

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 42 (1951)

**Heft:** 14

**Artikel:** Die vollelastische vielfach-windschiefe Fahrleitung für Bahnen

**Autor:** Wittgenstein, M.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1061005>

#### 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:** 05.02.2026

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

# BULLETIN

## DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEM VEREINS

### Die vollelastische vielfach-windschiefe Fahrleitung für Bahnen

Von M. Wittgenstein, Zürich

621.332.31

*Nach der Darlegung der für die funkenfreie Stromabnahme bei hohen Fahrgeschwindigkeiten anzustrebenden Verhältnisse werden die Vorgänge beschrieben, die sich beim Bestreichen von senkrechti-vielfach und von vielfach-windschief ausgehängten Fahrleitungen durch den Pantographen abspielen.*

*Exposé des conditions à réaliser pour obtenir une prise de courant sans production d'étincelles aux grandes vitesses de marche. Description des processus qui ont lieu lorsque le pantographe glisse le long de fils de contact à caténaire à pendules verticaux et à pendules inclinés.*

#### 1. Allgemeines

Der elektrische Zugbetrieb — abgesehen vom dieselelektrischen Fahrzeug — bedingt, dass der Lokomotive die elektrische Energie in geeigneter Weise zugeführt wird.

Von mehreren Möglichkeiten (z. B. Kontaktsschiene) hat sich als beste und wirtschaftlichste die elektrische Fahrleitung erwiesen. Von dem Fahrdräht, welcher über der Geleiseachse an Stützpunkten isoliert aufgehängt wird, nimmt der Stromabnehmer der Lokomotive die elektrische Energie ab und überträgt diese auf die Motoren. Die elektrische Fahrleitung ist ein in der Technik meistens stiefmütterlich behandeltes Gebiet, welches beim Bahnbetrieb oft als nebensächliches, notwendiges Übel am Rande erwähnt wird. Die technische Bedeutung, die der elektrischen Fahrleitung zukommt, kann man vielleicht am besten mit folgendem erklären.

Nach dem heutigen Stande der Technik ist es ohne besondere Schwierigkeiten möglich, elektrische Lokomotiven und Geleiseanlagen für Geschwindigkeiten von 200 km/h und gegebenenfalls auch mehr zu bauen, wenn lange, gerade Strecken wie im benachbarten Ausland vorhanden sind. Beim Bau einer für diese Geschwindigkeiten geeigneten Fahrleitung würde man jedoch mit den bisherigen Systemen auf gewaltige Schwierigkeiten stossen, hat es sich doch gezeigt, dass Fahrleitungen der heute grösstenteils verwendeten senkrechten Vielfach-Bauweise schon bei etwa 130 km/h nicht mehr ganz befriedigende Kontaktenschaften und Abnützungen bei den Spurhaltern aufweisen. Jede Funkenbildung zwischen Stromabnehmer und Fahrdräht bedeutet aber Verluste und Schädigung der Bahnmotoren und der Fahrleitung selbst.

Für die unterbruchlose, funkenfreie Stromabnahme als Hauptforderung eines guten Kontaktes zwischen Stromabnehmer und Fahrdräht sind als zwei der wesentlichen Faktoren gleichbleibende Elastizitätsbedingungen des Fahrdrähtes in vertikaler Richtung entlang der ganzen Strecke und die relative Lage zum Geleise zu nennen. Eine weitere Forderung ist, dass die Fahrleitung billig, d. h. wirtschaftlich im Bau, Betrieb und Unterhalt sein muss.

Diese Forderungen können heute weitgehend durch die sogenannte vielfach-windschiefe, voll-elastische Fahrleitung erfüllt werden, welche als Ergebnis langjähriger theoretischer und praktischer Forschungen und Versuche von der A.-G. Kummer & Matter, Zürich, entwickelt und von ihr seit mehreren Jahren mit zufriedenstellenden Ergebnissen gebaut worden ist.

Im folgenden sollen allgemein verständlich die wichtigsten technischen Gesichtspunkte erklärt und beschrieben werden, die zu der heute letzten Entwicklung im Fahrleitungsbau, nämlich der vielfach-windschiefen, vollelastischen Fahrleitung geführt haben.

