

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 51 (1960)
Heft: 1

Artikel: Aluminium-Stromschienen
Autor: Dassetto, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-917008>

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: 05.04.2026

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

zelter Bogen im Falz in Einzelfällen nicht zu umgehen sein wird. Die Grundregel lautet dahin, dass der Textteil jeder Ausgabe, evtl. ohne Vorschriftenentwürfe und ohne die Rubrik «Prüfzeichen und Prüfberichte» auf besonderen Bogen untergebracht wird. Leider wird dieser Versuch eine Vergrößerung des Aufwandes in der Herstellung des Bulletins verursachen. Es gilt daher zu ermitteln, ob die Leser diese Massnahme entsprechend schätzen.

e) *Inhaltsverzeichnis*

Das bisher auf der ersten Umschlagseite stehende Inhaltsverzeichnis wird fallen gelassen, trotzdem es

sich für Nachforschungen, die vorgenommen werden, bevor das Jahresinhaltsverzeichnis zur Verfügung steht, bewährt hat. An seine Stelle tritt das vor der ersten Inserateseite eingelegte Inhaltsverzeichnis auf farbigem Papier.

Wir bitten die verehrten Leser, die Neuerungen aufmerksam zu verfolgen und die Fragebogen, die ihnen später zugehen werden, nach ihrem Urteil auszufüllen und einzusenden. Wir sind allen Lesern, die sich um die Feststellung der Lesermeinung bemühen, zum voraus dankbar.

Die Redaktion

Aluminium-Stromschienen

Von G. Dassetto, Zürich

621.316.35 : 621.315.53

Die Stromschienen, die in elektrischen Anlagen, namentlich zwischen Generatoren und Transformatoren verwendet werden, müssen nicht nur für Generatorenspannungen und für hohe Stromstärken bemessen sein, sondern auch den elektrodynamischen Beanspruchungen widerstehen, welche durch Kurzschlussströme, die infolge des ausgedehnten Verbundbetriebes immer grösser werden, entstehen. Nach Hinweisen allgemeiner Natur werden die für die elektrischen und mechanischen Berechnungen benötigten Gleichungen angegeben. Ferner werden Entwicklung und Eigenschaften der bis zu den neuesten entwickelten und aus Aluminium und dessen Legierungen bestehenden Profile beschrieben, die für die Lösung der Gesamtheit der aufgeführten Probleme geeignet sind.

Les barres de connexion employées dans les installations électriques, surtout entre les alternateurs et les transformateurs, doivent non seulement convenir aux tensions des machines génératrices et aux fortes intensités de courant, mais encore résister aux efforts électrodynamiques provoqués par les courants de court-circuit qui, à cause de l'interconnexion très poussée des réseaux électriques, s'avèrent toujours plus élevés. Après avoir donné des indications d'ordre général, ainsi que les formules nécessaires aux calculs électrique et mécanique, on décrit l'évolution et les caractéristiques des profilés en aluminium et en alliages d'aluminium, jusqu'à ceux conçus dernièrement et aptes à résoudre l'ensemble des problèmes susdits.

1. Allgemeines

Stromschienen in Schalt- und Verteilanlagen wurden anfänglich allein aus Kupfer ausgeführt. Vor etwa 50 Jahren begann man auch mit der Verwendung von Aluminiumschienen, deren Verbreitung seither ständig zugenommen hat.

Aluminium ist dank seiner technologischen und physikalischen Eigenschaften für Leiter von Schaltanlagen besonders geeignet und kann unter Berücksichtigung seiner Werkstoffeigenschaften mit Vorteil das Kupfer ersetzen (Tabelle I).

- b) Gute mechanische Eigenschaften;
- c) Geringes spezifisches Gewicht;
- d) Gute Beständigkeit gegen atmosphärische und chemische Angriffe;
- e) Leichte Verarbeitbarkeit, gut biegsam und schweisbar;
- f) Bildung nichtleitender Verbrennungsrückstände;
- g) Nicht magnetisch;
- h) Einfacher Unterhalt.

2. Werkstoffe

Mit Rücksicht auf hohe Leitfähigkeit und Wetterbeständigkeit sollen nur Leiter aus Reinaluminium 99,5% verwendet werden. Bei geringerer Reinheit ist ein schwacher Rückgang der Leitfähigkeit und der Korrosionsbeständigkeit zu berücksichtigen. In Spezialfällen, wo besonders hohe Festigkeit, hohe Streckgrenze und grosse Härte verlangt werden, kann auch die thermisch vergütete Legierung Anticorodal¹⁾ angewendet werden, wobei aber eine geringere Leitfähigkeit in Kauf genommen werden muss (Tabelle II).

3. Schienengestaltung

Normalerweise werden Stromschienen, je nach Bedürfnis, in Form von Flach- oder Rundstangen und von Rohren angewendet [1]²⁾.

Die Flachschiene stellen nicht immer die beste Lösung dar, da sie den senkrecht zu ihrer Höhe wirkenden Kräften einen niedrigen mechanischen Widerstand entgegensetzen sowie eine ungleich-

Vergleich zwischen Aluminium und Kupfer bei geometrisch ähnlichen Querschnitten

Tabelle I

Vergleichsgrössen	Aluminium 99,5 %	Kupfer
<i>Bei gleicher elektrischer Leitfähigkeit</i>		
Querschnitt	1,60	1
Durchmesser und Oberfläche . . .	1,27	1
Gewicht	0,49	1
Trägheitsmoment	2,55	1
Elastische Durchbiegung (bei gleicher Kraftwirkung) . . .	0,75	1
Erwärmung (bei gleichem Stromdurchgang) .	0,83	1
<i>Bei gleicher Erwärmung</i>		
Querschnitt	1,40	1
Oberfläche	1,18	1
Gewicht	0,42	1

Die charakteristischen Eigenheiten des Aluminiums können folgendermassen zusammengefasst werden:

- a) Hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit;

¹⁾ Geschützter Name einer Legierung der Aluminium-Industrie AG, Zürich.

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Eigenschaften	Einheit	Aluminium 99,5				Anticorodal		Kupfer		
		Weich	Press- qualität ge- streckt	½-Hart	Hart	½-Hart A	Hart B	Weich	½-Hart	Hart
Streckgrenze	kg/mm ²	2,5	4	8 ¹⁾	12 ¹⁾	14 ¹⁾	27 ¹⁾	4... 8	11...19	15...24
Zugfestigkeit	kg/mm ²	7	7,5	9 ¹⁾	13 ¹⁾	24 ¹⁾	32 ¹⁾	20...22	24...30	28...30
Dehnung δ 10	%	30 ¹⁾	20 ¹⁾	5 ¹⁾	2 ¹⁾	18 ¹⁾	10 ¹⁾	30...33	16... 3	6... 3
Brinellhärte	kg/mm ²	18	18 ¹⁾	25 ¹⁾	35 ¹⁾	60 ¹⁾	90 ¹⁾	40	60	90
Spezifisches Gewicht bei 20°C	kg/dm ³	0,2703				2,70		8,90		
Elastizitätsmodul	kg/mm ²	6000...6500				6500...7200		12 000...13 000		
Gleitmodul	kg/mm ²	2400...2600				2600...2800		4 000... 4 250		
Minimale elektrische Leitfähigkeit bei 20°C	m/Ωmm ²	35,7	34,5			25	27	57	56	
Maximaler elektrischer Widerstand bei 20°C	Ωmm ² /m	0,0280	0,0290			0,040	0,037	0,0175	0,0178	
Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes bei 20°C	1/Grad	0,003 93				0,002 9		0,003 1		
Linearer Wärmeausdehnungs-Koeffizient bei 20...100°C	1/Grad	0,000 023				0,000 023		0,000 017		
Schmelzpunkt (-Intervall)	°C	658				590...665		1083		
Spezifische Wärme bei 0...100°C	cal/g°C	0,22				0,20		0,094		
Wärmeleitfähigkeit	kcal/mh°C	175				140...150		325		
Schmelzwärme	kcal/kg	92				85		50		

¹⁾ Garantiewerte

mässige Verteilung des Wechselstromes bei Schienenpaketen bewirken. Bei Rundprofilen und Rohren dagegen sind die Abkühlungsverhältnisse nicht sehr befriedigend, so dass die zulässigen Dauerstrombelastungen merklich kleiner sind als bei Flachschiene mit gleichem metallischem Querschnitt.

Um sowohl den mechanischen Widerstand gegenüber den Flachschiene zu erhöhen, und damit einen grösseren Widerstand gegen dynamische Kurzschlusskräfte bzw. grössere Spannweiten zu erreichen, als auch die Abkühlungsverhältnisse gegenüber Rohrprofilen zu verbessern, werden gepaarte U- und L-Profile, wie sie in Fig. 1 dargestellt sind, angewendet [2]. Die Anordnungen A, B, C und D gelten vorzugsweise für Wechselstrom.

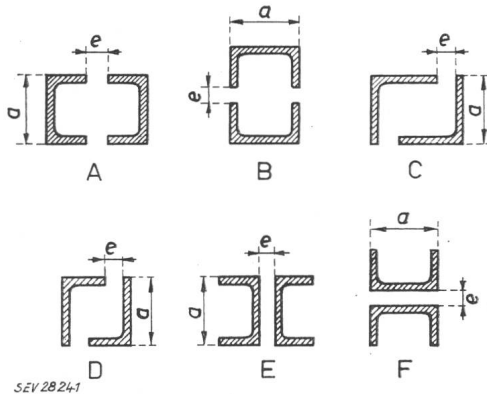


Fig. 1

Normale Anordnungen von U- und L-Profilaaren

a Steghöhe; e Abstand zweier zusammengesetzter Profile

Dank den besseren Abkühlungsverhältnissen gegenüber Hohlprofilen und dem niedrigeren Wert des Kelvin-Effektes gegenüber Flachprofilen ergibt sich für gepaarte U- und L-Profile eine höhere zulässige Dauerstrombelastung. Dieser Vorteil tritt bereits unter der Annahme eines gleichen Nutzquerschnittes bei einer Belastung von etwa 1000 A ein.

