \xi_{Lok})$$

Darin bedeuten

- Z<sub>H</sub> die Zugkraft am Haken in t  
 G<sub>Lok</sub> das Gewicht der Lokomotive in t  
 w<sub>1</sub> den Fahrwiderstand der Lokomotive im geraden Gleis in kg/t  
 s die Steigung in ‰ und kg/t  
 a die Beschleunigung in m/s<sup>2</sup>  
 ξ<sub>Lok</sub> den Zuschlagfaktor für die Beschleunigung der rotierenden Massen der Lokomotive

Der Fahrwiderstand w<sub>1</sub> der Lokomotive wurde durch Messungen mit dem Dynamometerwagen und der Zuschlagfaktor ξ<sub>Lok</sub> durch

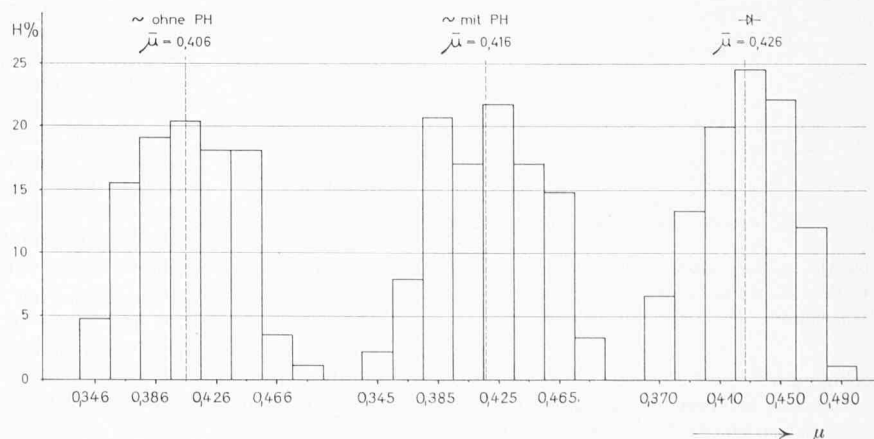


Bild 15. Beispiel einer Häufigkeitsverteilung der μ-Werte für die verschiedenen konstruktiven Parameter, bezogen auf Drehgestell I, V = 5 km/h, trocken

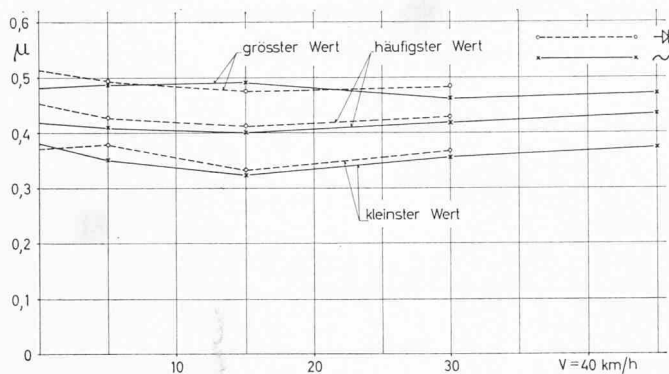


Bild 16. Ohne Parallelschalhüpfers, trockener Schienenzustand

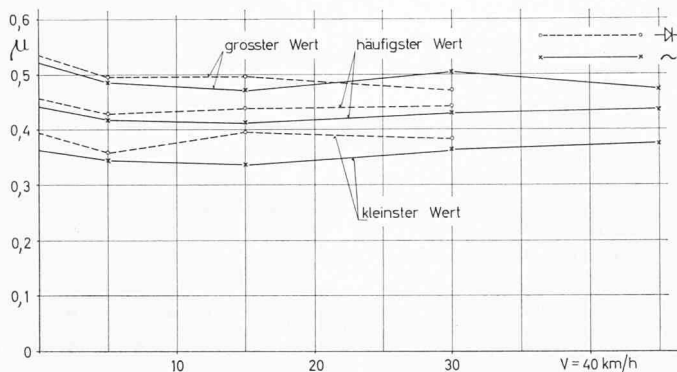


Bild 17. Mit Parallelschalhüpfers, trockener Schienenzustand

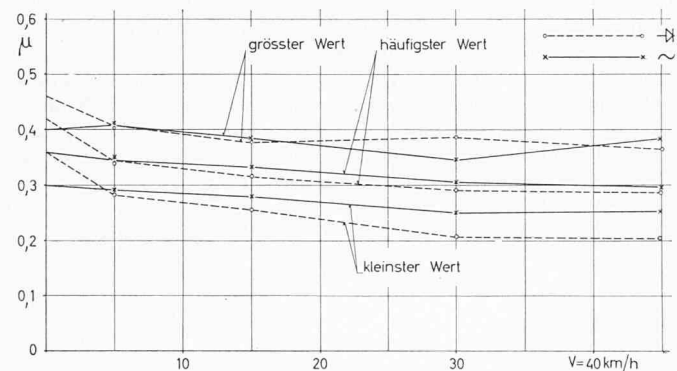


Bild 18. Ohne Parallelschalhüpfers, feuchter Schienenzustand

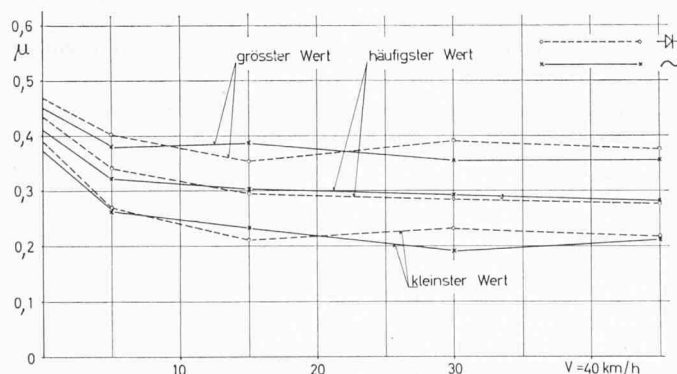


Bild 19. Mit Parallelschalhüpfers, feuchter Schienenzustand

Bilder 16 bis 19. Adhäsionskoeffizient  $\mu$  für Drehgestell I in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit  $V$ ; häufigste, grösste und kleinste Werte für Wechselstrom- und Gleichstrombetrieb

Rechnung bestimmt. Bei jeder Messung musste ebenfalls die während der Messung befahrene Steigung und die vorhandene Beschleunigung gemessen werden (die Messungen sind nur in geraden Gleisabschnitten vorgenommen worden). Die so erhaltenen Werte für die Zugkraft  $Z_R$  wurden mit den gleichzeitig aufgenommenen Motorstromwerten kontrolliert. Hiefür dienten eigens dafür hergestellte Eichkurven Strom/Zug-

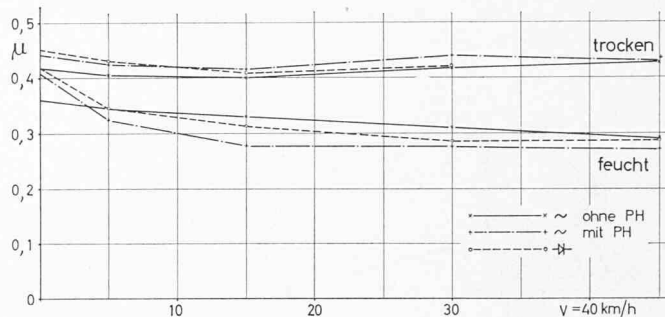


Bild 20. Vergleich der häufigsten  $\mu$ -Werte für Drehgestell I in Funktion des Schienenzustandes und der untersuchten konstruktiven Parameter

kraft, wobei die bei jeder Fahrstufe, d. h. auch bei jeder Geschwindigkeit veränderlichen Formfaktoren sowohl bei Wellen- wie bei Wechselstrom berücksichtigt wurden. Als weitere Kontrolle des Zugkraftwertes diente die mit Messstreifen (strain-gauges) ermittelte Kraft an der Zugstange  $Z_S$  (Bild 13). Die nach den drei verschiedenen Methoden ermittelten Zugkräfte stimmen im Rahmen der Messgenauigkeit, d. h. rd. auf  $\pm 2$  bis 3%, gut überein.

Die Entlastung des voranfahrenden Drehgestells durch das Kastenmoment wurde für jede Messung ebenfalls in Rechnung gesetzt. Der Adhäsionskoeffizient, auf das vorlaufende Drehgestell bezogen, ergibt sich also zu

$$\mu_D = \frac{Z_R}{2 G'}$$

$G'$  ist die durch das Kastenmoment verringerte Drehgestelllast.