Wie jeder Reisende weiß, ist der Eisenbahnzug einschliesslich der Lokomotive Erschütterungen bzw. Schwingungen unterworfen, und zwar um so mehr, je grösser seine Geschwindigkeit ist. Diese Schwingungen röhren teils von dem notwendigen Spiel zwischen Spurkränzen und Schienen-Innenkanten, teils von den Schienenstössen und teils von den fast unsichtbaren Unebenheiten und Riffeln der Schienenoberfläche her.

Der Stromabnehmer, welcher heute fast allgemein als Pantograph ausgebildet ist, müsste, um mit dem Kupferfahrdräht in stetem Kontakt zu bleiben, alle diese Stösse und Schwingungen sowie die aus dem Durchhang des Fahrdrähtes entstehenden Unterschiede in seiner Höhenlage ausgleichen. Ein derartiger Pantograph, dessen Schleifstück mit 4,5...7 kg an die Fahrleitung gepresst wird, ist im Verhältnis zur Aufgabe, die er bewältigen sollte, ein ziemlich träges Ding. Kann der Pantograph nicht alle Schwingungen ausgleichen, so muss die Fahrleitung den Rest der Aufgabe selbst übernehmen, d. h. die Fahrleitung muss elastisch, also federnd ausgebildet werden, um eine funkenfreie Stromabnahme zu gewährleisten.

Wird gemäss Fig. 1 ein Draht (oder Seil) mit einer horizontalen Zugspannung  $S$  an 2 Punkten  $A$  und  $B$  aufgehängt, so bildet er eine parabelähnliche Kurve. Der grösste Durchhang befindet sich, wenn  $A$  und  $B$  gleich hoch sind, in der Mitte dieser beiden Punkte. Für den Ruhezustand gilt, dass die

horizontale Zugspannung  $S$  in jedem Punkt des Seils die gleiche ist. Entsprechend der Krümmung der Seilkurve ist daher die auf jedem Seilstück lastende senkrechte Gewichtskomponente am Stützpunkt am grössten und in der Mitte der Spannweite gleich

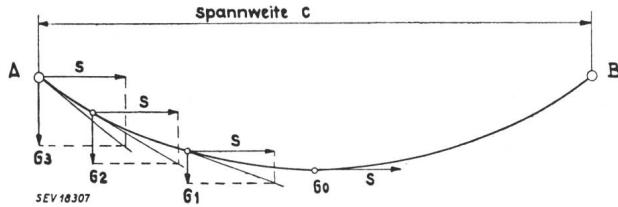


Fig. 1  
Fahrdräht-Seilkurve in Ruhelage

Null. Es genügt schon, dass man diese einfache Bedingung der Ruhelage betrachtet, um folgendes zu erkennen: Schleift ein Stromabnehmer entlang eines so aufgehängten Drahtes, so drückt er den Draht aus seiner Ruhelage in die sogenannte Arbeitslage. Entsprechend den verschiedenen senkrechten Gewichtskomponenten der einzelnen Drahtstücke  $G_1 \dots G_3$  der Fig. 1 kann der Stromabnehmer

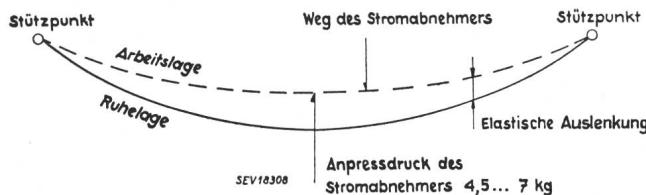


Fig. 2  
Fahrdräht-Seilkurve beim Bestreichen durch den Stromabnehmer

durch seinen konstanten Anpressdruck in der Mitte der Spannweite den Draht höher anheben als am Stützpunkt (Fig. 2).

## 2. Die senkrechte Vielfach-Fahrleitung und ähnliche Systeme

Die Anschaffungskosten einer Fahrleitung sind hauptsächlich abhängig von der Zahl der verwendeten Stützpunkte bzw. Masten, und man ist deshalb bestrebt, die Spannweiten zwischen diesen Stützpunkten so gross wie möglich zu machen. Es werden daher so gut wie alle Bahn-Fahrleitungen als Vielfach-Fahrleitungen ausgeführt. Gemäss Fig. 3 wird bei einer senkrechten Vielfach-Fahrleitung der Fahrdräht mittels mehrerer Hängedrähte am Tragseil aufgehängt. Um eine gleichmässige Abnutzung des Pantograph-Schleifstückes zu erhalten, wird der Fahrdräht im Zickzack über der Gleisebene geführt und an den Stützpunkten durch Spurhalter seitlich fixiert.