Um besonders den zwischen zwei gepaarten U-Profilen wirkenden elektrodynamischen Kräften so-

wie den immer grösser werdenden Spannweiten Rechnung zu tragen, muss man innerhalb der normalen Stützpunkte auch noch Zwischenverbindungen vorsehen. Sie bestehen z. B. aus Aluminium-Abstandhaltern, die in den in Frage kommenden Spannweiten in zu berechnenden Abständen zwischen beide U-Profile eingeschweisst werden.

Obschon diese Konstruktion sich als einwandfrei erwiesen hat [3], stellte sie nur eine Übergangslösung dar. Um die gestellten Bedingungen auf noch zweckmässiger Weise zu erfüllen und gleichzeitig den grössten Teil der relativ teuren Schweissarbeiten zu vermeiden, ist man nun zu einer rationelleren

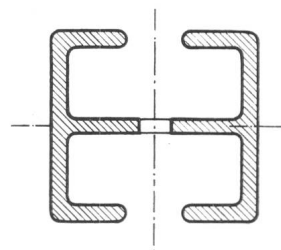


Fig. 2
Das neue «Doppel-T-Profil»

Lösung gekommen, wie sie in Fig. 2 schematisch dargestellt ist. Sie besteht aus einem einzigen Spezialprofil (Doppel-T-Profil), das je nach Betriebsverhältnissen beliebig bemessen werden kann, die vorher vorhandene elektrodynamische Probleme zwischen den Elementen einer Phase ausschaltet und viel längere Spannweiten zu wählen gestattet. Dabei ist die Abkühlungsfrage in einfacher Weise mittels passender Lochung des Mittelsteiges, der normalerweise für die Energieübertragung nicht mitberücksichtigt wird, gelöst. Die Abmessungen und der Abstand der Löcher sind so gewählt, dass sie gleichzeitig für den Durchgang der Befestigungsbolzen zu den Stützisolatoren benützt werden können.

Das neue Profil gestattet das Schweissen, das vorteilhaft die mechanischen Verbindungen ersetzt, auf folgende Arbeiten zu reduzieren:

- a) Kopfschweissung der nachfolgenden Schienenstösse,
- b) eventuelle Abzweigungen,
- c) eventuelle Dilatationsstücke.

Dieses Profil lässt sich in jeder Richtung unter Berücksichtigung gewisser Minimalradien biegen (ca. 2,5fache Profilhöhe).

Es sei noch erwähnt, dass das Doppel-T-Profil billiger ist als zwei zusammengesetzte U-Profile, ein quadratisches, geschlitztes Hohlprofil oder ein Flachschienebündel von gleichem Übertragungsvermögen. Die Preisverhältnisse liegen heute etwa wie in Tabelle III angegeben.

Prozentualer Kostenvergleich verschiedener Stromschienenprofile
Tabelle III

Zustand der Schienenprofile	4 Flach-	Kasten-	2 U-	Neues
	schienen	profil	Profile	Doppel-
	%	%	%	T-Profil
Fertig bearbeitet, jedoch ohne Montage	100	74	54	52
Dito, aber unter Berücksichtigung des Altmetallwertes, ohne Demontage .	100	72	45	40

4. Berechnung von Stromschienen

Für die Stromschienenberechnung [4] sind folgende Elemente grundlegend:

- a) zulässige Erwärmung,
- b) Spannungsabfall,
- c) Leistungsverlust durch den Jouleschen Effekt,
- d) mechanische Beanspruchung bei Kurzschlüssen.

Der Verein Schweizerischer Maschinenindustrieller (VSM) hat Normblätter über die Gleich- und Wechselstrom-Dauerbelastung von Flachschiene, Rundprofilen und Rohren (VSM 23986 E...23998 E) auf Grund folgender Annahmen aufgestellt:

Werkstoff: Reinaluminium 99,5%; spezifischer elektrischer Widerstand bei + 20°C: 0,0290 Ω mm²/m; für eine andere Umgebungstemperatur *t*:

$$\rho_t = 0,0290 [1 + 0,00393 (t - 20)]$$

Stromart: Gleichstrom oder Wechselstrom, 50 Hz.

Schiementemperatur: Umgebungstemperatur + 20°C; zulässige Übertemperatur 45°C (Spannungsabfall und elektrodynamische Kräfte sind nicht berücksichtigt).

Schienenoberfläche: blank gepresst oder gezogen.

Umgebung: Luft ruhend.

Schienenabstand in einem Paket: Schiendicke bzw. -durchmesser.

Flachschieneanordnung: hochkant stehend und horizontal geführt.

Die gleichen Annahmen gelten grundsätzlich ebenfalls für die Berechnung der U-, L- und Doppel-T-Schienen.

Liegen von diesen Annahmen abweichende Verhältnisse vor, dann besteht die Möglichkeit, die Werte durch Multiplikation bzw. Division mit Faktoren (*k*) umzurechnen. Sind mehrere Annahmen geändert, dann ist das Produkt der Einzelfaktoren zu verwenden.

Für zusammengesetzte U- und L- sowie für Doppel-T-Profile kann die Dauerstrombelastung wie folgt berechnet werden [5]:

$$I = 5 k A^{0,5} P^{0,39} \quad [A]$$

wo *I* Nennstrom [A]

A totaler Nutzquerschnitt [mm²]

P Umfang der zwei zusammenstossend gedachten Profile [mm]

k Faktor gleich dem Produkt der nachfolgend angegebenen Faktoren *k*₁...*k*₁₀.

4.1 Zulässige Erwärmung

Bei der Berechnung von Stromschienen ist es sehr wichtig, die betriebsmässige Erwärmung der Schienen auf das zulässige und wirtschaftlichste Mass zu beschränken. Die Ableitung der erzeugten Wärme erfolgt vornehmlich durch Abstrahlung und durch Konvektion. Infolgedessen haben auf die Wärmeableitung die Grösse und Beschaffenheit der Schienenoberfläche, die Anordnung der Schienen und die Zirkulation der umgebenden Luft einen Einfluss.

Die in den VSM-Normblättern enthaltenen und für die U-, L- und Doppel-T-Profile zu berechnenden Dauerstrombelastungen, können sich also auf Grund folgender Elemente ändern:

4.1.1 Temperatur

Weichen die Umgebungstemperatur oder die Übertemperatur von den Grundannahmen (+20°C bzw. 45°C) ab, dann sind in den Berechnungen die Faktoren *k*₁ (Tabelle IV) bzw. *k*₂ (Tabelle V) zu verwenden. *k*₂ gilt auch für Wechselstrom, solange die Übertemperatur innerhalb ± 20°C vom Grundwert abweicht. Praktische Anwendungsbeispiele sind in Tabelle VI gezeigt.

Faktor *k*₁
für die Umgebungstemperatur
Tabelle IV

Umgebungstemperatur °C	<i>k</i> ₁
- 20	1,09
- 10	1,065
0	1,04
+ 10	1,02
+ 20	1,00
+ 30	0,98
+ 40	0,962

Faktor *k*₂
für die Erwärmung
Tabelle V

Erwärmung °C	<i>k</i> ₂
25	0,69
30	0,77
35	0,85
40	0,93
45	1,00
50	1,06
55	1,12
60	1,18
65	1,24

Anwendungsbeispiele der Angaben in den Tabellen IV und V
Tabelle VI

Raumtemperatur	°C	+ 20	+ 20	+ 20	+ 40	+ 40
Erwärmung	°C	+ 45	+ 25	+ 65	+ 25	+ 48
Maximale Betriebstemperatur	°C	+ 65	+ 45	+ 85	+ 65	+ 88
Faktor <i>k</i> ₁		1	1	1	0,962	0,962
Faktor <i>k</i> ₂		1	0,69	1,24	0,69	1,04
Faktor <i>k</i> für die Berechnungen		1	0,69	1,24	0,664	1

4.1.2 Metallsorten

Wird die Metallreinheit oder -sorte anders als Aluminium 99,5% gewählt, dann ist in den Berechnungen der Faktor *k*₃ (Tabelle VII) anzuwenden.

Tabelle VII

Metall	Spezifischer Widerstand bei 20°C $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	k_3
Aluminium 99,5%	0,0290	1,00
Anticorodal A	0,0400	0,85
Anticorodal B	0,0370	0,89

4.1.3 Oberflächenbeschaffenheit

Stromschienen werden normalerweise mit blank gepresster oder gezogener Oberfläche geliefert. Die durch atmosphärische Einflüsse entstandene natürliche Oxydschicht erhöht die Wärmeabgabe durch Strahlung. Matte Anstriche, besonders in dunkler Tönung, erhöhen die Wärmeabstrahlung. In solchen Fällen ist in die Berechnungen der Faktor k_4 (Tabelle VIII) einzusetzen.