Durch besondere Kennmarken wurden der Oszillograph im Oszillographenwagen und die Schreiber des Dynamometers im Dynamometerwagen synchronisiert, um zeitliches Übereinstimmen der entsprechenden Werte zu gewähren.

#### d) Die Auswertungsmethode

Die gefundenen Messwerte sind von den verschiedenen Parametern abhängig. Nebst den unter 2. angegebenen konstruktiven Parametern beeinflussen auch der jeweilige Schienenzustand (feucht, nass, trocken, schmutzig oder fettig usw.) und der momentane Berührungspunkt zwischen Rad und Schiene die Reibungsverhältnisse. Es ist auch anzunehmen, dass nicht bei jedem Messpunkt bis an die genau übereinstimmende äusserste Grenze des Schlupfes zwischen Rad und Schiene gefahren worden ist. Es ist daher zu erwarten, dass die festgestellten  $\mu$ -Werte streuen. Nach den Regeln der mathematischen Statistik sind die arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichungen, d. h. die Grössen für die Streuung der Messwerte, bestimmend für die Häufigkeitsverteilung der gefundenen Resultate. Für den praktischen Betrieb sind die am häufigsten vorkommenden Werte (oft mit dem arithmetischen Mittelwert identisch), ferner die Streuwerte entsprechend der Standardabweichung und schliesslich die nur sehr selten vorkommenden kleinsten und grössten Werte massgebend [7].

Die bei der Versuchslokomotive Re  $4/4^{II}$  gefundenen Messresultate wurden hinsichtlich der häufigsten, der grössten und der kleinsten sowie der sich in einem Streubereich von 95% Summenhäufigkeit bewegenden Werte ausgewertet. Zunächst wurden pro Parameter (Geschwindigkeits-, Wetter- und konstruktiver Parameter) rd. 80 Messfahrten durchgeführt. Mit den gefundenen  $\mu$ -Werten wurden die Hystogramme aufgestellt, wie in Bild 15 als Beispiel gezeigt ist. Die so gefundenen häufigsten, kleinsten und grössten Werte wurden in Funktion der Fahrgeschwindigkeit aufgetragen und verglichen. Weiter wurde aus den Hystogrammen die Summenhäufigkeit berechnet, um daraus zu ersehen, ob es sich um eine Normal- oder um eine Mischverteilung handelt und wie gross die Schleuderwahrscheinlichkeit für die einzelnen Parameter ist.

#### e) Diskussion der Messergebnisse

Die Bilder 16, 17, 18 und 19 zeigen den  $\mu$ -Verlauf in Funktion der Fahrgeschwindigkeit, und zwar mit und ohne Parallelverbindung der Motorfelder (Parallelschalhüpfers PH) für Wechsel- und Wellenstrombetrieb bei trockenem und feuchtem Schienenzustand. In diesen Bildern sind jeweils die häufigsten, die grössten und die kleinsten Werte angegeben. Übereinstimmend geht daraus hervor, dass der  $\mu$ -Verlauf in Funktion der Geschwindigkeit sowohl bei Wechsel- und Wellenstrombetrieb zwischen 5 und 45 km/h ziemlich konstant ist.

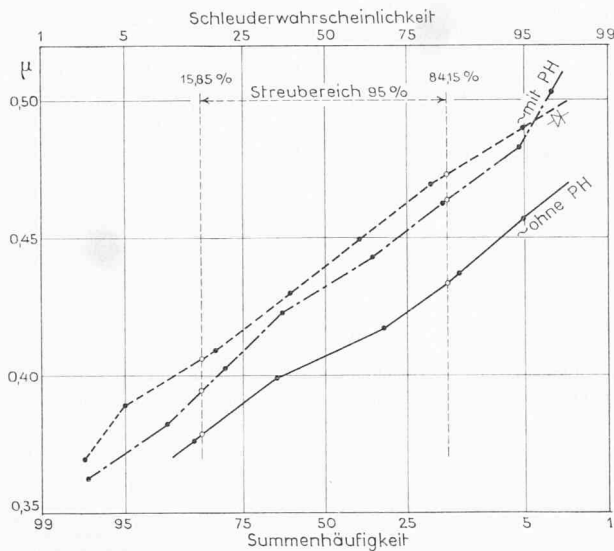


Bild 21. Bei trockenem Schienenzustand und  $V = 0$  km/h

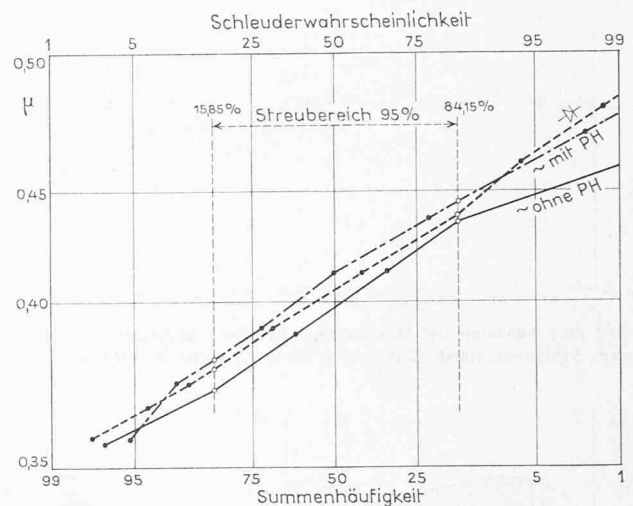


Bild 22. Bei trockenem Schienenzustand und  $V = 30$  km/h

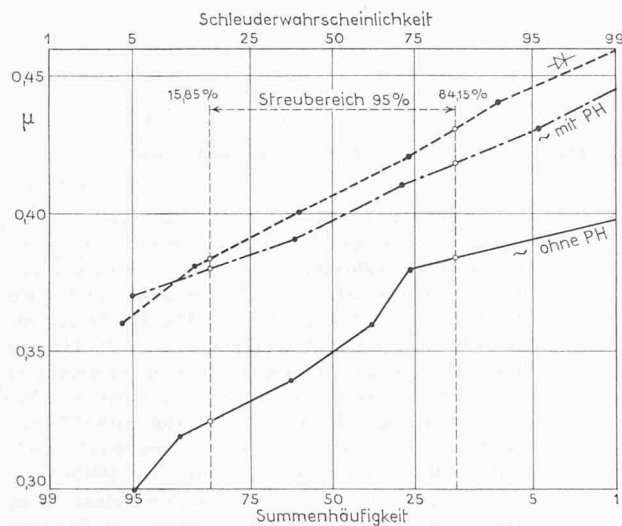


Bild 23. Bei feuchtem Schienenzustand und  $V = 0$  km/h

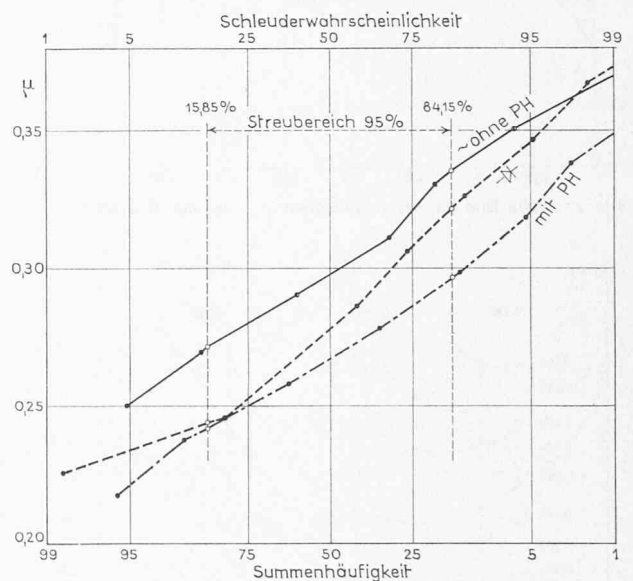


Bild 24. Bei feuchtem Schienenzustand und  $V = 30$  km/h

Bilder 21 bis 24. Schleuderwahrscheinlichkeit für die Versuchslokomotive Re  $4/4$  II mit den untersuchten konstruktiven Parametern

Bei feuchtem Wetter erkennt man ein ziemlich starkes Abfallen der Werte zwischen 0 und etwa 5 km/h.