Der am Tragseil senkrecht aufgehängte Fahrdräht weist ganz ähnliche Elastizitätsbedingungen auf wie ein frei aufgehängter Fahrdräht gemäss Fig. 2. Diese Tatsache und vor allem auch das Gewicht bzw. die Massenträgheit der notwendigen Spurhalter bewirken, dass der Pantograph gemäss Fig. 4 in der Mitte der Spannweite den Fahrdräht höher anheben kann als am Stützpunkt und somit die senkrechte Vielfach-Fahrleitung ungleich elastisch ist.

Gleitet der Pantograph entlang dem Fahrdräht einer Vielfach-Fahrleitung, so erzeugt sein Anpressdruck eine Fahrdrähtwelle, welche mit dem Pantographen wandert. Soll die Stromabnahme funkenfrei und mit gleichbleibendem Kontaktdruck

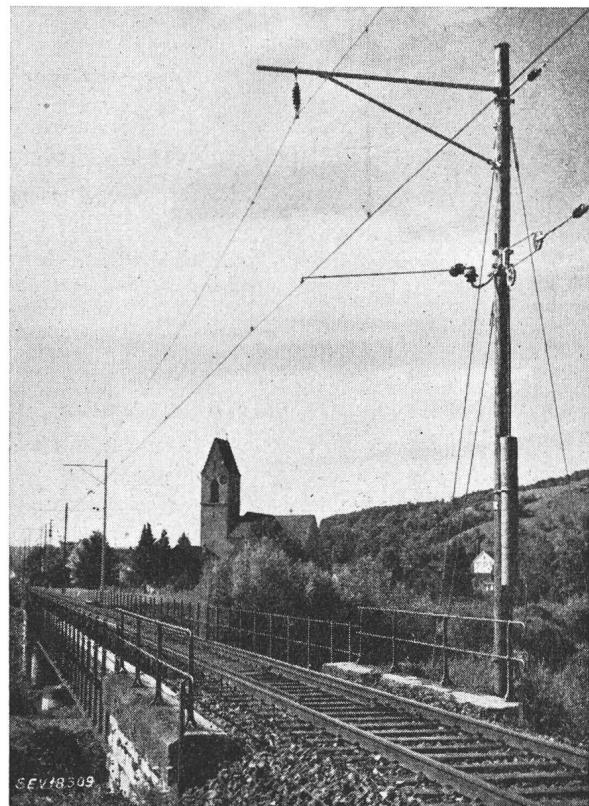


Fig. 3  
15-kV-Fahrleitung vielfach-senkrechter Bauart

vor sich gehen, so muss diese Wanderwelle in jedem Punkt die gleiche Amplitude haben, darf also durch ungleiche Elastizität des Fahrdrähtes und durch sogenannte harte Punkte in der Fahrleitung, wie Spurhalter, in ihrem Lauf nicht gestört oder unterbrochen werden. Es musste also eine Fahrleitungs-

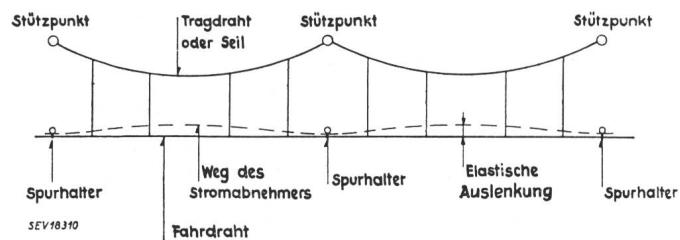


Fig. 4  
Senkrechte Vielfach-Fahrleitung  
Vertikalschnitt

system gefunden werden, bei welchem in jedem Punkt des Fahrdrähtes die gleichen Elastizitätsbedingungen gelten, also auch in den Punkten, wo der Fahrdräht in der Spur gehalten wird. Die Spurhalter sind eine der Ursachen der Unstetigkeit und man trachtete deshalb danach, sie wegfallen zu lassen.