Einfluss des Anstriches auf die zulässige Belastung (Faktor k_4)
Tabelle VIII

Schienenhöhe oder -durchmesser mm	Oberflächenbeschaffenheit	Anzahl Schienen			
		bei Gleichstrom			
		1	2	3	6
		bei Wechselstrom			
		1	2...6		
		k_4			
5...15	Blank	1,00	1,00	1,00	1,00
	Schwarz	1,15	1,11	1,09	1,08
	Andere Farbe	1,12	1,08	1,07	1,06
16...50	Schwarz	1,25	1,20	1,16	1,14
	Andere Farbe	1,18	1,13	1,12	1,10
51...200	Schwarz	1,30	1,23	1,16	1,10
	Andere Farbe	1,25	1,18	1,10	1,08
U- und L-Profilpaare oder Doppel-T-Profil	Blank	1,00			
	Schwarz	1,20			
	Andere Farbe	1,10			

4.1.4 Form

Je grösser das Verhältnis des Umfanges zu einem gegebenen Querschnitt einer Stromschiene ist, um so günstiger wird auch die Wärmeableitung und dadurch die zulässige Dauerstrombelastung. Bei Flachschienen sollen deshalb möglichst dünne und hochkantige Profile verwendet werden. Bei Wechselstrom wird man ausserdem, um die Verluste infolge Stromverdrängung zu vermindern, allzu dicke Schienen vermeiden und solche durch mehrere parallel geführte dünnere ersetzen.

Bei U- oder L-Profilpaaren spielt der gewählte Abstand e in Fig. 5 eine Rolle. Für solche Profile ist in den Berechnungen der Faktor k_5 (Tabelle IX) anzuwenden.

Faktor k_5 für den Abstand e bei zusammengesetzten U- und L-Profilen

Tabelle IX

Anordnung	Abstand e				
	0,75 a	0,5 a	0,33 a	0,25 a	0,1 a
	k_5				
Nach Figur 1 A, B, C, D	1,465	1,430	1,385	1,350	1,240
Nach Figur 1 E, F	1,485	1,475	1,455	1,430	1,370

a Steghöhe

4.1.5 Anordnung

Die in den VSM-Normblättern angegebenen Dauerstrombelastungen gelten für die Annahme, dass bei Schienenpaketen der Abstand zwischen den Schienen gleich der Schienenstärke ist und dass die Schienen in horizontaler Lage hochkant angeordnet sind. Bei liegender Anordnung (\equiv) sind die Werte in den Normblättern durch Multiplikation mit dem Faktor k_6 aus Tabelle X zu vermindern.

Faktor k_6 für liegende Flachschienen

Tabelle X

Anzahl der liegenden Schienen	1	2	3	4
k_6	0,83	0,77	0,68	0,67

Werden Schienenabstände grösser als die Dicke der Schienen gewählt, so können diese höher belastet werden. Bei mehr als drei Schienen, z. B. bei Gleichstrom und einem Schienenabstand von 3mal die Schienenstärke, erhöht sich die zulässige Belastung je nach Schienenstärke um 5 bis 14%. Bei Wechselstrom sollen mit Rücksicht auf die Stromverdrängung womöglich nicht mehr als vier Schienen pro Paket parallel geführt werden.

Bei hohen Wechselströmen empfiehlt sich eine abwechslungsweise Anordnung der Schienen der verschiedenen Phasen, wodurch die Spannungsabfälle verringert werden können. Wenn mehr als vier Schienen notwendig sind, so werden diese vorteilhaft in zwei Bündeln getrennt geführt, was die Belastung, bezogen auf die normale Anordnung, bis etwa 20% zu steigern gestattet.

Bei sehr grossen Strömen wird empfohlen, besondere Schienenprofile zu wählen, welche sich in bezug auf die Stromverdrängung und den Widerstand zu den dynamischen Kurzschlussbeanspruchungen günstiger verhalten. In solchen Fällen ist bei Verwendung von U- oder L-Profilpaaren in den Berechnungen der Faktor k_7 (Tabelle XI) anzuwenden.

Anordnungsfaktor k_7 für zusammengesetzte U- und L-Profile

Tabelle XI

Anordnung	k_7
Nach Figur 1 A, C, D, E	1,0
Nach Figur 1 B, F	0,9

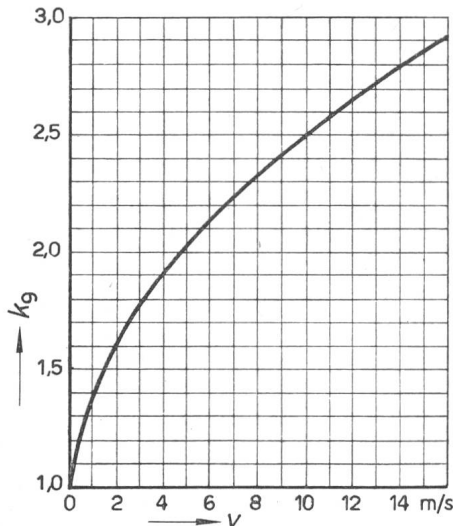
Bei Doppel-T-Profilen spielt die Anordnung praktisch keine Rolle, da die Wärmeabfuhr immer sehr günstig ist.

4.1.6 Umgebung

Die Dauerbelastungswerte aus den VSM-Normblättern gelten für ruhende umgebende Luft. Bei gestauter Luft, wie dies z. B. in niederen Kabelböden der Fall ist oder bei Anordnung der Schienen dicht unterhalb einer nicht ventilierten Decke, sind die zulässigen maximalen Belastungen entsprechend herabzusetzen. Tabelle XII enthält einige typische Montagefälle mit den dazugehörigen Faktoren k_8 .

Umgebungszustand	k_8
<i>Im Innenraum</i>	
Ruhende Luft in nicht ventiliertem Raum . . .	1,0
Ruhende Luft in leicht ventiliertem Raum . . .	1,1
Profilpaar in einer nicht ventilierten Hülle . . .	0,7
<i>Im Freien</i>	
	1,2

Bei Vorhandensein einer Luftzirkulation können die zulässigen Belastungen erhöht werden. Dazu können die aus der in Fig. 3 wiedergegebenen Kurve abzulesenden Koeffiziente k_9 als Richtlinien dienen.



SEV 28243
Fig. 3
Faktor k_9 für nicht ruhende Luft, für Gleich- und Wechselstrom-Dauerbelastung

4.1.7 Stromart

Bei Wechselstrom übt das Verhältnis Steghöhe zu Dicke der Profile sowie die Frequenz, die normalerweise 50 Hz beträgt, einen gewissen Einfluss auf die Dauerstrombelastung aus. Dieser Einfluss ist in den VSM-Normblättern bereits berücksichtigt.

Für U- und L- sowie für Doppel-T-Profile soll dafür in den Berechnungen der Faktor k_{10} laut Tabelle XIII angewendet werden.

4.2 Spannungsabfall

Währenddem bei Gleichstrom einzig der Ohmsche Spannungsabfall ΔU_r für die Berechnung von Stromschienen zu berücksichtigen ist,

$$\Delta U_r = R I \quad [\text{V}]$$

wo R Ohmscher Widerstand $[\Omega]$
 I Strom $[\text{A}]$

muss bei Wechselstrom zu diesem

$$\Delta U_r = R_\omega I \quad [\text{V}]$$

wo $R_\omega = R/k_{10}^2$

noch der induktive Spannungsabfall ΔU_x geometrisch addiert werden.

Bei Flachschienen gelten für ΔU_x folgende Formeln:

a) Einphasenwechselstrom $\Delta U_x = 2 \omega L I \quad [\text{V}]$

b) Drehstrom $\Delta U_x = \sqrt{3} \omega L I \quad [\text{V}]$

wo $L = 2l \left(\ln 2 \frac{\pi D + a}{\pi h + 2a} + 0,003 \right) 10^{-7} \quad [\text{H}]$

und $\omega = 2 \pi f$, Kreisfrequenz

L Induktivität eines Leiters (Phase) $[\text{H}]$

I Strom $[\text{A}]$

l einfache Länge der Leitung $[\text{m}]$

D Mittenabstand von Leiter zu Leiter $[\text{cm}]$

h Breite des Leiters $[\text{cm}]$

a Höhe des Leiters $[\text{cm}]$

Bei Drehstrom ist es zweckmässig, für grosse Entfernungen und hohe Stromstärken Phasen-Verdrillungen vorzunehmen, da der induktive Spannungsabfall bei den äussersten Phasen grösser ist. Im Falle von Schienenpaketen empfiehlt es sich

Faktor k_{10} für die Stromart

Tabelle XIII

Stromart	k_{10} bei $f = 50 \text{ Hz}$										
	Profildicke c^1) in mm										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14
<i>Gleichstrom</i>	1										
<i>Wechselstrom</i>											
Steghöhe a											
50 mm	1	1	1	0,995							
60 mm		1	1	0,995	0,995						
80 mm			0,995	0,990	0,990	0,985					
100 mm				0,990	0,985	0,975	0,970				
120 mm					0,985	0,975	0,965	0,955			
150 mm						0,970	0,960	0,950	0,935		
200 mm									0,925	0,900	0,865
250 mm										0,895	0,865

¹) Betreffend c siehe Fig. 5.

ausserdem, die Phasen nach den Schemata R-S-R-S-R-S... (Einphasenwechselstrom) oder R-S-T-R-S-T-R-S-T... (Drehstrom) anzuordnen, da es für die Berechnung genügt, nur noch eine Gruppe, RS oder RST, zu berücksichtigen. Dabei beträgt die Stromstärke nur noch I/Anzahl der parallel geschalteten Schienen; der Abstand D wird kleiner (Fig. 4), wodurch der induktive Spannungsabfall niedriger ausfällt.