Die häufigsten Werte sind für Wechsel- und Wellenstrombetrieb praktisch gleich und die grösste Streuung zwischen den höchsten und niedrigsten Werten ist praktisch bei beiden Betriebsarten dieselbe. Man erkennt also schon aus diesen vier Kurven, dass die Betriebsart (Wechsel- oder Wellenstrombetrieb) für das Adhäsionsverhalten einer  $16\frac{2}{3}$  Hz-Lokomotive praktisch keinen Einfluss hat. Die hier für beide Betriebsarten gefundenen recht hohen Adhäsionskoeffizienten müssen in erster Linie der Tiefzugvorrichtung zwischen Drehgestell und Kasten und der Verwendung eines geeigneten Federantriebs zugeschrieben werden.

Bei trockenem Schienenzustand sind die  $\mu$ -Werte mit Parallelschaltheupfer (PH) etwas grösser, bei nassem Schienenzustand haben die eingeschalteten Parallelschaltheupfer eine kleine Verminderung der  $\mu$ -Werte gebracht. Die Ergebnisse bei trockenen Schienen sind leicht verständlich; diejenigen bei feuchten Schienen hingegen nicht so leicht erklärbar (s. Abschnitt f).

Bild 20 zeigt die häufigsten  $\mu$ -Werte in Funktion der Geschwindigkeit bei trockenen und feuchten Schienen. Auch hier ist wiederum der äusserst kleine Unterschied zwischen Wechsel- und Wellenstrombetrieb erkennbar. Die häufigst vorkommenden Werte bei trockenen und feuchten Schienen bewegen sich für den gesamten gemessenen Geschwindigkeitsbereich zwischen etwa 0,28 und 0,44.

Aus sämtlichen Hystogrammen wurden die Summenhäufigkeiten berechnet. Als typische Ergebnisse zeigen die Bilder 21, 22, 23 und 24

die  $\mu$ -Werte in Funktion der Summenhäufigkeit bei  $V = 0$  und 30 km/h, bei trockenen und feuchten Schienen für alle untersuchten konstruktiven Parameter. In diesen Kurven ist jeweils von rechts nach links die Summenhäufigkeit aufgetragen; daraus kann abgelesen werden, bis zu welchem Prozentsatz aller gefahrenen Fälle der entsprechende  $\mu$ -Wert überschritten wurde. Weiter entspricht der zu 100% ergänzte Wert der Schleuderwahrscheinlichkeit in % ein Ausdruck, der besagt, in wie viel Fällen von 100 ein Schleudern eingetreten ist. Dieser Begriff will also nicht bedeuten, dass der Schleudernbeginn für diese Betriebsarten im allgemeinen vorausgesagt werden kann; er hat für die gefahrenen Versuche den Charakter eines Vergleichsparameters.

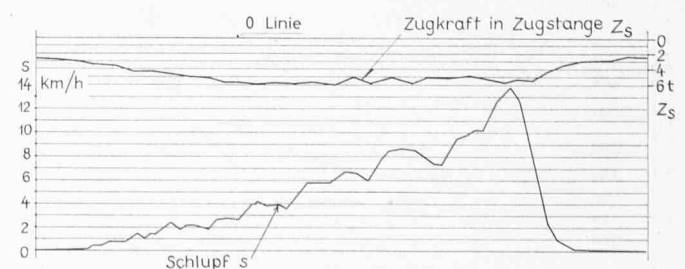


Bild 25. Zugkraft- und Makroschlupfverlauf an der Triebachse I bei  $V = 30$  km/h, Wechselstrombetrieb und feuchtem Schienenzustand



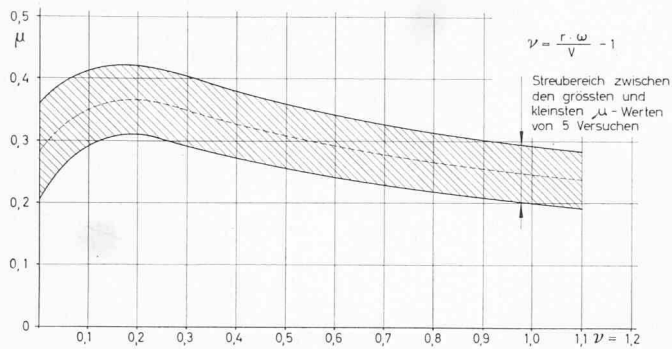


Bild 26. Adhäsion und Makroschlupf bei Wechselstrombetrieb und trockenem Schienenzustand. Gemessene Werte zwischen  $V = 2,6$  und  $10,2$  km/h

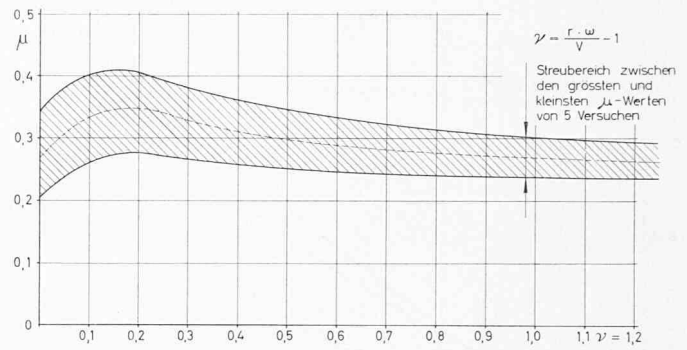


Bild 29. Adhäsion und Makroschlupf bei Gleichrichterbetrieb und trockenem Schienenzustand. Gemessene Werte zwischen  $V = 5$  und  $9,5$  km/h

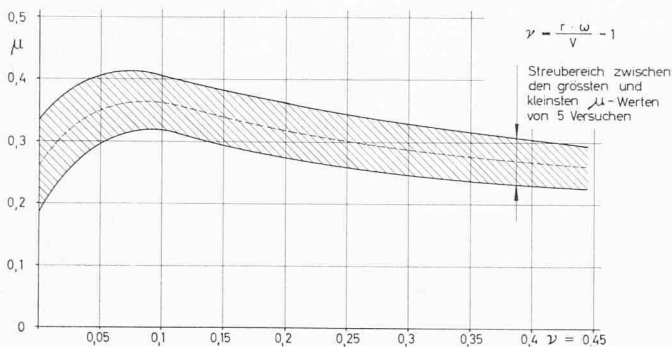


Bild 27. Wie Bild 26, Werte zwischen  $V = 35$  und  $41,9$  km/h

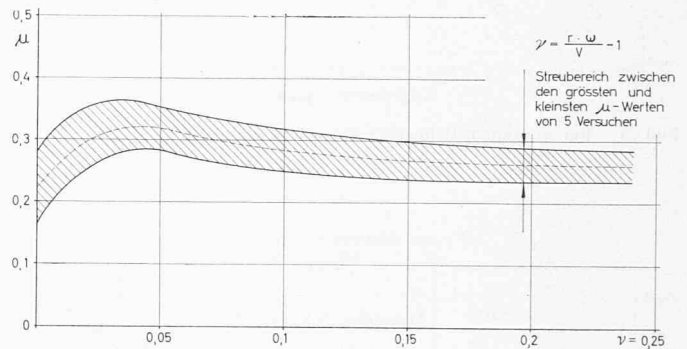
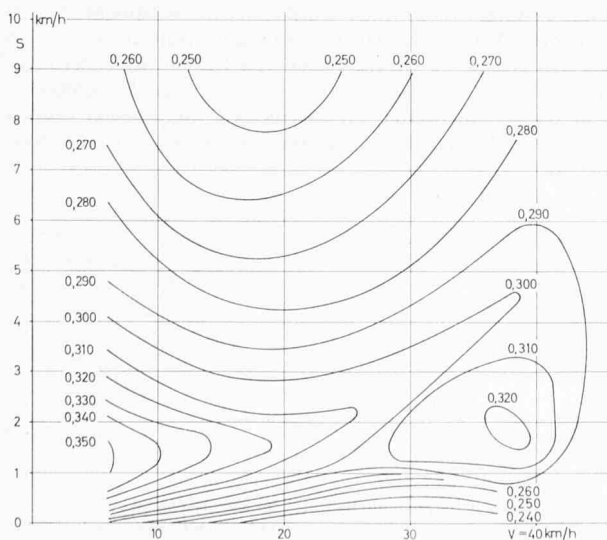
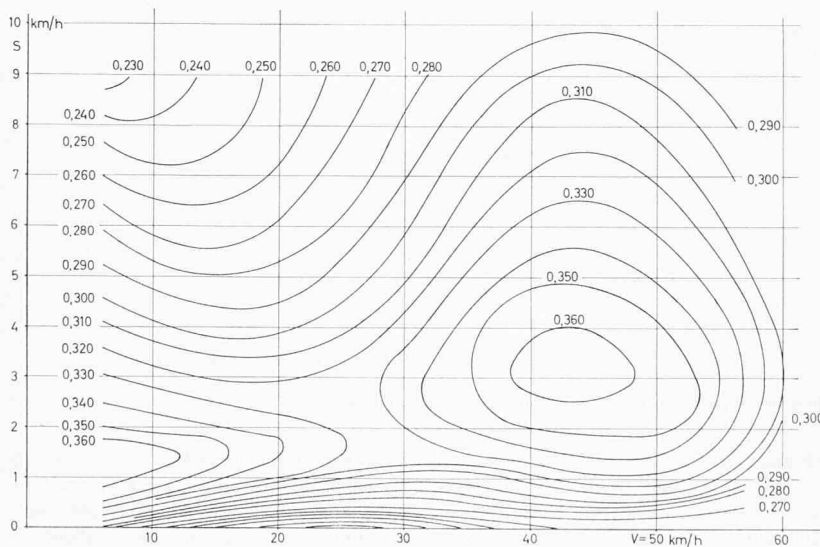