Bahnfahrleitungen mit elastischen Eigenschaften wurden zwar schon in den dreissiger Jahren in Deutschland gebaut, jedoch war deren Aufbau durch die Verwendung eines zusätzlich erforderlichen Hilfstrageseils an den Stütz-

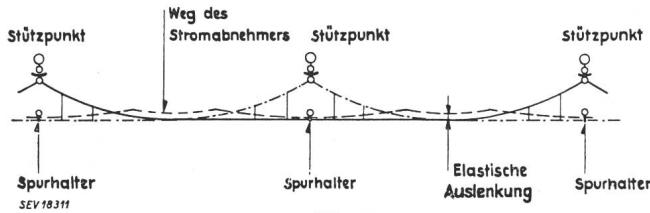


Fig. 5  
Senkrechte Wechsel-Fahrleitung  
Vertikalschnitt

punkten sehr kompliziert und die Montage daher äusserst schwierig. Versuche in dieser Richtung wurden auch mit der gekreuzten sog. «Wechsel-Fahrleitung» gemäss Fig. 5 gemacht, wo in jeder Spannweite Fahr- und Tragdraht in ihrer Funktion abwechseln. Dieses System bedingt aber normalerweise fest abgefangenen Fahr- und Tragdraht, da eine Gewichtsnachspannung hier nur mit hohen Kosten (schwenkbare Ausleger) gebaut werden könnte. Weil auch bei dieser Bauart Spurhalter notwendig sind und der Pantograph am Stützpunkt nur einen Fahrdrat, am Kreuzungspunkt hingegen 2 Fahrdrähte anheben muss, ist der Weg des Pantographen gemäss Fig. 5 durchaus keine Gerade, wie dies wünschenswert wäre. Demzufolge zeigt sich bei höheren Geschwindigkeiten starke Funkenbildung. Durch die beschriebenen harten Punkte in der Fahrleitung sind außerdem schon nach einigen Jahren merkliche lokale Abnutzungen am Fahrdrat festzustellen. Eine Lösung des Problems ergab die vielfach-windschiefe Fahrleitung, kurz VWS-Fahrleitung genannt.

### 3. Die vielfach-windschiefe (VWS-) Fahrleitung

#### a) Gerade Strecken

Der Aufbau der VWS-Fahrleitung ist einfach. Das fest verlegte Tragseil wird mit starkem Zickzack über der Geleiseachse geführt. Der Fahrdrat, welcher durch Gewichte eine konstante Zugspannung erhält, wird nun an 4 oder 6 Hängedrähten je Spannweite am Tragseil befestigt. Gewicht und Zugspannung des Fahrdrätes ergeben eine Schieflage der Hängedrähte und einen schlängelnden Verlauf des Fahrdrätes in der Horizontalalebene (Fig. 6). Hierbei ergibt sich, dass die Hängedrähte in der Nähe der Stützpunkte länger und flacher geneigt sind als die Hängedrähte, welche gegen die Mitte der Spannweite liegen.

Es greifen nun an jedem Hängedraht 2 Kräfte an, nämlich das senkrechte Fahrdrätagewicht  $G$  und der horizontale Winkelzug des Fahrdrätes  $W_z$ , hervorgerufen durch die Knickwinkel des Fahrdrätes an jedem Hänger. Diese Knickwinkel sind in Fig. 6 mit  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  und  $\delta$  bezeichnet. Wird das Fahrdrätastück, welches an solch einem schrägen Hängedraht aufgehängt ist, durch den Anpress-

druck des Pantographen nach oben gedrückt, dann gilt — in gewissen Grenzen natürlich — dass, je länger und je flacher (bis etwa  $45^\circ$  zur Senkrechten) der Hängedraht ist, desto höher der Stromabnehmerdruck den Fahrdrat anheben kann, desto

