

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 38 (1947)
Heft: 3

Artikel: Die Belastbarkeit von Freileitungen mit Rücksicht auf höchstzulässige Leitertemperaturen
Autor: Ludwig, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061405>

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: 11.01.2026

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:

Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telefon 23 77 44
Postcheckkonto VIII 8481

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

38. Jahrgang

Nr. 3

Samstag, 8. Februar 1947

Die Belastbarkeit von Freileitungen mit Rücksicht auf höchstzulässige Leitertemperaturen

Von H. Ludwig, Innertkirchen *)

621.315.1.016.3

Die ausserordentliche Zunahme des elektrischen Energieverbrauches in Industrie, Gewerbe und Haushalt als Folge des allgemeinen Brennstoffmangels sowie der ausgedehnten Anwendung der elektrischen Raumheizung stellt an die Uebertragungs- und Verteilungen unserer Energieversorgungsanlagen sehr hohe Anforderungen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit. Infolge Materialknappheit konnte die nötige Verstärkung der Leitungsanlagen mit der zunehmenden Netzbelastung nicht überall Schritt halten, was zur Folge hatte, dass einerseits die Spannungsverhältnisse an den Abnahmestellen ungünstig beeinflusst und andererseits die Leitungen thermisch hoch beansprucht werden. Während ein abnormal hoher Spannungsabfall hauptsächlich Nachteile betriebstechnischer Art mit sich bringt, die jedoch nur vorübergehender Natur sind, können unzulässig hohe Strombelastungen das Leitermaterial derart beeinflussen, dass dieses eine dauernde Schädigung erfährt, die unter Umständen zu Betriebsstörungen führen kann.

Da über die zulässige Belastbarkeit von Freileitungen in der technischen Literatur nur wenige und unvollständige, zum Teil sogar unrichtige Angaben zu finden sind, hat der Verfasser versucht, auf Grund experimentell aufgenommener Werte allgemein gültige Belastungskurven aufzustellen, die es dem Betriebsleiter ermöglichen sollen, für alle praktisch vorkommenden Leitermaterialien, Leiterquerschnitte und Umgebungstemperaturen die entsprechenden zulässigen Maximalstromstärken direkt abzulesen. Nach einem geschichtlichen Ueberblick und einer kurzen theoretischen Betrachtung der Erwärmungsprobleme wird die Entstehung und der Gebrauch von Kurventafeln erläutert. An einigen Beispielen wird ferner der grosse Einfluss der Umgebungstemperatur auf die zulässige Uebertragungsleistung gezeigt, was für eine optimale Ausnützung der Leitungsanlagen speziell im Winter, d. h. gerade dann, wenn die grössten Belastungsspitzen auftreten, von allgemeiner Bedeutung sein dürfte.

1. Geschichtliches

Die Bemühungen, den Zusammenhang zwischen der durch einen frei gespannten Draht fliessenden Stromstärke und der dabei auftretenden Ubertemperatur (Erwärmung über die Umgebungstemperatur) experimentell und theoretisch zu erfassen, sind schon beinahe hundert Jahre alt. Müller [1]¹⁾ befasste sich bereits im Jahre 1849 mit experimentellen Untersuchungen «Ueber das Glühen von Metalldrähten durch den galvanischen Strom» und Zöllner [1] im Jahre 1859 mit Versuchen «Ueber die Lichtentwicklung in galvanisch glühenden Platin-

L'augmentation extraordinaire de la consommation d'énergie électrique dans l'industrie, l'artisanat, le commerce et les ménages, résultant de la pénurie de combustibles, ainsi que l'emploi de plus en plus fréquent de l'électricité pour le chauffage des locaux, posent aux lignes de transport et de distribution de nos entreprises électriques des exigences de plus en plus sévères. En raison de la pénurie de matériel, ces lignes n'ont pas toujours pu être renforcées comme l'exigeait l'accroissement de la charge des réseaux. Les conditions de la tension aux installations des abonnés sont devenues de ce fait moins bonnes et les lignes subissent de fortes sollicitations thermiques. Tandis qu'une chute de tension exagérée donne surtout lieu à des inconvénients d'exploitation, qui ne sont toutefois que passagers, des intensités de courant trop élevées risquent d'endommager en permanence le matériel des lignes et de provoquer des perturbations.