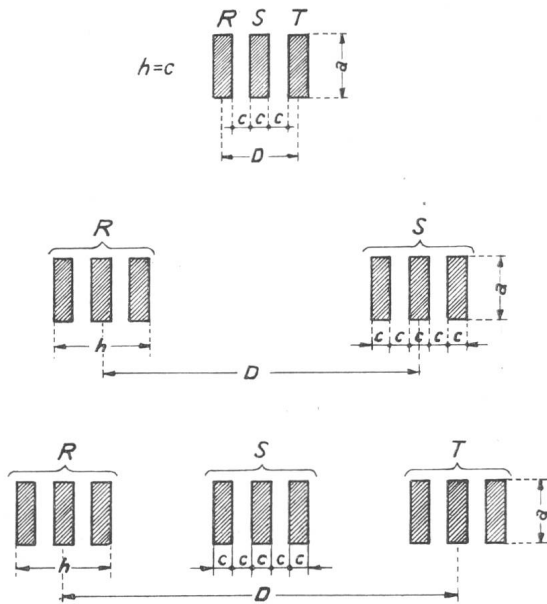


Fig. 4

Schematische Anordnung von Flachschienen für die Berechnung der Induktivität

a Steghöhe; c Schienendicke; h Phasenbreite;

D Abstand zwischen den Mittellinien der äussersten Phasen

Im Falle von zusammengesetzten U- und L- sowie von Doppel-T-Profilen kann der induktive Spannungsabfall auf Grund nachfolgender weitgehend angenäherter Formeln berechnet werden:

a) Für Einphasenwechselstrom:

$$\Delta U_x = 4,61 \, j\omega \log \frac{\beta_1 \dots \beta_n}{d (\alpha_2 \dots \alpha_n)} I \cdot 10^{-4} \quad [\text{V/km}]$$

wo I Strom [A]

$\omega = 2\pi f$, Kreisfrequenz

α Abstand zwischen den Mittellinien eines Hinleiters und den übrigen Hinleitern [mm]

β Abstand zwischen den Mittellinien eines Hinleiters und den Rückleitern [mm]

$d = 0,284 (a + h) - 0,6 c$ [mm]

worin

a Steghöhe des Profils [mm]

c Dicke des Profils [mm]

h Breite des Profils [mm]

b) Für Drehstrom bei gleichmässiger Phasenbelastung:

α) Anordnung in gleichschenkligen Dreieck, mit verdrehten und nicht verdrehten Phasen:

$$\Delta U_x = 4,61 \, j\omega \log \frac{D}{d} I \cdot 10^{-4} \quad [\text{V/km}]$$

wo D Abstand zwischen den Mittellinien zweier Phasen [mm]

Die gleiche Formel gilt auch für die mittlere Phase bei einer nicht verdrehten horizontalen Anordnung der Leiter, wobei aber der Spannungsabfall für die anderen zwei Phasen höher ausfällt.

β) Horizontale Anordnung mit verdrehten Phasen:

$$\Delta U_x = 4,61 \, j\omega \log \frac{D'}{d} I \cdot 10^{-4} \quad [\text{V/km}]$$

wo $D' = 1,26 D$ [mm], (D Abstand zwischen der mittleren Phase und den anderen Phasen)

Die aus vorstehenden Formeln berechneten Ergebnisse entsprechen den wirklichen Werten bis auf 2...3%.

4.3 Leistungsverluste durch den Jouleschen Effekt

Die Leistungsverluste können mittels den folgenden Formeln berechnet werden:

a) Gleichstrom: $\Delta P = R I^2$ [W]

b) Einphasenwechselstrom: $\Delta P = 2 \frac{R}{k_{10}^2} I^2$ [W]

c) Drehstrom: $\Delta P = 3 \frac{R}{k_{10}^2} I^2$ [W]

4.4 Mechanische Beanspruchung bei Kurzschlüssen

In modernen Anlagen kommen immer grössere Leistungen in Frage. Eine Prüfung des Schienenwiderstandes in bezug auf die dynamischen Kurzschlussbeanspruchungen erweist sich also als notwendig. Diese nehmen merklich zu im Resonanzfall, d. h. wenn die Eigenfrequenz f_0 des Systems der Frequenz $2f$ oder einer ihrer Harmonischen entspricht. Es ist also zweckmässig, um die Resonanz zu vermeiden, dass:

$$1,3 \cdot 2f \leq f_0 \leq 0,7 \cdot 2f$$

für

$$f_0 = 112 \sqrt{\frac{E J}{G l^4}}$$

wo E Elastizitätsmodul [kg/cm²]

J Trägheitsmoment [cm⁴]

G Leitergewicht [kg/cm]

l freie Spannweite [cm]

Für die Berechnung werden folgende allgemeine Formeln verwendet:

a) Elektrodynamische Beanspruchung F jeder Phase:

$$F = 2,04 \frac{l}{d} I_{max}^2 \cdot 10^{-8} \quad [\text{kg}]$$

wo l Länge der Spannweite [cm]

d Mittenabstand zweier Phasen [cm]

b) Biegemoment M :

$$M = \frac{F l}{8} \quad [\text{kgcm}]$$

c) Widerstandsmoment (z. B. einer Flachschiene)
 W_y :

$$W_y = \frac{c^2 a}{6} \quad [\text{cm}^3]$$

d) Spezifische Biegebeanspruchung σ :

$$\sigma = \frac{M}{W_y} \quad [\text{kg/cm}^2]$$

σ muss kleiner sein als die maximal zulässige Beanspruchung, jedenfalls kleiner als die Streckgrenze ($\sigma_{0,2}$).

e) Maximal zulässige Spannweite:

$$l = \frac{10^5}{I_{max}} \sqrt{W_y d \frac{8 \sigma_{0,2}}{2,04}} \quad [\text{cm}]$$

wo $\sigma_{0,2}$ Streckgrenze $[\text{kg/mm}^2]$

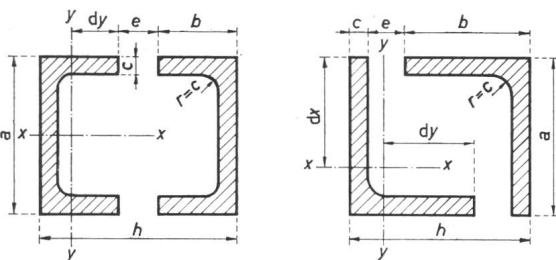


Fig. 5

Bezeichnungen von U- und L-Profilpaaren

a Steghöhe; b Flanschbreite; c Schienendicke; e Abstand zweier zusammengesetzter Profile; h Breite des Profilpaares; x-x Achse x des Schwerpunktes; y-y Achse y des Schwerpunktes; dx Abstand vom Schwerpunkt zur Achse y; dy Abstand vom Schwerpunkt zur Achse x

Im Sonderfall der zusammengesetzten U- und L-Schienen gelten folgende Formeln:

a) Dynamische Kraft F bei Kurzschluss zwischen zwei Phasen bei Gleich- und Wechselstrom (Beanspruchung pro Längeneinheit auf jedem Profil einer Phase):

$$F = 1,02 \frac{I_{cc \max}^2}{D} 10^{-8} \quad [\text{kg/cm}]$$

wo $I_{cc \max}$ maximaler Kurzschlußstrom [A]

D Abstand zwischen den Mittellinien zweier Phasen [cm]

b) Dynamische Kraft F bei Drehstromkurzschluss (Beanspruchung pro Längeneinheit auf jedem Profil einer Phase):

$$F = 0,765 \frac{\hat{I}_{cc}^2}{D} 10^{-8} \quad [\text{kg/cm}]$$

wo \hat{I}_{cc} Scheitelwert der ersten Welle des dreiphasigen Kurzschlußstromes [A]

c) Beanspruchung pro Längeneinheit zwischen zwei Profilen einer Phase:

$$F_1 = 0,51 \frac{I_{cc \max}^2}{D_1} 10^{-8} \quad [\text{kg/cm}]$$

wo $D_1 = h + 0,409(a - 4c) + d - 1,5b$ [cm]
 (für Anordnungen A, B, E, F von Fig. 1)

$$= (0,5h + d) \sqrt{2} - 0,815a - 1,25c \quad [\text{cm}]$$

(für Anordnung C von Fig. 1)

$$= 2,065a - 0,4b - 2,65c \quad [\text{cm}]$$

(für Anordnung D von Fig. 1; für h, a, b, c, d siehe Fig. 5)

d) Maximal zulässige Spannweite l :

$$l = 3,08 \sqrt{\frac{\sigma_{0,2}}{\frac{F a}{2 J_x} + \frac{F_1 d}{(n+1)^2 J_y}}} \quad [\text{cm}]$$

wo $\sigma_{0,2}$ Streckgrenze $[\text{kg/cm}^2]$

F Beanspruchung im Kurzschlussfall zwischen zwei Phasen $[\text{kg/cm}]$

F_1 Beanspruchung zwischen zwei Profilen einer Phase $[\text{kg/cm}]$

J Trägheitsmoment $[\text{cm}^4]$

a Steghöhe $[\text{cm}]$

d Abstand von der neutralen Linie $[\text{cm}]$

n Anzahl allfälliger Zwischenverbinder

Die zweckmässige Anwendung von Zwischenverbindern kann die Spannweite verdreifachen, unter Umständen sogar vervierfachen.

Mit diesen Formeln sind die elektrischen und mechanischen Eigenschaften von Doppel-T-Profilen in Tabelle XIV auf Grund folgender Annahmen bestimmt worden:

Profile: blank gepresst

Spezifischer elektrischer Widerstand bei $+20^\circ\text{C}$:

0,0290 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ für Aluminium

0,0370 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ für Anticorodal B

Stromart: Wechselstrom, 50 Hz

Umgebungstemperatur: $+20^\circ\text{C}$

Zulässige Übertemperatur: 45°C

Luft: ruhend

5. Wirtschaftlichkeit

Für grössere Anlagen wird es sich lohnen, den Schienenquerschnitt nicht nur auf Grund der Erwärmung zu wählen, sondern ihn auch auf Wirtschaftlichkeit zu prüfen.