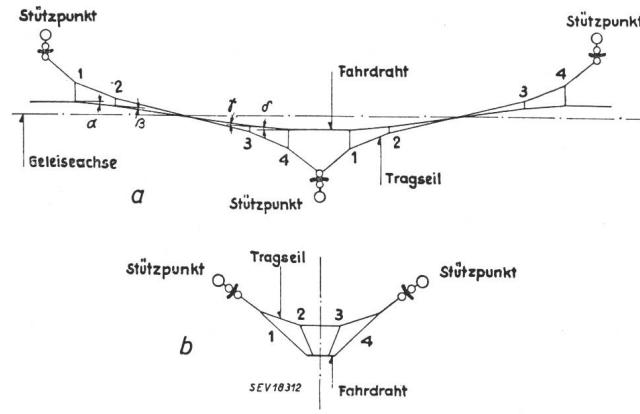


Fig. 6  
Vielfach-windschiefe Fahrleitung in gerader Strecke  
a Grundriss; b Querschnitt; Hänger 2 und 3 kurz, stark geneigt; Hänger 1 und 4 lang, schwach geneigt;  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ , Knickwinkel

elastischer also die Fahrleitung wird (Fig. 8), d. h. desto grösser beim Befahren die Höhendifferenz  $h$  zwischen Ruhe- und Arbeitslage wird. Diese Tatsache bedeutet, dass der Pantograph bei der vielfach-windschiefen Fahrleitung gemäss Fig. 6 in der

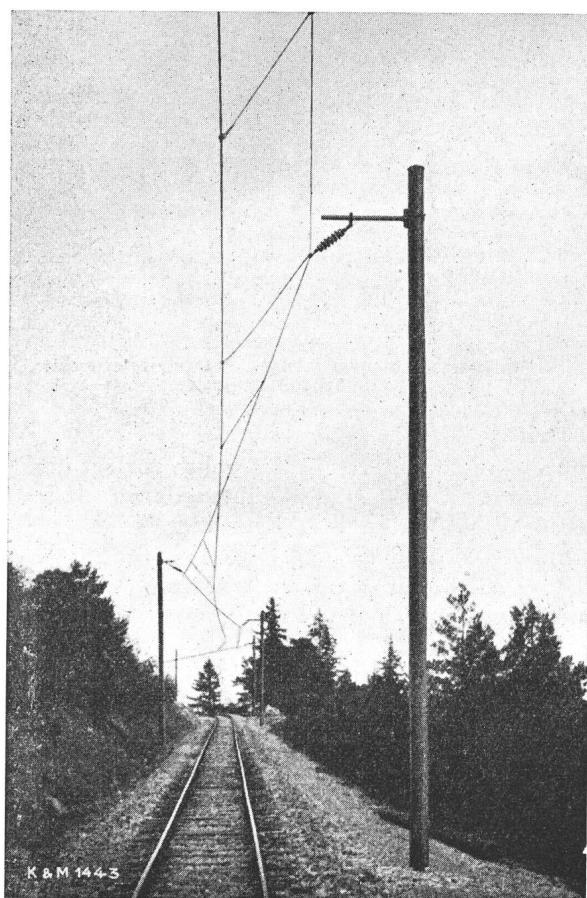


Fig. 7  
15-kV-Fahrleitung vielfach-windschiefer Bauart,  
Kurveeinlauf

Nähe des Stützpunktes den Fahrdrähten an den längeren und schwächer geneigten Hängedrähten 1 und 4 gleich hoch drücken kann wie an den Hängern

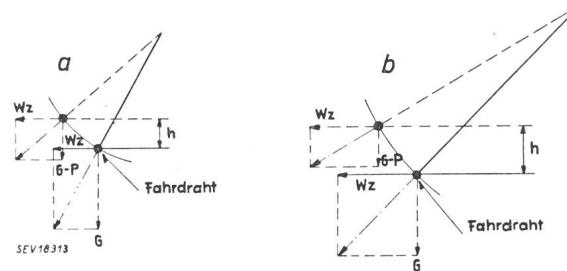


Fig. 8

Querschnitt einer vielfach-windschiefen Fahrleitung  
a kurzer, stark geneigter Hängedraht; b langer, schwach geneigter Hängedraht; G Gewicht des Fahrdrähtes; G-P senkrechte Gewichtskomponente in Arbeitslage; h elastische Auslenkung; Wz horizontaler Winkelzug vom Fahrdrähtewinkel herrührend; P vertikaler Anpressdruck des Stromabnehmers

2 und 3, welche an sich zwar weniger Auslenkung ergeben, wo aber die elastische Auslenkung des Tragseils selbst den Anhub mitvergrössert. Um den angestrebten, längs des Fahrdrähtes konstanten Elastizitätsverhältnissen mit dem geringsten Aufwand möglichst nahe zu kommen, verteilt man die Hängedrähte entsprechend. Spurhalter und damit harte Punkte der Fahrleitung fallen weg.