Bild 30. Wie Bild 29, Werte zwischen  $V = 36$  und  $41$  km/h



Aus Bild 21 erkennt man z. B., dass bei der Ausnutzung eines Reibungskoeffizienten von 0,46 die Schleuderschwierlichkeit beim Anfahren im Gleichrichterbetrieb 72%, bei Wechselstrombetrieb mit Parallelschaltpuffer 81,5% und bei Wechselstrombetrieb ohne Parallelschaltpuffer 95,7% vorhanden ist. Führt man jedoch nur mit einer Zugkraft entsprechend einem Reibungskoeffizienten von 0,37, so war bei Gleichrichterbetrieb nur in 2,4 Fällen von 100 mit Schleudern zu rechnen und bei Wechselstrombetrieb mit Parallelschaltpuffer in 4,4 Fällen von 100 Schleudern eingetreten. Stellt man dieselben Vergleiche in Bild 22 bei einer Fahrgeschwindigkeit von 30 km/h an, so erkennt man eine leichte Überlegenheit des Wechselstrombetriebs mit Parallelschaltpuffer gegenüber dem Gleichstrombetrieb. Die Differenzen sind noch kleiner geworden. In Bild 23 sind die Verhältnisse bei feuchtem Schienenzustand bei Fahrgeschwindigkeit 0 dargestellt; man erkennt wiederum eine praktische Gleichwertigkeit von Wechsel- und Wellenstrombetrieb bei Reibungskoeffizienten von 0,37, wogegen bei höheren Reibungskoeffizienten eine leichte Überlegenheit des Gleichstrombetriebs vorhanden ist. Bei feuchten Schienen und 30 km/h Fahrgeschwindigkeit (Bild 24) liegen die Werte für Gleichrichterbetrieb zwischen denjenigen von Wechselstrombetrieb ohne Parallelschaltpuffer und Wechselstrombetrieb mit Parallelschaltpuffer. Wie schon erwähnt, erscheinen hier die Werte des Wechselstrombetriebs mit Parallelschaltpuffer niedriger und wahrscheinlicher für das Schleudern als diejenigen von Wechselstrombetrieb ohne Parallelschaltpuffer. Darauf wird bei der Besprechung der Schlupfmessungen näher eingegangen.

Überlegenheit des Gleichstrombetriebs vorhanden ist. Bei feuchten Schienen und 30 km/h Fahrgeschwindigkeit (Bild 24) liegen die Werte für Gleichrichterbetrieb zwischen denjenigen von Wechselstrombetrieb ohne Parallelschaltpuffer und Wechselstrombetrieb mit Parallelschaltpuffer. Wie schon erwähnt, erscheinen hier die Werte des Wechselstrombetriebs mit Parallelschaltpuffer niedriger und wahrscheinlicher für das Schleudern als diejenigen von Wechselstrombetrieb ohne Parallelschaltpuffer. Darauf wird bei der Besprechung der Schlupfmessungen näher eingegangen.

#### f) Adhäsion und Schlupf

Aus früheren Veröffentlichungen, z. B. C. Th. Müller [9], ist bekannt, dass die elastisch verformte Berührungsoberfläche zwischen antriebenem Rad und der Schiene in eine Haft- und eine Gleitzone unterteilt werden kann. Der in Fahrtrichtung vordere Teil der Berüh-

Bild 28 (oben). Niveaulinien der  $\mu$ -Werte in Funktion von Makroschlupf  $s$  (in km/h) und Fahrgeschwindigkeit  $V$  bei Wechselstrombetrieb und trockenem Schienenzustand

Bild 31. Niveaulinien der  $\mu$ -Werte in Funktion von Makroschlupf  $s$  (in km/h) und Fahrgeschwindigkeit  $V$  bei Gleichrichterbetrieb und trockenem Schienenzustand

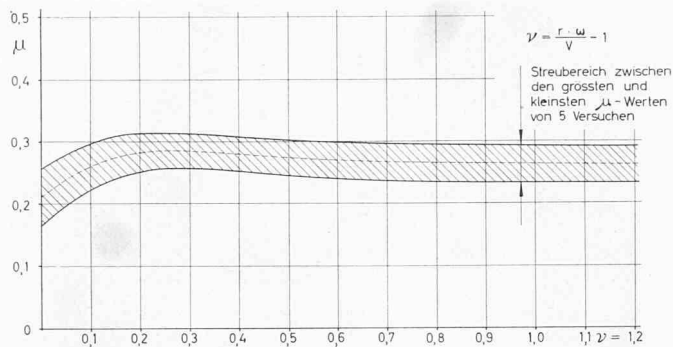


Bild 32. Adhäsion und Makroschlupf bei Wechselstrombetrieb und feuchtem Schienenzustand. Gemessene Werte zwischen  $V = 5$  und  $9$  km/h

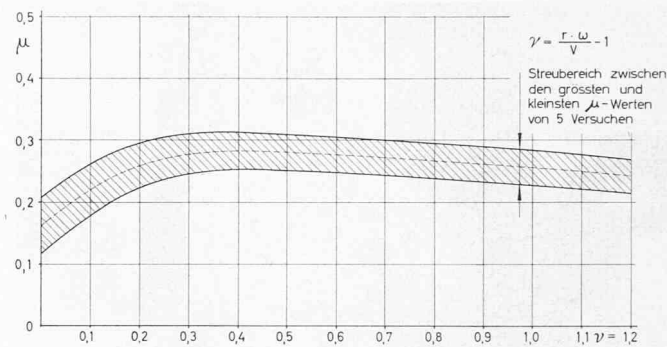


Bild 35. Adhäsion und Makroschlupf bei Gleichrichterbetrieb und feuchtem Schienenzustand. Gemessene Werte zwischen  $V = 1$  und  $10$  km/h