La littérature technique ne renferme, au sujet de la charge admissible des lignes aériennes, que de rares et incomplètes indications, qui sont même parfois erronées. Afin de combler cette lacune, M. Ludwig a tenté, sur la base de valeurs relevées expérimentalement, d'établir des courbes de charge valables d'une façon générale et permettant aux chefs d'exploitation d'obtenir directement les intensités maxima admissibles pour tout le matériel de lignes, toutes les sections de conducteurs et toutes les températures ambiantes qui peuvent pratiquement se présenter. Après un bref aperçu historique et l'exposé théorique des problèmes d'échauffement, l'auteur explique comment les diagrammes ont été établis et quelle est la manière de les utiliser. Avec quelques exemples à l'appui, il montre en outre combien grande est l'influence de la température ambiante sur la puissance admissible que peuvent supporter les lignes et qui est d'une importance essentielle pour une utilisation optimum des installations de transport d'énergie et de distribution, notamment en hiver, à l'époque des pointes de charge maxima.

drähten». Beide Forscher experimentierten dabei mit sehr dünnen Drähten ($d < 1$ mm), wobei sie zwischen Belastungsstrom I und Drahtdurchmesser d die einfache Beziehung $I = C d$ fanden. Für dicke Drähte stimmte dieses Gesetz jedoch nicht mehr, und um den Widerspruch zwischen den theoretischen und den experimentellen Ergebnissen zu überbrücken, stellten sie die modifizierte Formel $I = C d^{3/2}$ auf, welche der im Jahre 1896 vom VDE herausgegebenen Belastungstabelle als Grundlage diente. Eine ausführliche Gleichung über die Beziehung zwischen Ubertemperatur, Stromstärke, Drahtdurchmesser, spez. Widerstand und spez. Wärmeabgabe stellte Dorn [1] im offiziellen Bericht der internationalen Elektrizitätsausstellung in München

*) Eingang des Manuskriptes: 10. 12. 45.

1) s. Literaturverzeichnis am Schluss.

1882, «Ueber die Erwärmung eines blanken, in freier Luft ausgespannten Drahtes durch den Strom», auf. Auf die Brauchbarkeit dieser Formel werden wir später noch zurückkommen. Auch in andern Ländern wurde dieses Thema von verschiedenen Forschern theoretisch und experimentell behandelt, wobei die Erwärmungsversuche ebenfalls fast ausschliesslich an sehr dünnen Drähten vorgenommen wurden. Dabei zeigte sich erneut, dass sich die praktischen Ergebnisse mit den theoretischen Ueberlegungen und Erkenntnissen nicht ohne weiteres in Einklang bringen liessen, so dass zu Anfang dieses Jahrhunderts, als die Elektrizitätsindustrie bereits in mächtiger Entwicklung stand, über die zulässige Belastbarkeit von elektrischen Leitungen noch grosse Unklarheit herrschte.