### b) Kurven-Strecken

Die Anordnung der VWS-Fahrleitung in Kurven, die seit längerer Zeit bekannt und von den SBB auch gebaut wird, zeigt Fig. 9. Das Tragseil wird

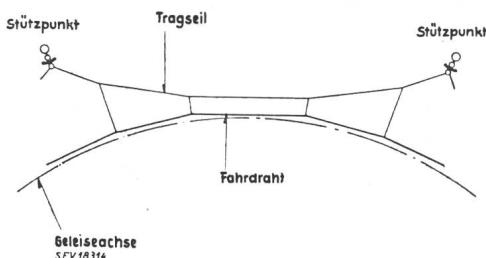


Fig. 9  
Vielfach-windschiefe Fahrleitung in Kurvenstrecke,  
mastsparende Bauweise  
Grundriss

kurvenaussenseitig der Geleiseachse verlegt und der Fahrdräht durch Hängedrähte daran befestigt. Fahrdrähtgewicht und horizontaler Winkelzug bestimmen die örtliche Lage des Fahrdrähtes.

Auch hier gilt für den konstanten Anhub des Fahrdrähtes durch den Pantographen das gleiche

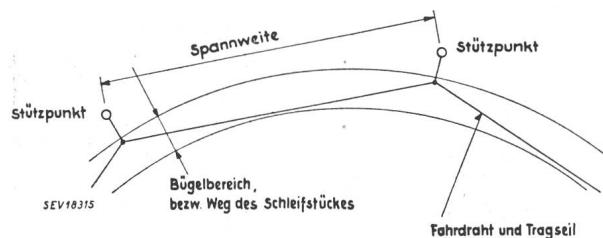


Fig. 10

Vielfach-senkrechte Fahrleitung in Kurvenstrecke;  
beschränkte Spannweite  
Grundriss

wie für die VWS-Fahrleitung in der Geraden. Diese Anordnung ermöglicht, den Fahrdrähten in Kurven annähernd entlang der Geleiseachse zu führen;

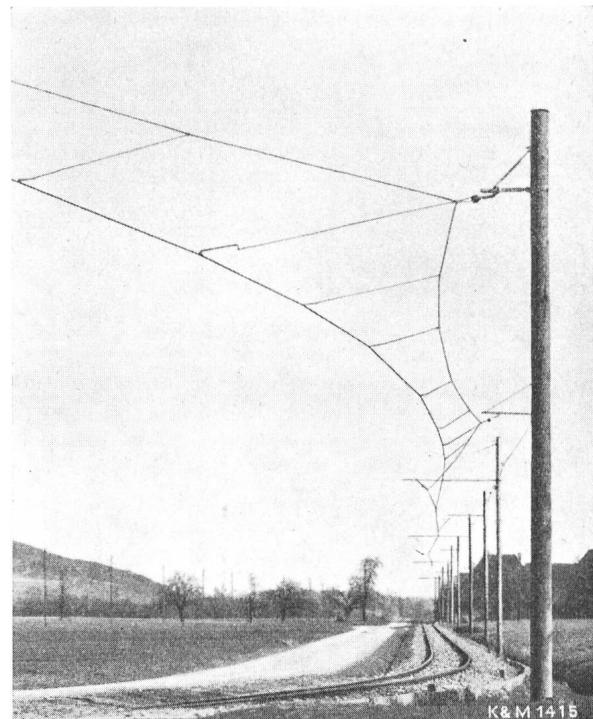


Fig. 11  
1200-V-Fahrleitung vielfach-windschiefer Bauart  
Kurvenauslauf

so können auch bei kleinen Kurvenradien grosse Spannweiten gebaut und damit Masten eingespart werden. Bei der vielfach-senkrechten Bauweise hingegen ist speziell in engen Kurven die Spannweite beschränkt, da der Fahrdräht gemäss Fig. 10 im Grundriss innerhalb einer Spannweite gerade verläuft und im Stromabnehmerbereich liegen muss.