Die Jahreskosten K einer Energieübertragung setzen sich zusammen aus Kosten der Verlustenergie, der Amortisation und der Verzinsung der Anlage, also:

$$K = K_1 + K_2$$

In K_1 interessiert hauptsächlich der Energiepreis. Unter K_2 fällt die Amortisation der Kosten für Löhne und Material, wobei der volle Betrag des verbrauchten Aluminiums nicht zu amortisieren ist, da nach der üblichen Abschreibungszeit das Metall noch mindestens den Altmetallwert besitzt.

Es seien:

I Strom [A]

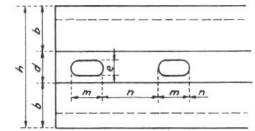
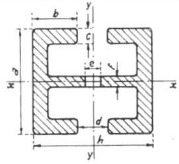
A Querschnitt $[\text{mm}^2]$

J Stromdichte $[\text{A/mm}^2]$

ρ spezifischer elektrischer Widerstand bei $+20^\circ\text{C}$ $[\Omega \text{ mm}^2/\text{m}]$

l Schienenlänge [m]

Elektrische und mechanische Eigenschaften von Doppel-T-Profilen



Dauerstrom A	Metall 1)	Abmessungen mm a b c d e ²⁾ f h						Querschnitt mm ²	Gewicht kg/m	Trägheitsmoment cm ⁴ J _x J _y		Widerstandsmoment cm ³ W _x W _y		Kurzschlussstrom kA	Phasenabstand cm	Maximal zulässige Spannweite cm ³⁾													
																Elektrodynamische ⁴⁾						Statische ⁵⁾							
																bei einer Streckgrenze von kg/mm ²						H		I		H		I	
																Al			Ac			Al		Ac		Al		Ac	
2,5 4			15			2,5 4		15		Al		Ac																	
2 000	Al	60	20	6	30	15	4	70	1 188	3,15	47,56	46,25	27,87	15,41	100	50	75	111	234	118	149	316	477	482	574	582			
	Ac	60	20	8	30	15	5	70	1 489	3,95	116,72	55,20	35,35	18,34		60	90	122	257	129	163	346							
																70	104	131	277	140	177	374							
																80	111	140	297	149	189	400							
3 000	Al	80	30	8	40	25	6	100	2 308	6,10	371,66	160,30	74,33	40,00	100	50	141	179	343	193	244	509	592	600	731	742			
	Ac	80	30	10	40	25	8	100	2 800	7,39	434,13	184,34	84,83	46,08		60	155	196	381	211	267	557							
																70	167	212	416	228	288	602							
																80	179	226	448	244	308	644							
4 000	Al	100	45	8	40	25	6	130	3 288	8,75	859,30	384,70	132,20	76,94	100	50	196	257	553	248	325	733	712	716	870	880			
	Ac	100	45	12	40	25	10	130	4 744	12,59	1 162,97	509,20	178,92	101,84		60	215	282	605	272	356	802							
																70	232	304	654	293	385	867							
																80	248	325	699	315	411	927							
5 000	Al	120	55	10	40	25	8	150	5 000	13,33	1 688,30	843,43	225,11	139,07	100	50	264	334	741	335	424	946	814	820	970	980			
	Ac	120	55	15	40	25	12	150	7 000	18,85	2 235,80	1 099,30	298,11	183,21		60	289	365	812	368	465	1036							
																70	312	394	877	397	502	1120							
																80	334	422	938	424	537	1200							
6 000	Al	150	66	10	48	33	8	180	6 200	16,52	3 107,30	1 662,65	345,25	221,68	100	50	333	421	948	415	526	1187	969	998	1130	1147			
	Ac	150	66	15	48	33	12	180	8 880	23,64	4 224,85	2 412,53	469,43	299,35		60	365	461	1038	455	576	1300							
																70	394	498	1120	492	622	1404							
																80	421	533	1199	526	665	1501							
7 000	Al	200	75	10	50	35	8	200	7 720	20,56	4 953,30	3 682,99	495,33	368,28	100	50	429	543	1202	498	630	1402	1201	1919	1293	1315			
	Ac	200	75	14	50	35	12	200	10 600	28,20	6 519,57	4 820,89	651,95	482,09		60	470	595	1317	545	690	1532							
																70	508	642	1423	589	745	1657							
																80	543	687	1511	630	796	1764							
8 000	Al	200	95	10	60	40	8	250	8 840	23,55	8 566,30	4 405,65	685,30	440,56	100	50	469	594	1380	585	740	1745	1215	1227	1434	1454			
	Ac	200	95	16	60	40	14	250	13 808	36,73	12 688,43	6 428,5	1015,07	642,85		60	514	650	1521	641	811	1915							
																70	555	702	1643	693	876	2065							
																80	594	751	1756	740	937	2207							
9 000	Al	250	100	10	70	50	8	270	10 120	26,94	12 036,58	7 792,23	891,60	623,38	100	50	558	708	1577	668	845	1893	1432	1454	1597	1625			
	Ac	250	100	14	70	50	12	270	14 000	37,22	16 124,36	10 362,98	1194,40	829,04		60	612	780	1727	731	925	2074							
																70	662	842	1866	790	999	2240							
																80	708	900	1995	845	1068	2394							
10 000	Al	250	125	10	70	50	8	320	11 520	30,72	18 259,5	9 233,28	1141,20	738,66	100	50	608	769	1860	755	955	2331	1446	1459	1715	1738			
	Ac	250	125	17	70	50	15	320	19 234	51,21	28 990,83	14 420,27	1811,92	1153,62		60	666	842	2038	827	1047	2554							
																70	719	910	2201	894	1130	2759							
																80	769	972	2353	955	1209	2949							

¹⁾ Für das Aluminium 99,5 % (Al) sind zwei Werte der Streckgrenze (0,2 %), und zwar 2,5 und 4,0 kg/mm² und für das Anticororal B (Ac) nur der Wert 15,0 kg/mm² berücksichtigt worden.

²⁾ Um die Abkühlverhältnisse der Profile zu verbessern, sind folgende Belüftungsschlitze vorgesehen:

Dauerstromstärke	Belüftungsschlitzmasse	
	m mm	n mm
2 000 ≈ 6 000 A	70	130
7 000 ≈ 10 000 A	100	150

³⁾ Ohne Berücksichtigung der möglichen Herstellungslängen oder der dadurch entstehenden Isolatorenbeanspruchungen.

⁴⁾ Berechnet auf Grund der im Kurzschlussfall entstehenden elektrodynamischen Beanspruchungen.

⁵⁾ Berechnet unter der Annahme eines maximalen Schienendurchhanges entsprechend 5 % der Schienenhöhe (a bzw. h).

- w Energiepreis [Fr./kWh]
- h jährliche Betriebsstunden [h]
- a Amortisationsfaktor [Fr./kg Al]

Damit berechnen sich

die jährliche Verlustleistung:

$$P_v = (JA)^2 \frac{\rho}{A} lh \cdot 10^{-3} \quad [\text{kWh}]$$

die Kosten der Verluste:

$$K_1 = J^2 A \rho l h w \cdot 10^{-3} \quad [\text{Fr.}]$$

und die Anlagekosten:

$$K_2 = 2,703 A l a \cdot 10^{-3} \quad [\text{Fr.}]$$

Setzt man $A = \frac{I}{J}$, so werden die jährlichen Kosten:

$$K = K_1 + K_2 = I J \rho l h w \cdot 10^{-3} + 2,703 \frac{I}{J} l a \cdot 10^{-3} \quad [\text{Fr.}]$$

also

$$K = C J + \frac{D}{J} \quad [\text{Fr.}]$$

Daraus folgt:

$$J_{min} = \sqrt{\frac{D}{C}} = \sqrt{\frac{2,703 a}{\rho w h}} \quad [\text{A/mm}^2]$$

Sind w und h bekannt, so kann J_{min} auf Grund des in Fig. 6 angegebenen Diagrammes [6] unmittelbar bestimmt werden.

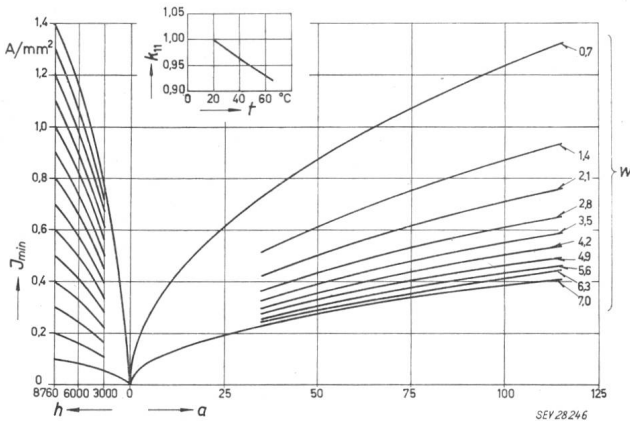


Fig. 6

Wirtschaftliche Stromdichte in A/mm^2 bei $t = 20^\circ\text{C}$

J_{min} Stromdichte; h jährliche Betriebsstunden; a Amortisationsfaktor; w Energiepreis in Rp./kWh; k_{11} Korrekturfaktor von J in Funktion der Temperatur; t Temperatur

Bei gegebenem Strom I lässt sich dann der wirtschaftliche Schienenquerschnitt A nach folgender Formel errechnen:

$$A = \frac{I}{J_{min}} \quad [\text{mm}^2]$$

6. Kurzschluss- und Lichtbogen-Wirkung

Die Erwärmung durch Kurzschlußströme ist bei widerstandsgleichen Aluminiumschienen dank der grösseren spezifischen Wärme geringer als bei Kupfer. Ausserdem haben die Aluminiumschienen grössere Oberflächen und grössere Querschnitte und infolgedessen günstigere Wärmeableitung.