Im Jahre 1905 erschien dann ein grundlegendes Werk von *Teichmüller* [1], das die Ergebnisse aller bisherigen Untersuchungen zusammenfasste und einer allgemeinen Kritik unterzog, wobei der Verfasser speziell auf den Wert praktischer Versuche, namentlich auch an Leitern mit mittleren und grossen Querschnitten, hinwies. Solche Erwärmungsversuche führten dann *Teichmüller* und *Humann* in grösserem Maßstabe durch und veröffentlichten die gewonnenen Ergebnisse im Jahre 1907 [2]. Die Versuche von *Teichmüller* und *Humann* erstreckten sich sowohl auf isolierte, als auch auf blanke Drähte und verseilte Leiter aus Kupfer, wobei sich die Beziehung $I^2 = \Delta t (C_1 d^2 + C_2 d^3)$ als allgemein brauchbar erwies. Für die Konstanten C_1 und C_2 fanden *Teichmüller* und *Humann* aus einer grossen Zahl von Versuchsreihen für blanke Leitungen die Werte 3,1 und 1,2 und stellten für alle Normalquerschnitte eine Belastungstabelle, gültig für eine Uebertemperatur von $\Delta t = 10^\circ \text{C}$, auf. Bei diesen Versuchen wurde auch der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Leitertemperatur experimentell festgestellt, sowie die Tatsache, dass bei gleicher Strombelastung blanke Leiter eine höhere Temperatur annehmen als isolierte.

Während die höchstzulässige Temperatur für isolierte Leitungen mit Rücksicht auf die thermischen Eigenschaften des Isoliermaterials, das durch die Erwärmung keine Veränderung erfahren und zu keinen Brandschäden Anlass geben darf, begrenzt ist, fällt diese Einschränkung bei blank verlegten Freileitungen weg. Man war deshalb allgemein der Auffassung, dass nackte Freileitungen thermisch höher belastet werden dürfen als isolierte Leitungen, da bei jenen keine Feuergefahr zu befürchten sei, und dass durch den Wind die Leitertemperatur ohnehin herabgesetzt werde. Ueber die Höhe der höchstzulässigen Stromstärke bzw. Temperatur herrschte allerdings keine einheitliche Auffassung, und mit Ausnahme der französischen Vorschriften waren in denjenigen der übrigen Länder keine besonderen Bestimmungen über die zulässige Belastbarkeit von Freileitungen enthalten. In Amerika und Canada wurden im Jahre 1930 eingehende Untersuchungen über die zulässige Strombelastung von Aluminiumleitern mit Stahlseele durchgeführt. Die nach einer Formel von *Luke*, sowie *Schurig* und *Frick* berechneten und im

Carnegie Institute of Technology experimentell nachgeprüften Belastungswerte bei ruhender Luft sind in einer Kurventafel für verschiedene Querschnitte von ACSR (Aluminium-Cable-Steel-Reinforced) veröffentlicht worden [7].

In der Schweiz wurden erstmals in den Leitsätzen für Aluminium-Regelleitungen [3] Angaben über zulässige Dauerbelastungen von Aluminium- und Aldrey-Freileitungen gemacht. Die dort angegebenen Werte, gültig für windstille Verhältnisse, wurden teilweise nach dem Werk «Aluminium-Freileitungen» [4] aufgestellt. Eine auf Grund der folgenden Untersuchungen über die gesetzmässige Beziehung zwischen Belastung und Uebertemperatur angestellte Nachprüfung hat jedoch ergeben, dass die in dieser Tabelle für «ruhende» Luft angeführten Dauerstromstärken von Al-Leitungen um 10...20 % und von Ad-Leitungen um 15...25 % zu hoch angesetzt sind. Diese Belastungswerte können aber für Freileitungen ohne Bedenken angewendet werden, da im Freien stets mit «bewegter» Luft zu rechnen ist. Bei einer minimalen Windstärke von 0,5...0,6 m/s dürfen die Leitungen, wie später noch gezeigt wird, bis zu 25 % höher belastet werden als bei «ruhender» Luft, so dass die Tabelle für die erwähnten Windverhältnisse ohne weiteres gültig ist.