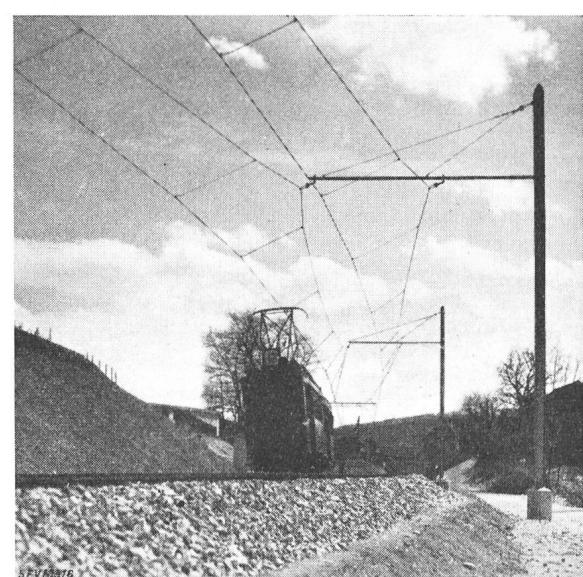


Fig. 12  
Doppelpurige 600-V-vielfach-windschiefe Fahrleitung  
in mastsparender Bauweise

Bei einem mit VWS-Fahrleitung ausgerüsteten, elektrischen Bahnbetrieb ist eine von der Hasler A.-G., Bern, gelieferte Hochfrequenzanlage installiert, durch welche die Telephonverbindung zwischen Lokomotivführer und Stationen über die Fahrleitung erfolgt. Auf Grund der einwandfreien Stromabnahme-Verhältnisse bei der VWS-Fahrleitung ist es möglich, solche Telephongespräche auch während der Fahrt störungsfrei zu führen (max. Fahrgeschwindigkeit auf dieser Strecke 60 km/h).

Der Bau von VWS-Fahrleitungen wurde wegen ihrer Radiostörfreiheit in der Schweiz durch die PTT subventioniert.

#### 4. Zusammenfassung

Zahlreiche langjährige Betriebserfahrungen mit und Messungen an den von der A.-G. Kummel & Matter entwickelten und gebauten, vollelastischen VWS-Fahrleitungen haben folgendes ergeben:

- a) Unterbruchlose, funkenfreie Stromabnahme und gleichbleibender Kontaktdruck bei allen Geschwindigkeiten infolge gleichbleibender Elastizitätsverhältnisse entlang der ganzen Fahrleitung. Die Rekuperation z. B. kann auf Grund des funkenfreien Arbeitsens der VWS-Fahrleitung ohne die bisherigen Schwierigkeiten angewendet werden.
- b) Billige Bauweise durch den Wegfall von Spurhaltern und infolge grosser Spannweiten, speziell in Kurven (Einsparung von Masten).
- c) Billige Bauweise außerdem, da es der starke Zickzack des Tragseils gemäss Fig. 12 ermöglicht, bei wechselseitig gestellten Masten sehr kurze Ausleger zu verwenden oder diese ganz wegzulassen.

d) Praktisch unbegrenzte Lebensdauer des elastisch aufgehängten Fahrdrähtes, bedingt durch die stoss- und schwungsdämpfende Wirkung der VWS-Fahrleitung. Nach einer Betriebszeit von 5 Jahren und 20 Stromabnehmerdurchgängen pro Tag ergab sich ein Fahrdrähtendurchmesser, welcher noch innerhalb der Fabrikationstoleranz lag. Eine Fahrdrähtenutzung konnte somit nicht festgestellt werden. Die durchschnittliche Lebensdauer des Kohle-Schleifstückes am Pantograph betrug mehr als 200 000 km. Diese Tatsachen ermöglichen eine kupfersparende Bauweise mit Kupferpanzer-Fahrdräht (Yverdon-Ste-Croix-Bahn).

e) Übersichtlicher, solider Aufbau der Fahrleitung, besonders kein Ersatz von Hängedrähten, da diese sowohl in Ruhe- als auch in Arbeitslage stets unter Zugspannung stehen.

f) Gutes Temperatur-Verhalten, d. h. horizontale Fahrdrähtelage im Winter und im Sommer.