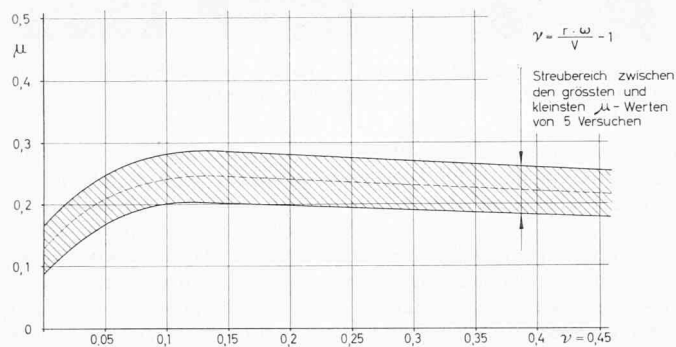


Bild 33. Wie Bild 32, Werte zwischen  $V = 26,5$  und  $40$  km/h

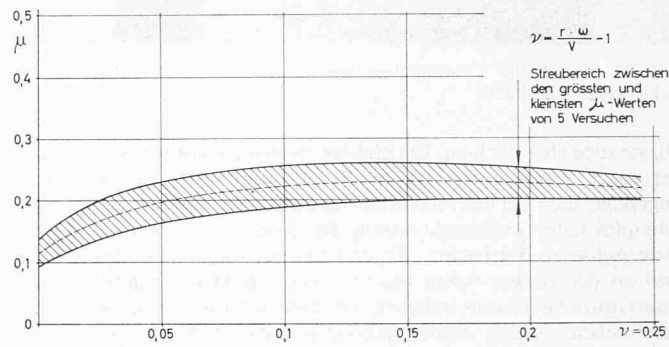


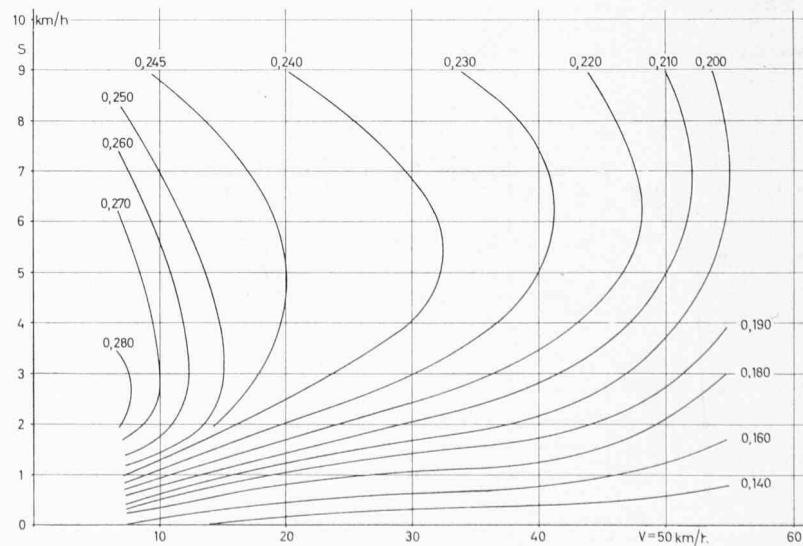
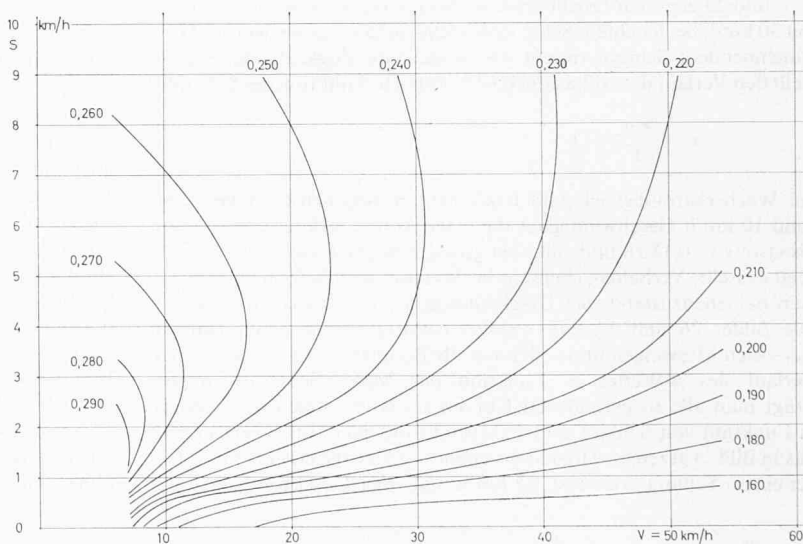
Bild 36. Wie Bild 35, Werte zwischen  $V = 37,5$  und  $47$  km/h

rungsfläche bildet die Haft-, der hintere Teil die Gleitzone. Es muss sich demzufolge unterhalb der Berührungsflächen ein Weg- und Spannungsausgleich einstellen, der sich in einem sehr kleinen translatorischen Wegverlust des Rades gegenüber dem in Rotation zurückgelegten Weg äussert. Mit zunehmendem Antriebsmoment verkleinert sich die Haft- gegenüber der Gleitzone und bei einem bestimmten Antriebsmoment besteht nur noch die Gleitzone. Versuche haben gezeigt, dass der Adhäsionskoeffizient während dieses «Mikroschlupfs» (der Schlupf ändert sich in der Grössenordnung von einigen ‰) stetig ansteigt. Bei Schlupf null kann keine Zugkraft übertragen werden. Die «Mikroschlupfkurve» manifestiert sich also in einer von Null stetig ansteigenden Linie, die beim Verschwinden der Haftzone einstweilen einen Grenzwert erreicht. Metzkwow [3] hatte jedoch, wie erwähnt, bei Bremsversuchen ein weiteres Ansteigen der Bremskraft auch im Gebiet grösser werdenden Schlupfes («Makroschlupf»), d. h. nach dem Verschwinden der Haftzone, beobachtet. Die Untersuchungen der SBB haben sich hauptsächlich auf diese Grössenordnung des Schlupfes bezogen.

Es ist dargelegt worden, wie man sich das Adhäsionsverhalten eines Triebfahrzeugs in Abhängigkeit des Schlupfes gemäss den von Metzkwow angestellten Bremsversuchen vorzustellen hat, sofern diese Vorgänge auch für den Fahrbetrieb allgemein Gültigkeit haben sollten. Beim Betrieb der Lokomotiven Ae6/6 am Gotthard wurde oftmals beobachtet, dass bei grossen Zugkräften ein Pfeifen am Berührungspunkt der Räder mit den Schienen auftrat, das offenbar einem gewissen etwas grösser als üblichen Schlupf entspringt. Trotzdem nahm dabei die Zugkraft entsprechend den beobachteten Fahrmotorströmen nicht

Bild 34 (oben). Niveaulinien der  $\mu$ -Werte in Funktion von Makroschlupf  $S$  (in km/h) und Fahrgeschwindigkeit  $V$  für Wechselstrombetrieb und feuchten Schienenzustand

Bild 37 (rechts). Niveaulinien der  $\mu$ -Werte in Funktion von Makroschlupf  $S$  (in km/h) und Fahrgeschwindigkeit  $V$  bei Gleichrichterbetrieb und feuchtem Schienenzustand



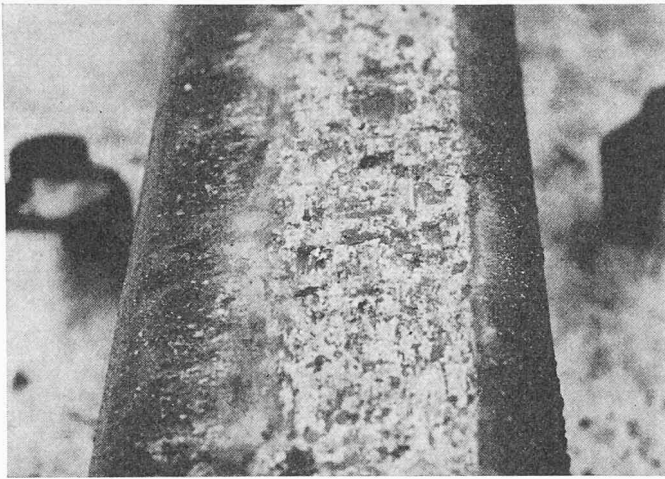


Bild 38. Durch die Uebertragung von zu grossen Zugkräften zerstörte Schienenkopfoberfläche



Bild 39. Wie Bild 38. Man erkennt im weitem drei Schleuderspuren, wie sie bei totalem Durchdrehen der Triebäder entstehen

ab, sie stieg eher noch an. Ein gleiches Verhalten wurde auch während der ersten Probefahrten mit der  $Re^{4/4II}$  beobachtet, und so war es angezeigt, dass bei den Adhäsionsmessungen der Einfluss des Makroschlupfes näher untersucht wurde. Bei diesen Versuchen lief nur die erste Achse als Triebachse; die drei übrigen waren nicht angetrieben und an der vierten Achse brachte man den Messwertgeber für die translatorische Geschwindigkeit an. Der Schlupf wurde, wie früher beschrieben, mittels zweier gegeneinandergeschalteter Generatoren zwischen der angetriebenen Achse 1 und der leer mitlaufenden Achse 4 gemessen.