Ein gleicher Kurzschlußstrom bringt in widerstandsgleichen Aluminium- und Kupferschienen folgende Temperaturverhältnisse:

- wenn Al 175°C dann Cu 280°C
- wenn Al 375°C dann Cu 600°C

Der Aluminiumleiter ist also viel aufnahmefähiger für Kurzschlußströme als derjenige aus Kupfer. Die dabei entstehende Erwärmung führt zu einem Festigkeitsverlust des Materials, welcher bei Aluminium und bei gleichen Temperaturverhältnissen weniger ausgeprägt ist. Da aber der widerstandsgleiche Aluminiumleiter weniger erwärmt wird, verhält er sich in dieser Beziehung noch günstiger als Kupfer.

Wenn man einfachheitshalber annimmt, dass sich der ganze Kurzschlußstrom in Wärme umsetzt, ergibt sich [7]:

$$i_k^2 \tau = A^2 k_{th} \quad [\text{A}^2 \text{s}]$$

Hierin bedeuten

- i_k mittlerer, wirksamer Kurzschlußstrom [A]
- τ Dauer des Kurzschlußstromes [s]
- A Leiterquerschnitt [mm^2]
- k_{th} spezifische thermische Festigkeit [$\text{A}^2 \text{s/mm}^4$]

Die Bedingung für die thermische Sicherheit eines Leiters ist dann erfüllt, wenn

$$A \geq \sqrt{\frac{i_k^2 \tau}{k_{th}}} \quad [\text{mm}^2] \quad (1)$$

Unter Zugrundelegung einer maximal zulässigen Betriebstemperatur von $\vartheta_n = +65^\circ\text{C}$ und der Grenztemperaturen ϑ_1 in Tabelle XV lassen sich die in Tabelle XVI wiedergegebenen Werte von k_{th} [$\text{kA}^2 \text{s/mm}^4$] berechnen.

Grenztemperaturen ϑ_1 verschiedener Leitermaterialien

Tabelle XV

Leitermaterial	Grenztemperaturen bei einer Kurzschlussdauer von		
	1 s °C	3 s °C	5 s °C
Kupfer	170	165	160
Aluminium	200	190	180
Anticorodal A	250	220	200
Anticorodal B	250	220	200

Spezifische thermische Festigkeit k_{th}

Tabelle XVI

Leitermaterial	k_{th} bei einer Kurzschlussdauer von		
	1 s	3 s	5 s
Kupfer	0,0148	0,0142	0,0137
Aluminium	0,0081	0,0076	0,0071
Anticorodal A	0,0076	0,0065	0,0058
Anticorodal B	0,0080	0,0069	0,0062

Nimmt man $i_k = 1 \text{ kA}$, so erhält man aus Gl. (1) Einheitsquerschnitte gemäss Tabelle XVII.

Einheitsquerschnitte bei einem Kurzschlußstrom $i_k = 1 \text{ kA}$

Tabelle XVII

Leitermaterial	Einheitsquerschnitte bei einer Kurzschlussdauer von		
	1 s mm^2	3 s mm^2	5 s mm^2
Kupfer	8,21	14,52	19,17
Aluminium	10,09	19,84	26,54
Anticorodal A	11,50	21,44	29,38
Anticorodal B	11,16	20,80	28,48

Durch Vergleich der Aluminium- und Anticorodal-Einheitsquerschnitte mit denjenigen aus Kupfer ergeben sich die in Tabelle XVIII angegebenen Verhältniszahlen.

Vergleich von Aluminium- bzw. Anticorodal A und B mit Kupfer in bezug auf die Einheitsquerschnitte

Tabelle XVIII

Vergleich	Verhältnis der Einheitsquerschnitte bei einer Kurzschlussdauer von		
	1 s	3 s	5 s
Al : Cu	1,35	1,37	1,38
Ac A : Cu	1,40	1,48	1,53
Ac B : Cu	1,36	1,43	1,49

Alle diese Verhältniszahlen sind kleiner als diejenigen die aus dem Vergleich der spezifischen Widerstände hervorgehen, nämlich:

Aluminium: Kupfer 1,58
 Anticorodal A: Kupfer 2,24
 Anticorodal B: Kupfer 2,07

Aus diesen Darlegungen folgt im Hinblick auf die «thermische Festigkeit», dass:

a) Aluminium- und Anticorodal-Querschnitte kleiner als elektrisch gleichwertige Kupferquerschnitte gewählt werden könnten;

b) Sämtliche dem Kupfer widerstandsgleiche Aluminium- und Anticorodal-Querschnitte die in Gl. (1) festgelegte Bedingung erfüllen;

c) Die elektrisch gleichwertigen Aluminium- und Anticorodal-Querschnitte gegenüber denjenigen aus Kupfer eine thermische Sicherheit gemäss Tabelle XIX bieten;

Thermische Sicherheit von elektrisch gleichwertigen Querschnitten

Tabelle XIX

Leitermaterial	Thermische Sicherheit bei einer Kurzschlussdauer von		
	1 s	3 s	5 s
Aluminium	1,17	1,16	1,14
Anticorodal A	1,60	1,52	1,46
Anticorodal B	1,52	1,45	1,37

d) Die widerstandsgleichen Anticorodal-Querschnitte gegenüber denjenigen aus Aluminium eine höhere Sicherheit gemäss Tabelle XX aufweisen.

Thermische Sicherheit elektrisch gleichwertiger Querschnitte von Anticorodal zu Aluminium

Tabelle XX

Leitermaterial	Thermische Sicherheit bei einer Kurzschlussdauer von		
	1 s	3 s	5 s
Anticorodal A	1,37	1,31	1,28
Anticorodal B	1,30	1,25	1,20

Die Sicherheit gegen Lichtbogen ist bei Aluminium trotz seines niedrigeren Schmelzpunktes mindestens gleich gross wie bei Kupfer, da seine spezifische Wärme und Schmelzwärme wesentlich grösser sind. Auftretende Lichtbogen breiten sich bei Aluminium weniger aus und löschen schneller, weil die entstehenden Verbrennungsrückstände im Gegensatz zu Kupfer geringer und nicht leitend sind. Bei Kupfer bildet sich oft auf den Isolatoren ein leitender Belag von Kupferoxyd, der wegen seiner Leit-

fähigkeit sorgfältig entfernt werden muss. Da Aluminiumoxyd elektrisch nicht leitet, kann der Unterbruch des Betriebes für Reparaturen nach Lichtbogenschäden beträchtlich verkürzt werden.

7. Mechanische Festigkeit

Berücksichtigt man nur den Einfluss des Eigengewichtes auf die Festigkeit, so betragen die Biegebeanspruchung von Aluminium 24% und die elastische Durchbiegung 37% derjenigen des Kupfers. Bei gleichem Sicherheitsgrad ergibt jedoch das Verhältnis der Biegebeanspruchungen von zwei widerstandsgleichen Schienen 1 : 1.

Hohe Beanspruchungen können durch elektromagnetische Kräfte bei Kurzschlüssen auftreten. Auch bei Einwirkung äusserer Kräfte werden Aluminiumschienen, infolge ihres grösseren Querschnittes, also ihres höheren Trägheitsmomentes, weniger beansprucht als widerstandsgleiche Kupferschienen, vorausgesetzt, dass man Schienen gleicher Härtequalität vergleicht. Die Ausbiegungen rechteckiger oder runder Querschnitte verhalten sich dabei etwa wie 0,75 : 1.

Dank den dargestellten Verhältnissen betreffend Erwärmung und mechanischer Beanspruchung, können die Isolatorenabstände bei Aluminiumschienen, Qualität halbhart, gleich wie bei Kupferschienen gewählt werden. Für Pressqualität, gestreckt, muss man der geringeren Zugfestigkeit und tieferen Streckgrenze Rechnung tragen.

8. Beständigkeit gegen atmosphärische und chemische Einflüsse

Reinaluminium 99,5% und Anticorodal A und B besitzen eine hohe Beständigkeit gegen Einflüsse der Atmosphäre inklusive der Meerluft, da sie sich an der Luft sofort mit einer dünnen, aber sehr dichten, widerstandsfähigen Schicht von Aluminiumoxyd überziehen. Unter normalen Umständen sind deshalb spezielle Schutzmassnahmen nicht notwendig.

Reinaluminium zeigt ebenfalls eine hohe Beständigkeit gegen gewisse chemische Produkte und wird z. B. als Schienenleiter in Akkumulatorkammern mit Vorzug verwendet. Sein Verhalten gegenüber Gasen und aggressiven Dämpfen muss jedoch von Fall zu Fall beurteilt werden.

Bei direktem Kontakt mit einem Schwermetall bildet sich in Anwesenheit von Feuchtigkeit ein galvanisches Element, wobei das Aluminium angegriffen werden kann. Einzig Zink und Cadmium machen eine Ausnahme, weshalb einwandfrei verzinkte oder cadmierte Armaturen aus Schwermetallen für die Montage zulässig sind. In vielen Fällen stellt die Verwendung von Armaturen aus Anticorodal die einfachste und sicherste Lösung dar.

Müssen leitende Verbindungen von Aluminium mit Kupfer oder Bronze im Freien oder an feuchten Orten hergestellt werden, so sind besondere Massnahmen zu treffen.

9. Bearbeitung und Montage

Aluminiumschienen wiegen nur die Hälfte von elektrisch widerstandsgleichen Kupferschienen, was

sich beim Transport und bei der Montage sowie beim Bau von Tragkonstruktionen, die in leichterer Bauweise ausgeführt werden können, günstig auswirkt.

Die Bearbeitung von Aluminium kann mit den üblichen Werkzeugen erfolgen, die jedoch ausschliesslich für diesen Zweck zu verwenden sind, um zu verhüten, dass die Aluminiumoberfläche durch Späne anderer Metalle verunreinigt wird, was zu lokalen Korrosionen führen könnte.