Zwecks Feststellung der für Freileitungen höchstzulässigen Temperaturen stellten *von Zeerleder* und *Bourgeois* (AIAG Neuhausen) Dauererwärmungsversuche an [5], wobei sie hartgezogene Drähte aus Kupfer, Aluminium und Aldrey während mehreren Monaten bis zu einem Jahr Temperaturen von 70...100 °C aussetzten und den dadurch verursachten Festigkeitsrückgang periodisch feststellten. Es zeigte sich dabei die wichtige Tatsache, dass auch verhältnismässig niedrige Temperaturen, die weit unter der «Anlauf»-Temperatur des betreffenden Materials liegen, eine wesentliche Verschlechterung der Festigkeitseigenschaften zur Folge haben können, wenn sie lange genug — auch intermittierend — auf den Leiter einwirken. Den grössten prozentualen Festigkeitsrückgang zeigte bei gleicher Temperatur und gleicher Versuchsdauer Kupfer, während sich Reinaluminium- und namentlich Aldreydrähte wesentlich günstiger verhielten. Ferner führten die gleichen Autoren an verschiedenen Freileitungsseilen aus Kupfer, Aluminium, Stahlaluminium und Aldrey Belastungsversuche durch, wobei sie die Temperaturerhöhung bei verschiedenen Stromstärken feststellten und die gewonnenen Resultate tabellarisch und graphisch darstellten.

Schliesslich sind noch die von *Frick* [6] veröffentlichten Tabellen und Kurventafeln zu erwähnen, in welchen die Belastbarkeit von horizontal ausgespannten Drähten und verseilten Leitern aus Kupfer von 50...1000 mm² Querschnitt bei 40 °C konstanter Raumtemperatur und Uebertemperaturen von 10 bis 60 °C in Intervallen von 10 zu 10° angegeben werden. Die Angaben stützen sich auf die im Laboratorium der GEC durchgeführten systematischen Erwärmungsversuche, welche von *Schurig* und *Frick* an massiven, verseilten und hohlen Leitern durchgeführt wurden [7]. Diese Versuchsergebnisse ermöglichen, eine einfache Gesetzmässigkeit zwischen Strom-

belastung und Uebertemperatur abzuleiten und auf beliebige andere Leitermaterialien und Temperaturverhältnisse, welche für Freileitungen in Frage kommen, zu übertragen. Da sich auch die Tabellen und Kurven des Berichtes von *Hünerwadel* an das Fachkollegium 7 des Schweiz. Elektrotechnischen Komitees (CES), Aluminium [10], auf die von *Schurig* und *Frick* durchgeführten Messungen stützen, stimmen die im folgenden für Aluminiumleiter aufgestellten Belastungswerte mit den von *Hünerwadel* gegebenen praktisch überein.

2. Einfluss der Versuchs-Anordnungen und -Methoden auf das Resultat von Erwärmungsversuchen

Vergleicht man die bisher bekannten Veröffentlichungen über die Erwärmung von blanken Leitern, so findet man mehr oder weniger grosse Abweichungen zwischen den verschiedenen Versuchsergebnissen. Diese sind zum Teil darauf zurückzuführen, dass die Versuchsgrundlagen nicht die gleichen waren, weshalb die Resultate zuerst auf die gleiche Basis umgerechnet werden müssen, um einen qualitativen Vergleich anstellen zu können. Sehr oft fehlen jedoch die nötigen Angaben über die Versuchsbedingungen, insbesondere bei älteren Veröffentlichungen, so dass Vergleiche mit andern Arbeiten erschwert oder verunmöglicht werden. Es sollen deshalb die wichtigsten Faktoren, welche auf das Resultat von Erwärmungsversuchen von Einfluss sind, kurz besprochen werden.

a) Grösse des Versuchsraumes

Da die Durchführung von Erwärmungsversuchen im Freien auf grosse Schwierigkeiten stösst, weil der geringste Luftzug die Messresultate stark beeinflusst, werden solche Versuche in der Regel in geschlossenen Räumen ausgeführt. Um dabei möglichst einwandfreie Ergebnisse zu erzielen, ist es nötig, dass der Versuchsraum genügend gross ist, um eine während der Versuchsdauer konstante Raumtemperatur aufrechterhalten zu können. Es ist ferner darauf zu achten, dass während der Temperaturmessungen keine Türen oder Fenster geöffnet werden, da durch den entstehenden Luftzug die Leitertemperatur sofort um mehrere Grade zurückgehen kann, was eine Verfälschung der Messresultate zur Folge hat.