Bild 25 zeigt ein Oszillogramm, das im Wechselstrombetrieb und mit 30 km/h bei feuchtem Schienenzustand aufgenommen wurde. Trotz zunehmendem Schlupf nimmt die erreichbare Zugkraft zu. Bild 26 stellt den Verlauf des Adhäsionskoeffizienten in Funktion des Schlupfes

$$\nu = \frac{r \omega}{V} - 1$$

bei Wechselstrombetrieb und trockenem Schienenzustand bei 5 bis rund 10 km/h Geschwindigkeit dar. Der Adhäsionskoeffizient nimmt bis etwa  $\nu = 0,15$  zu und sinkt bei grossem Schlupf wieder ab. Bild 27 zeigt dasselbe Verhalten, ebenfalls bei Wechselstrombetrieb und trockenem Schienenzustand, bei Geschwindigkeit von 35 bis rd. 42 km/h. Die Bilder 26 und 27 sind wahllos herausgezogene Schlupfkurven aus vielen Messungen und sollen nur als Beispiele den grundsätzlichen Verlauf des  $\mu$ -Wertes in Funktion des Makro-Schlupfes zeigen. Trägt man alle so gefundenen Kurven als Niveaulinien der  $\mu$ -Werte in Funktion von Schlupf und Fahrgeschwindigkeit auf, so erhält man das in Bild 28 gezeigte «Höhenkurvenbild». Zunächst erkennt man, dass bei einem Schlupf von etwa 1,5 km/h und einer Geschwindigkeit von

rd. 10 km/h ein deutlicher «Berg» vorhanden ist. Bei grösser werden dem Makro-Schlupf und gleicher Fahrgeschwindigkeit nimmt der Adhäsionskoeffizient gleichmässig ab, entsprechend den Bildern 26 und 27. Vergrössert man bei gleichbleibendem Schlupf von etwa 1,5 km/h die Fahrgeschwindigkeit, so sinkt der Adhäsionskoeffizient, um nachher bei höherer Geschwindigkeit wieder anzusteigen. Es entsteht bei dieser Geschwindigkeit ein zweiter «Berg» bei 3 bis 4 km/h Schlupf. Es ist ersichtlich, dass bei höheren Geschwindigkeiten etwas grössere Schlupfe günstige Adhäsionskoeffizienten ergeben.

Bei Gleichrichterbetrieb (Bilder 29, 30, 31) und ebenfalls trockenen Schienen ist ein grundsätzlich gleiches Verhalten festgestellt worden. Die verschiedenen Maxima, d. h. die «Berge», weichen nur unwesentlich in ihrer «geographischen» Lage ab.

Bei feuchten Schienen (Bilder 32, 33, 34 für Wechselstrombetrieb und Bilder 35, 36, 37 bei Gleichrichterbetrieb) erkennen wir zunächst das dem Schienenzustand entsprechende Absinken des  $\mu$ -Wertes, aber auch eine Verflachung der Schlupfkurve. Dies kommt deutlich beim Vergleich der Bilder 34 und 37 zum Ausdruck, so dass man übereinstimmend bei beiden Betriebsarten qualitativ gleich liegende Niveaulinien der  $\mu$ -Werte vorfindet. Auch quantitativ besteht gute Übereinstimmung. Man erkennt im weitem, wie in beiden Betriebsarten bei feuchtem Schienenzustand ein grösserer Schlupf als bei trockenem notwendig ist, um höhere Adhäsionskoeffizienten zu erreichen. Es ist durchaus möglich, dass durch das grössere Gleiten eine zusätzliche Reinigung von Rad und Schiene erfolgt, was zu einer Erhöhung des Adhäsionskoeffizienten bei grösserer Schlupfgeschwindigkeit führt.

Dies mag auch eine Erklärung für die kleinere Schleuderwahrscheinlichkeit bei feuchtem Schienenzustand im Wechselstrombetrieb ohne Parallelhüpfer gegenüber der Schleuderwahrscheinlichkeit

bei Wechselstrombetrieb mit Parallelhüpfer sein (vgl. Bild 24). Die durch die Wirkung der Parallelschalthüpfer bedingte Verkleinerung des Schlupfes müsste sich also bei feuchtem Wetter eher leicht nachteilig auswirken, da bei diesem Schienenzustand – wie erwähnt – grösserer Schlupf für gute Adhäsionskoeffizienten notwendig ist. Trotz dieser Feststellung werden die Parallelschalthüpfer auf sämtlichen modernen Triebfahrzeugen der SBB eingebaut, da es sich gezeigt hat, dass ein massives Durchdrehen einer einzelnen Achse (Bild 11) praktisch nicht mehr möglich ist. Alles in allem gesehen, hat die Parallelschaltung der Feldwicklungen eine günstige Auswirkung.

Bild 40. Gemessene Anfahrt mit 653 t Anhängelast mit der Versuchslokomotive  $Re^{4/4II}$  11106 vor dem Wattingertunnel auf 26‰ Steigung bei Wechselstrombetrieb (Gotthard-Strecke), gute Adhäsionsverhältnisse

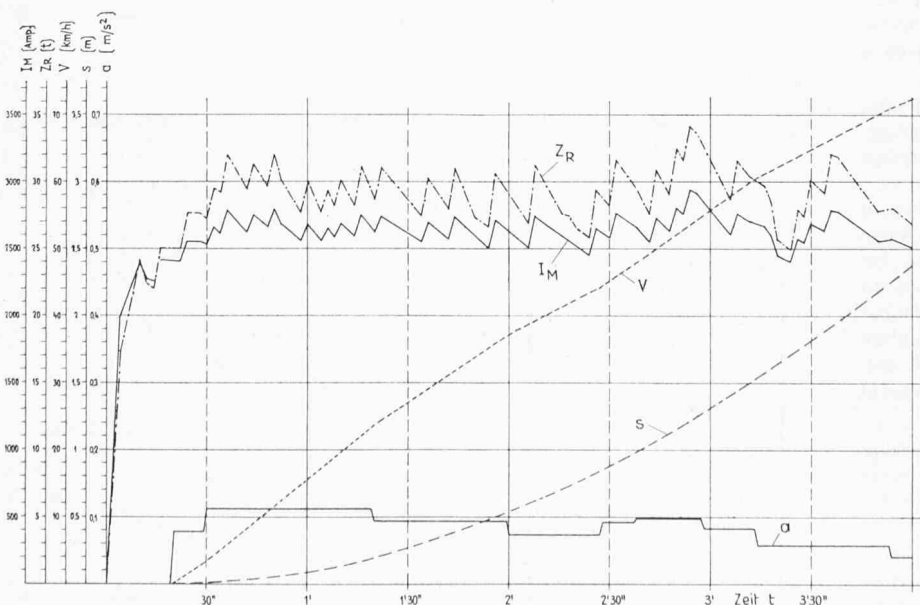




Bild 41 (rechts). Gemessene Anfahrt mit 354 t Anhängelast mit der Versuchslokomotive Re 4/4 II 11106 auf 50‰ Steigung. SOB-Strecke Pfäffikon—Samstagen, Wechselstrombetrieb, mittelmässige Adhäsionsverhältnisse

Bild 42 (Mitte). Gemessene Anfahrt mit 354 t Anhängelast mit der Versuchslokomotive Re 4/4 II 11106 auf 50‰ Steigung. SOB-Strecke Pfäffikon—Samstagen, Gleichrichterbetrieb, mittelmässige Adhäsionsverhältnisse

Bild 43 (unten). Gemessene Anfahrt mit 381 t Anhängelast mit der Versuchslokomotive Re 4/4 II 11106 auf 50‰ Steigung. SOB-Strecke Pfäffikon—Samstagen, Wechselstrombetrieb, etwas bessere Adhäsionsverhältnisse