Die Profile aus Reinaluminium und Anticorodal A lassen sich leicht kalt biegen. Der minimale innere Biegeradius, mit oder ohne Verwendung von Formen oder Einlagen zum Biegen, entspricht einer

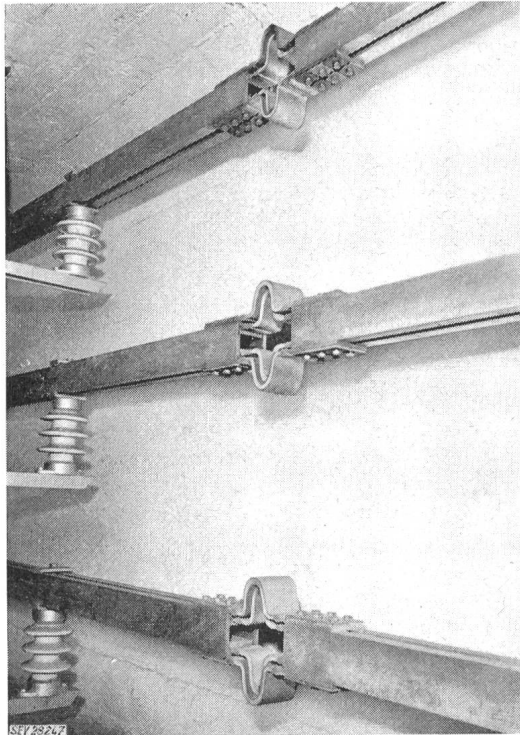


Fig. 7

Verschraubte Dilationsstücke an zusammengesetzten U-Stromschienen
90 × 36 × 10 mm, 3200 A, Leitungslänge etwa 600 m

2,5fachen Höhe des Profilsteiges oder -flansches, um welche die Biegung erfolgen soll. Dagegen ist Anticorodal B für solche Biegearbeiten ungeeignet.

In Sonderfällen kann das Biegen von Aluminiumprofilen durch Erwärmen der Biegestelle erleichtert und der Biegeradius kleiner gehalten werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass an den erwärmten Stellen die Festigkeit des Aluminiums auf diejenige der Qualität «weich» abfällt. Infolgedessen soll bei Anticorodal A und B das Erwärmen zum Biegen unterlassen werden, da bei diesem Material an erwärmten Stellen die mechanischen Eigenschaften stark vermindert werden.

Bei langen Schienenleitungen soll der Einfluss starker Temperaturänderungen durch Anordnung von elastischem Spiel an den Enden oder durch Einbau von Dilationsstücken ausgeglichen werden. Diese können sowohl aus zu verschraubenden als auch vorzugsweise aus zusammenschweisenden Teilen bestehen. Das elastische Element ist aus 0,3...0,5 mm dicken Lamellen aus halbhartem oder

besser aus hartgezogenem Aluminium gebildet. Typische Beispiele von eingebauten Dilationsstücken sind in den Fig. 7, 8 und 9 dargestellt.

Beim Verlegen im Freien oder in feuchten Räumen ist darauf zu achten, dass bei Vorhandensein

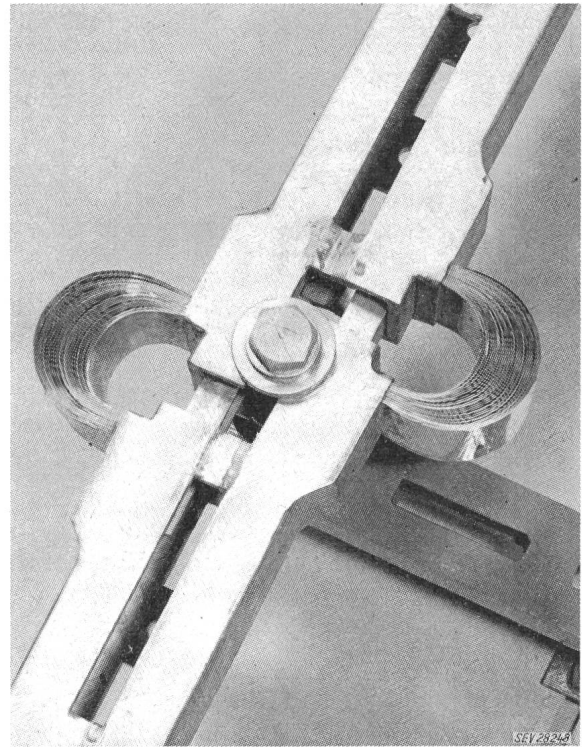


Fig. 8

Halbrunde Dilationsstücke an zusammengesetzten U-Stromschienen
120 × 50 × 12 mm, angeschweisst, 6000 A,
Kurzschlußstrom 160 kA (Scheitelwert)

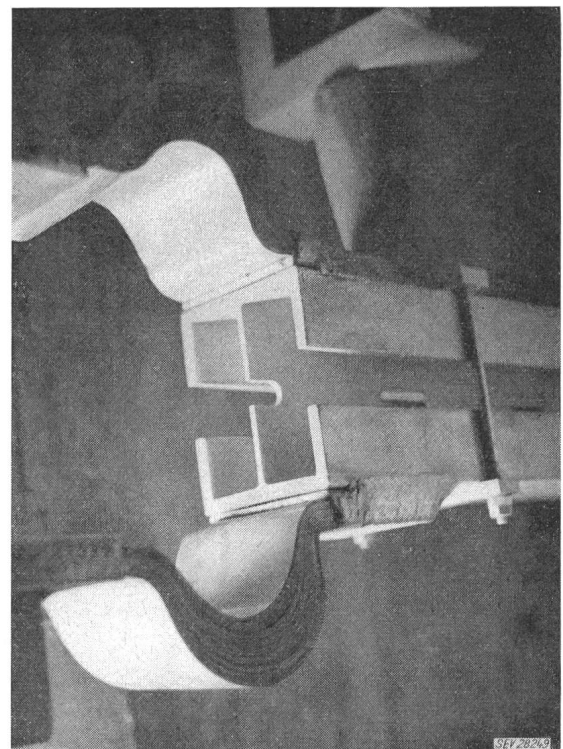


Fig. 9

Halbrunde Dilationsstücke an «Doppel-T»-Stromschienen
140 × 64 × 12 mm, angeschweisst, 4700 A,
Kurzschlußstrom 90 kA (Scheitelwert)

von Kupfer, Messing, Bronze usw. Wasser nur in der Richtung vom Aluminium zu diesen Metallen fliesst, um eine besonders gefährliche Korrosionsursache zu verhüten. Ausserdem müssen unzugängliche Spalten und Winkel, aus welchen das Wasser nicht abfliessen kann, vermieden oder durch geeignete Anstriche, wie neutral reagierende bituminöse Farben und Lacke, Zinkchromatanstriche oder Kunstharzlacke geschützt werden.

10. Anschlüsse und Verbindungen

10.1 Nicht lösbare Verbindungen

Wenn irgendwie möglich sind die Anschlüsse zu schweissen. Argonarc-, Sigma- und ähnliche Schweißungen, welche keine Flussmittel benötigen, sind der Autogenschweißung vorzuziehen. Sie stellen die einfachste, billigste und zuverlässigste Verbindungsart dar. Bei kaltverfestigten Schienen geht jedoch die Festigkeit in der Schweißnaht auf diejenige der Qualität «weich» zurück.

10.2 Lösbare Verbindungen

Ist das Schweißen nicht möglich oder sind lösbare Verbindungen notwendig, so werden Überlappungsverbindungen benützt unter Verwendung von passenden Laschen, vorzugsweise Doppel-laschen. Hierzu müssen die Kontaktflächen eben, gleichmässig aufgeraut und sauber sein, indem Schmutz, eingetrocknetes Fett und Oxyde mit einer Stahlbürste oder einer groben Feile entfernt werden. Schnittkanten und Hochränder sind zu entgraten. Die Kontaktflächen werden dann unmittelbar leicht und gleichmässig mit alkali- und säurefreier Vaseline bestrichen. Daraufhin wird die Verbindung verschraubt, wobei die eingefetteten Flächen nicht berührt werden dürfen. Der Anpressdruck beträgt etwa 1 kg/A. Die Preßschrauben sollen aus verzinktem Stahl oder aus hochwertigen kupferfreien Aluminiumlegierungen bestehen (z. B. Anticorodal B). Diese werden anodisch oxydiert. Spannscheiben sind bei Verwendung von Schrauben aus Stahl unerlässlich, bei solchen aus Leichtmetall jedoch nicht unbedingt notwendig. Leichtmetall-Schrauben bieten übrigens den Vorteil, nicht magnetisch zu sein, und weisen in ungünstiger Atmosphäre ein besseres Verhalten auf. Zur gleichmässigeren Lastverteilung sind bei Schraubenverbindungen auf alle Fälle grosse und kräftige Unterlagsscheiben zu empfehlen.

Jeder direkte Kontakt mit anderen blanken Metallen ist zu vermeiden, da Korrosionen immer möglich sind. Es empfiehlt sich, das Eindringen von Feuchtigkeit in die Kontaktflächen durch geeignete Anstriche (Asphalt- und Kunstharzlacke) oder durch Auskitten der Trennfugen zu verhindern.

11. Aluminium-Kupfer-Verbindungen

11.1 Nicht lösbare Verbindungen

Das Schweißen zwischen Kupfer und Aluminium ist im allgemeinen nicht möglich. Erst neuerdings ist ein Abbrennstumpfschweißverfahren entwickelt worden, das gestattet, in der Werkstatt, mit einer Spezialmaschine, Aluminium-Kupfer-Zwischenstücke anzufertigen, die dann am Montageplatz leicht an

den Aluminium- bzw. Kupferschienen angeschweisst werden können.