#### 5. Mit VWS-Fahrleitung ausgerüstete Bahnbetriebe

Verkehrsbetriebe Winterthur (Strassenbahn), Yverdon-Ste-Croix-Bahn, Wynentalbahn, Bremgarten-Dietikon-Bahn, Städ. Strassenbahn Schaffhausen (Strecke Enghof-Beringen), Schwyzer Strassenbahn, Sernftal-Bahn, PSC-Bahn (La Chaux-de-Fonds-Les Ponts de Martel), Basler Verkehrsbetriebe (Strecke Höhlebach).

#### Adresse des Autors:

M. Wittgenstein, Dipl. Ing., Scheideggstrasse 124, Zürich 38.

## Die Messung der Luftzirkulation in Trockenschränken

Von M. Zürcher und J. Lüder, Zürich

542.47

Es wird eine Methode angegeben, welche gestattet, die Luftumwälzung bzw. den Trocknungseffekt verschiedener Trockenschränke miteinander zu vergleichen. Sie besteht in der Messung der von einer Naphthalinoberfläche pro Flächen- und Zeiteinheit verdampften Menge Naphthalin als dem Mass für die verdampfende Wirkung, die ein Trockenschrank auf das Prüfobjekt ausübt. Versuche zeigen, dass hinsichtlich Verdampfungswirkung zwischen verschiedenen gebräuchlichen Trockenschränken beträchtliche Unterschiede auftreten können.

Les auteurs décrivent une méthode permettant de comparer la circulation d'air, respectivement l'effet de séchage de différentes étuves. Elle consiste à déterminer la quantité de naphtaline qui, par unité de temps et de surface, s'évapore d'une surface de naphtaline déterminée; cette quantité est une mesure de l'effet dessiccatoire auquel est soumis l'éprouvette dans une étuve. Les essais effectués montrent que, pour différentes étuves d'utilisation courante, l'effet de séchage peut varier de manière appréciable d'une étuve à l'autre.

#### Einleitung

Beim Arbeiten im Trockenschrank sind folgende zwei Gesichtspunkte auseinanderzuhalten:

1. Das Prüfobjekt soll lediglich einer erhöhten Temperatur ausgesetzt werden, ohne dass eine merkliche Wechselwirkung mit der Umgebung, z. B. durch Austausch flüchtiger Stoffe stattfindet. Dieser Fall tritt auf, wenn es sich darum handelt, Reaktionen, z. B. Polymerisationen zwischen nicht flüchtigen Stoffen im Prüfobjekt, durch Wärme zu beschleunigen oder kurzzeitige Messungen bei einer gegebenen Temperatur auszuführen.

2. In weitaus den meisten Fällen aber wird erwartet, dass flüchtige Substanzen aus dem Prüfobjekt beabsichtigt oder unbeabsichtigt entweichen. Dies ist der Fall beim Trocknen, wo die Entfernung des Wassers oder von flüchtigen Lösungsmitteln verlangt wird, oder besonders bei künstlichen Alterungen, wo die Flüchtigkeit von Bestandteilen des

Prüfobjektes, z. B. von Weichmachern, eine ausschlaggebende Rolle spielt.

Damit eine gleichmässige Temperaturverteilung im Trockenschrank gewährleistet ist, muss eine gewisse Luftzirkulation vorhanden sein, die durch natürliche Konvektion oder durch Ventilatoren erreicht wird. Es leuchtet ein, dass in allen Fällen, in denen mit einer Verdampfung flüchtiger Stoffe gerechnet werden muss, neben der Oberfläche des Prüfobjektes die Intensität der Luftzirkulation von grundlegender Bedeutung ist, und dass Vorschriften, welche nur Temperatur und Trockenheit enthalten, bloss dann einen Sinn haben, wenn gleichzeitig über die Intensität der Luftumwälzung über dem Prüfobjekt eine Aussage gemacht werden kann; es sei denn, die Aufenthaltszeit sei so lange bemessen, dass alle flüchtigen Bestandteile quantitativ entfernt werden. Da eine gasvolumetrische Messung der Luftzirkulation in den meisten Fällen nur schwer durch-