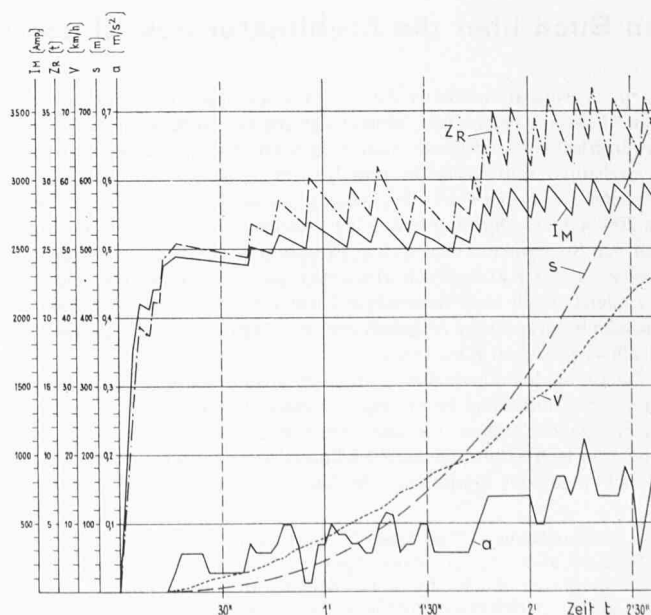
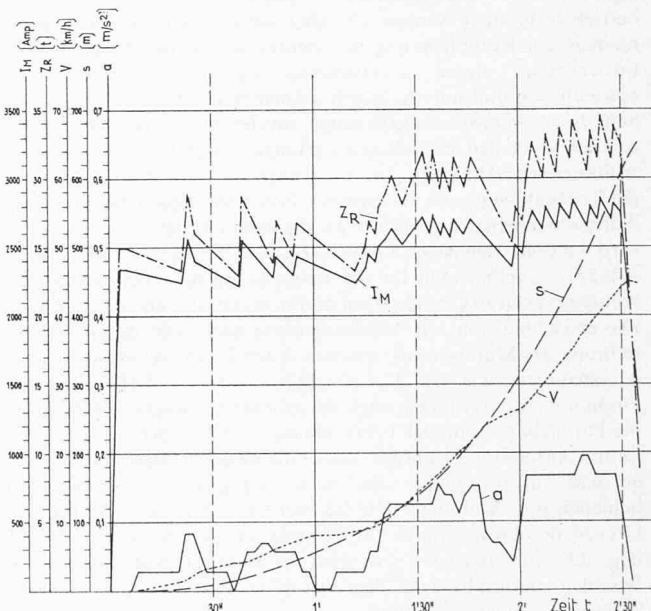
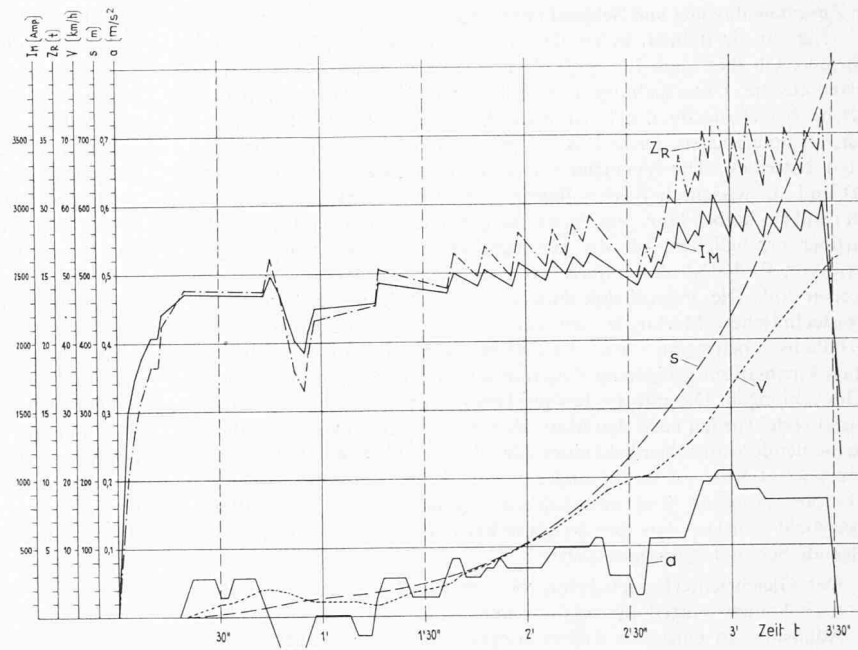
#### g) Adhäsionskoeffizient und Schienenverschleiss

Während der Messungen wurde der Schienenzustand auf der Versuchsstrecke laufend beobachtet. Bald nach den ersten Versuchen mit hohen Adhäsionskoeffizienten in der Grössenordnung von  $\mu \geq 0,35$  zeigten sich sowohl bei Wechselstrom- und Wellenstrombetrieb Beschädigungen an der Schienenoberfläche. Diese wurden festgestellt, gleichgültig, ob sich ein messbarer Schlupf eingestellt hatte oder nicht. Die Erklärung dürfte in folgendem liegen.

Die vor der Berührungsfläche liegenden Elemente der Schiene sind auf Zug, die hinter der Berührungsfläche liegenden auf Druck beansprucht. Innerhalb der Berührungsfläche geht also beim angetriebenen Rad und der darunter liegenden Schienenfläche (Hertzsche Fläche) ein Spannungswechsel von Zug auf Druck vor sich, der sich mit höher werdendem Antriebsmoment in seiner Wirkung steigert. Dieser Spannungswechsel in der Schiene dürfte sich bei zu grosser übertragener Zugkraft derart vollziehen, dass die Elastizitätsgrenze überschritten wird und sich bleibende Deformationen, d. h. Materialabtragungen, einstellen können. Bild 38 zeigt eine Nahaufnahme der in solcher Art beschädigten Schienenoberfläche. Auf Bild 39 sind Stellen zu sehen, an denen trotz Zunahme des Schlupfes keine Zunahme der übertragenen Zugkraft mehr erfolgte. Man erkennt am Bild der Lauffläche, dass bereits vor dem eigentlichen Schleudern Zerstörungen an der Oberflächenstruktur eingetreten sind. Der Zugkraftübertragung zwischen Rad und Schiene sind also technische und wirtschaftliche Grenzen gesetzt. Besonders auf Strecken mit häufigen schweren Anfahrten und mit starken Steigungen gilt es dies zu beachten.

#### 4. Betriebsmässige Anfahrversuche

Um die durch die beschriebenen Messungen erworbenen Erkenntnisse auch bei betriebsmässigen Anfahrten zu überprüfen, sind mit der Versuchlokomotive Re 4/4 II 11106 zahlreiche Versuchsfahrten am Gotthard auf 26‰ Steigung und auf der Schweizerischen Südbahn auf 50‰ Steigung durchgeführt worden. Bild 40 zeigt das Diagramm einer Anfahrt mit 653 t Wagenlast im Wechselstrombetrieb am Gotthard. Nach rund 4 Minuten erreichte der Versuchszug 75 km/h ohne jegliches Schleudern der Lokomotive. Die Adhäsionsverhältnisse waren gut bis mittelmässig. Bild 41 bezieht sich auf eine Anfahrt auf der Strecke Pfäffikon—Samstagen der Schweizerischen Südostbahn mit einer Wagenlast von 354 t, ebenfalls im Wechselstrombetrieb. Nach rund 3½ Minuten ist die dort zulässige Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h erreicht worden. Die Adhäsionsverhältnisse waren mittelmässig bis schlecht (Fettspuren und Graphitstaub). Auf Bild 42 ist das Anfahrtdiagramm mit derselben Last auf der nämlichen Strecke bei Wellenstrombetrieb zu sehen. In 2½ Minuten erreichte der Zug 45 km/h; die Anfahrt vollzog sich hier etwas schneller. Bild 43 stellt das Anfahrtdiagramm mit einer Wagenlast von 381 t bei Wechselstrombetrieb dar, ebenfalls auf derselben Strecke. Die Anfahrt vollzog sich reibungslos und ohne jegliches Schleudern. Die drei Versuchsfahrten wurden am gleichen Tag durchgeführt; bei der letzten waren die Adhäsionsverhältnisse etwas besser.





## 5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Für 50 Hz-Bahnen bietet die Gleichrichtung des Motorstroms Vorteile. Ob dies auch für 16 $\frac{2}{3}$  Hz-Bahnen der Fall sei, war durch systematische Untersuchungen mittels der Re $\frac{4}{4}$ <sup>II</sup> 11106 der SBB, welche behelfsmässig mit Siliziumgleichrichtern ausgerüstet worden war, zu untersuchen. Diese Lokomotive liess sich mit beiden Stromarten betreiben. Die Versuche konnten in technisch einwandfreier Art und auf wissenschaftlicher Basis durchgeführt werden. Sie dauerten rund ein halbes Jahr. Die Versuchsergebnisse sollten den Entscheid darüber ermöglichen, ob die zur Beschaffung vorgesehene grosse Serie von Re $\frac{4}{4}$ <sup>II</sup>-Lokomotiven mit oder ohne Gleichrichter gebaut werden soll. Die Versuchslokomotive enthielt alle neuen konstruktionstechnischen Merkmale, die zur Verbesserung des Adhäsionsverhaltens beitragen, im besondern die Tiefzugvorrichtung, einen kinematisch geeigneten Federantrieb und Parallelverbinder der Feldwicklungen. Die mit der beschriebenen Messmethode ermittelten Einzelwerte wurden nach den Methoden der Statistik ausgewertet und die Schleuderwahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Parameter berechnet. Ferner ist im besondern auch der Einfluss des Makro-Schlupfes zwischen Rad und Schiene auf das Adhäsionsverhalten untersucht worden. Aus den so gefundenen Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen

- Der Gleichrichterbetrieb bringt bei 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Lokomotiven praktisch keinen Vorteil hinsichtlich einer besseren Ausnutzung der Adhäsion. In einzelnen Fällen konnte eine unbedeutende Überlegenheit bei Gleichrichterbetrieb gegenüber dem Direktmotorbetrieb festgestellt werden, die aber wegen ihrer Geringfügigkeit niemals die Komplizierung der elektrischen Ausrüstung und die unzweifelhaft damit verbundenen weiteren wirtschaftlichen, betrieblichen und unterhaltstechnischen Nachteile rechtfertigt.
- Sehr hohe Adhäsionskoeffizienten werden bei guten Schienenzuständen in beiden Betriebsarten erreicht. Auch bei ungünstigeren Adhäsionsverhältnissen, die schliesslich im betrieblichen Einsatz der Triebfahrzeuge das Kriterium sein müssen, liegen die erreichten Adhäsionskoeffizienten höher als die bisher erzielten Werte. Man wird daher bei den neuen Lokomotiven Re $\frac{4}{4}$ <sup>II</sup> höhere betriebliche Adhäsionskoeffizienten für die Bestimmung der höchstzulässigen Anhängelasten zu Grunde legen dürfen als bei älteren Lokomotiven.
- Die erreichten höheren Adhäsionswerte sind nicht durch Gleichrichtung des Motorstroms, sondern durch konstruktionstechnische Massnahmen, wie die Tiefanlenkung und die Wahl einer die Drehmomentpulsationen stark dämpfenden Antriebsbauart sowie die Parallelschaltung der Feldwicklungen entstanden.
- Durch Anwendung zu hoher Zugkräfte zwischen Rad und Schiene entsteht auf die Dauer ein unzulässig grosser Verschleiss an Schienen und Radreifen. Die Versuche ergaben, dass die höchste Grenze des anwendbaren Adhäsionskoeffizienten bei rund 0,35 liegt. Diesen Grenzwert wird man im praktischen Betrieb für die Beschleunigungsphase der Zugfahrt in der Berechnung der höchstzulässigen Zuglast einsetzen.

- Die Parallelschaltung der Motorfeldwicklungen erweist sich als nützlich. Sie ist leicht zu bewerkstelligen und einfach.
- Die Messungen haben ergeben, dass ein Makro-Schlupf zwischen Rad und Schiene sowohl bei trockenen wie bei feuchten Schienen das Adhäsionsverhalten verbessert. Das nützliche Ausmass konnte mit den Messungen bestimmt werden. Dieser Schlupf hat keine vermehrte Abnutzung oder sogar Beschädigung der Schienen und Radreifen zur Folge.
- Eine Schleuderschutteinrichtung (Schleuderbremse) geeigneter Bauart ist nützlich. Die Einrichtung soll erst bei drohendem Überschreiten des optimalen Schlupfes ansprechen. Die Schleuderbremse soll nur die schleudernde Achse bremsen.
- Gute 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Fahrmotoren erreichen bei den SBB einen Kollektorparkours von 2,4 Mio km, d. h. die Kollektoren selbst erfordern während dieser Laufleistung keine Unterhaltarbeiten und sind daher guten Gleichstrom-Traktionsmotoren ebenbürtig.
- Die weitere Entwicklung der steuerbaren Halbleiter und der programmgesteuerten Thyristoren könnte dazu führen, dass das Problem der Gleichrichtung später, wenn auch nicht aus Gründen der Adhäsion, sondern wegen einer u. U. möglichen Vereinfachung der Steuerapparatur erneut zu überprüfen sein wird. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass durch diese neue Steuerungstechnik keine schädigende Wirkung von Oberwellen auf das speisende Stromnetz und die Stromkreise der Fernmelde-, Sicherungs- und Signalanlagen sowie auf Radio und Fernsehen entstehen, im besondern bei konzentriertem Einsatz von Triebfahrzeugen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Wiechert, A.: Die 1' Bo 1' El-Lok der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft. «Elektrische Bahnen» 1927, Heft 3.
- [2] Müller, A. E.: Reibungsverhältnisse bei Gross-Elektrolokomotiven. ETZ 1928, Heft 1.
- [3] Metzkw: Untersuchung der Haftungsverhältnisse zwischen Rad und Schiene beim Bremsvorgang. «Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens», Juli 1934.
- [4] Curtius, E. W. und Kniffler, A.: Neue Erkenntnisse über die Haftung zwischen Triebtrad und Schiene. «Elektrische Bahnen» 1950, Heft 9.
- [5] Andrews, H. I.: Die Haftung zwischen Rad und Schiene bei elektrischen Lokomotiven. «Proceedings of Institution of Electrical Engineers» 1955.
- [6] Nouvion und Bernard: «Revue générale des Chemins de fer» 1961.
- [7] Jonson, St.: Das Haftwertproblem in der Zugförderung in statistischer Betrachtungsweise. «Glaser's Annalen», Mai 1961, Heft 5.
- [8] Borgeaud, G.: Weight transfer and mathematical analysis for bogie-locomotives (Paper presented at the Convention on adhesion at the Institution of Mechanical Engineers, London 1963).
- [9] Müller, C. Th.: Kraftwirkungen an einem zweiachsigen Triebgestell bei Antrieb der Radsätze durch Gelenkwellen. «Österreichische Ingenieurzeitschrift», Mai 1961.
- [10] Weber, H. H.: Zur direkten Messung der Kräfte zwischen Rad und Schiene. «Elektrische Bahnen», Heft 5, 1961.

## Ein Buch über die Architektur des Klassizismus in der Schweiz

DK 72.035.1

Hierzu Tafeln 40-43

Im Verlag Berichthaus Zürich ist Ende 1963 der erste Band<sup>1)</sup> einer Buchreihe erschienen, welche sich die Darstellung der gesamten schweizerischen Architektur zum Ziele setzt. Er gilt der Baukunst des Klassizismus. Sein Verfasser und Illustrator ist der Zürcher Kunsthistoriker Dr. Bruno Carl. Den Anfang des Werkes macht ein *Inventar* von 200 bedeutenden Baudenkmälern, welche ortsweise geordnet sind, nach den Stichworten Geschichte, Situation, Grundriss, Äusseres und Inneres. Dieser Katalog (mit Hinweisen auf das Literaturverzeichnis) ist zugleich auch eine imperative Liste erhaltungswürdiger Bauten. Es folgen biographische Angaben über dreissig bedeutende Architekten des schweizerischen Klassizismus.

Diese beiden Verzeichnisse ergeben zusammen mit den 150 kurz erläuterten Bildtafeln (nach hervorragenden Aufnahmen des Verfassers) die Grundlage für den interpretierenden Text. Dieser umschliesst in 10 Abschnitten das Zweckhafte der Architektur, individuelle Entwicklungen des Städtebaus, die Bauformen in ihren zeitlichen und

regionalen Bedingtheiten, sowie die Beziehungen zu den grossen europäischen Vorbildern der Zeit.

Inzwischen ist als zweiter Band der Reihe das Werk «Gitter» von Lea Carl bereits erschienen (SBZ 1965, H. 15, S. 245). In Vorbereitung sind zwei weitere Bände über «Brunnen» und «Portale».

Als die französische Revolution den Idealen der Aufklärung zum Durchbruch verhalf und das Kultur- und Geistesleben des Ancien Régime dem neuen, von Freiheit, Wohlfahrt und Humanität genährten Fortschrittsglauben verfiel, bildete der Klassizismus (etwa 1770 bis 1860) den Stil der Zeit. Er war die direkte Gegenbewegung zum feudalen Rokoko. Doch haben namentlich in Frankreich und England klassizistische Architekturströmungen seit der Hochrenaissance weiterbestanden und die Zeit des Barocks überdauert, genährt vor allem durch die Bauten und die architektur-theoretischen Schriften von Andrea Palladio («Quattro libri dell' Architettura», Venedig 1570). Andererseits liefen im 19. Jahrhundert mit dem Klassizismus Stilformen der Romantik einher, so wie etwa C. F. Schinkel den Berliner Klassizismus verkörperte und gleichzeitig als Meister der neogotisch-romantischen Richtung erschien. Seinerseits nahm der Klassizismus im Stil Louis XVI. höfische, im Directoire revolutionäre, im Empire napoleonische, im Biedermeier bürgerliche, im Spätklassizismus wieder

<sup>1)</sup> **Klassizismus. 1770—1860.** Von B. Carl. 308 S. mit 50 Grundriss-Skizzen und 150 grossformatigen Tafeln auf Kunstdruckpapier. Erster Band der Buchreihe «Die Architektur der Schweiz». Zürich 1963, Verlag Berichthaus Zürich. Preis Leinen geb. 58 Fr.