Weich- und Hartlötten von Al-Cu-Verbindungen ist durchaus möglich. Bei Feuchtigkeit aber benötigt die gesamte Lötstelle einen zuverlässigen Schutz, da infolge verschiedener elektrochemischer Spannungen eine Korrosionsgefahr besteht. Bei grösseren Querschnitten kann ein genügender Stromübergang durch Lötten nicht gesichert werden.

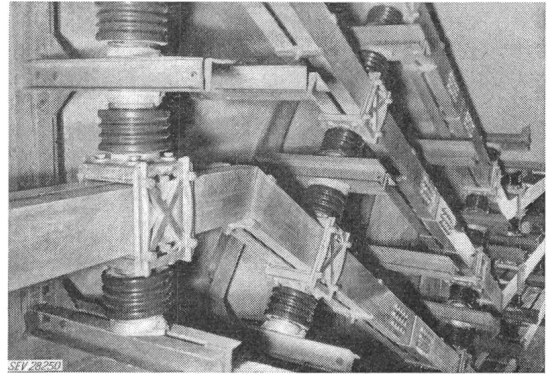


Fig. 10

Beispiel von zusammengesetzten U-Stromschienen
2 (160 × 80 × 8 mm), 4000 A, 10,5 kV

11.2 Lösbare Verbindungen

In trockenen und säurefreien Räumen für die Erstellung von lösbaren Verbindungen sind keine besondere Vorsichtsmassnahmen zu treffen; es gelten auch die gleichen Vorschriften wie für Verbindungen von Aluminium mit Aluminium. Im Freien und in feuchten Räumen sind aber besondere Vorkehrungen zu treffen, um die Gefahr von Kontaktkorrosionen zu vermeiden. Es bestehen dafür zwei prinzipielle Möglichkeiten:

a) Berührungsstelle beider Metalle gegen Zutritt von Feuchtigkeit abdichten:

- α) Trennfugen äusserlich mit teerfreiem Asphalt oder Bakelitkitt auskitten, oder Kontaktstellen durch Farbanstrich, eventuell zusätzlich mit Isolierband zu schützen;
- β) Geeignetes bimetallisches Verbindungsstück einbauen, an welchem die Übergangsstelle Aluminium—Kupfer zuverlässig und einfach gegen Feuchtigkeit geschützt werden kann.

b) Die Konstruktion so zu gestalten, dass die Gefahr einer Kontaktkorrosion an Stellen mit Materialüberschuss verlegt wird.

Im übrigen gelten für lösbare Verbindungen die Vorschriften für Verbindungen von Aluminium mit Aluminium, wobei die wichtigsten Anforderungen:

- sorgfältige Vorbereitung und Fettung der Aluminiumoberfläche,
- Sicherung eines genügenden Anpressdruckes, Beschränkung des Oberflächendruckes auf das Aluminium,
- Anordnen von elastischen Zwischengliedern zuverlässig erfüllt werden müssen.

Unterlagsscheiben, Schrauben und Druckplatten aus Stahl müssen feuerverzinkt oder cadmiert sein;

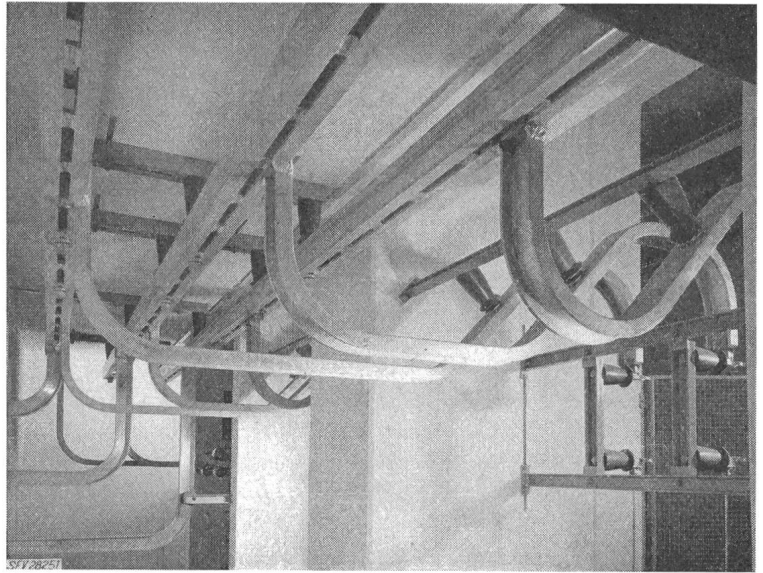
nur wenn sie nicht in Kontakt mit Kupferschienen kommen, können sie aus Anticorodal sein.

Man muss vermeiden, dass Wasser von Kupfer auf das Aluminium tropft oder fliesst. Aluminium-Kupfer-Kontakte sind prinzipiell an solchen Stellen anzuordnen, wo ein Schutz gegen dauernde Feuchtigkeit leichter herzustellen ist.

Fig. 10...12 zeigen einige Ausführungen von Al-Stromschienen.

Fig. 11

Beispiel von zusammengesetzten U-Stromschienen, mit eingeschweissten Aluminium-Distanzstücken
2 (120 × 50 × 12 mm), 6000 A,
Kurzschlußstrom 160 kA



12. Schlussfolgerungen

Die vielen Vorteile bei Anwendung von Aluminium im Bau von Stromschienen brauchen nicht mehr bewiesen zu werden. Nur zu grosse Preisdiffe-

renzen, nicht aber betriebstechnische Gründe, könnten die Anwendung von Aluminium in Frage stellen.

Während sich Flachschielen, Rundprofile und Rohre für kleine und mittlere Ströme (bis etwa 1000 A) eignen, sind U-, L- und besonders Doppel-T-Profile für hohe Stromstärken zu bevorzugen, hauptsächlich dort, wo man mit starken Kurzschlußströmen, also mit hohen dynamischen Kräften zu rechnen hat.

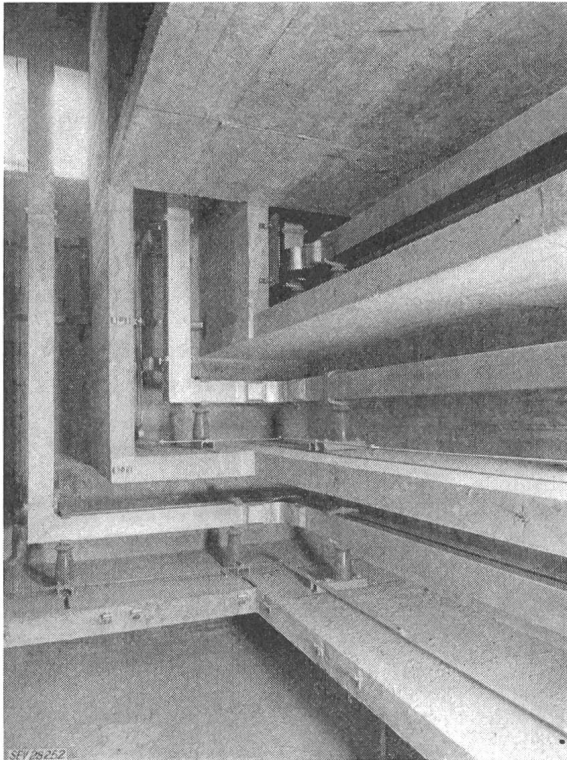


Fig. 12

Beispiel von «Doppel-T-Schienen»
140 × 64 × 12 mm, 4700 A, Kurzschlußstrom 90 kA

Literatur

- [1] Dassetto, G.: Aluminium in Schalt- und Verteilanlagen. Aluminium Suisse Bd. 4(1954), Nr. 2, S. 38...55.
- [2] Dassetto, G.: Stromschienen aus Aluminiumprofilen. Aluminium Suisse Bd. 6(1956), Nr. 5, S. 161...173.
- [3] Schiller, H. und E. Eichenberger: Sammelschienen aus einem Aluminium-Profil im Kraftwerk Rothenbrunnen der Kraftwerke Zervreila A.-G. Bull. SEV Bd. 49(1958), Nr. 24, S. 1145...1149.
- [4] Rols, R.: Les jeux de barres en profilés dans les installations de première et deuxième catégories. Rev. Aluminium Bd. 31(1954), Nr. 212, S. 225...230; Nr. 213, S. 263...273; Nr. 214, S. 307...313; Nr. 215, S. 353...365.
- [5] Chapoulié, P.: Formule et abaque pour la détermination des intensités admissibles dans les barres, tubes et profilés en aluminium et alliages d'aluminium. Rev. Aluminium Bd. 26(1949), Nr. 156, S. 206...208.
- [6] Dassetto, G.: Sbarre di connessione in alluminio. Elettificazione Bd. 8(1957), Nr. 6, S. 326...336; Nr. 7, S. 367...377.
- [7] Dassetto, G.: Spezifische thermische Festigkeit elektrischer Leiter. Bull. SEV Bd. 50(1959), Nr. 6, S. 239...241.
Rols, R.: L'évolution de la technique des jeux de barres. Rev. Aluminium Bd. 30(1953), Nr. 199, S. 175...181; Nr. 201, S. 277...284.
Chapoulié, P. und R. Rols: Intensités admissibles dans les barres et profilés en aluminium et alliages d'aluminium. Rev. Aluminium Bd. 35(1958), Nr. 250, S. 87...95.
Souriou, G.: Utilisation des tubes en aluminium et alliages d'aluminium dans les jeux de barres des postes extérieures de transformation. Rev. Aluminium Bd. 35(1958), Nr. 258, S. 1017...1026.

Adresse des Autors:

G. Dassetto, dipl. Ingenieur, Aluminium-Industrie AG, Feldeggstrasse 4, Zürich 8.