b) Anordnung der Versuchsleiter

Die für die Erwärmungsversuche bestimmten Leiter sollen im Raume horizontal ausgespannt werden und so weit von Boden, Decke und Wänden entfernt sein, dass die durch den Strom erzeugte Wärme nach allen Seiten ungehindert entweichen kann. Selbstverständlich ist es unzulässig, den zu prüfenden Leiter auf den Fussboden zu legen, wie es bei schweren Seilen gelegentlich praktiziert wird. Der Versuchsleiter soll so lang gewählt werden, dass der an den Einspannstellen durch Leitung entstehende Wärmeverlust praktisch vernachlässigbar ist. Ferner soll der zu prüfende Leiter so verlegt sein, dass er durch die Wärmeentwicklung des Rück-

leiters nicht beeinflusst wird. Auf Freileitungen sind die Leiter im allgemeinen so weit voneinander entfernt, dass eine gegenseitige Temperaturbeeinflussung praktisch nicht in Betracht kommt.

c) Oberflächenbeschaffenheit der Leiter

Die Oberflächenbeschaffenheit des Leiters hat auf dessen Erwärmung durch den Strom einen gewissen Einfluss, was *Teichmüller* und *Humann* durch vergleichende Versuche an polierten, «gewöhnlichen» und mit Kienruss geschwärzten Drähten nachgewiesen haben. Danach betrug die zulässige Belastung eines 8-mm-Cu-Drahtes für eine Temperaturerhöhung von 10°C

für den polierten Leiter	96 %
für den gewöhnlichen Leiter	100 %
für den geschwärzten Leiter	110 %

Der erste und der dritte Fall stellen Extremwerte dar, mit denen in der Praxis nicht zu rechnen ist, da polierte Leiter schon nach kurzer Zeit durch die Witterungseinflüsse oxydiert werden und russgeschwärzte Leiter in unseren Gegenden nur in Ausnahmefällen vorkommen dürften. In der Regel wird man es mit «gewöhnlichen», d. h. mit mehr oder weniger oxydierten Leiteroberflächen zu tun haben, und die folgenden Belastungstabellen beziehen sich auch auf solche Leiter. Mit zunehmender Schwärzung der Leiteroberfläche geht die Erwärmung bei gleicher Stromstärke allmählich zurück, so dass der thermische Sicherheitsgrad der Leitung mit zunehmendem Alter langsam ansteigt.

Bei vergleichenden Versuchen ist es nötig, dass sich die Leiteroberflächen in gleichartigem Zustande befinden, da sonst Abweichungen entstehen, die das Endresultat u. U. beeinflussen können. Aus den Versuchsbedingungen sollte deshalb stets ersichtlich sein, ob es sich um fabrikneue, d. h. noch blanke, oder aber um gebrauchte, d. h. bereits mehr oder weniger oxydierte Versuchsobjekte handelt.

d) Raumtemperatur

Die während der Messung herrschende Raumtemperatur hat ebenfalls einen Einfluss auf das Ergebnis der Erwärmungsversuche. Wird z. B. der Versuch bei 20°C Raumtemperatur ausgeführt, so nimmt der Leiter bei einer Uebertemperatur von beispielsweise 40°C eine Temperatur von 60°C an, während er sich bei 40°C Raumtemperatur und der gleichen Uebertemperatur auf 80°C erwärmen würde. Im zweiten Fall weist der Leiter einen grösseren spezifischen Widerstand auf, der z. B. bei Kupfer zirka 6,5 % höher ist als im ersten Fall, so dass die Stromstärke entsprechend reduziert werden muss, wenn die Joulesche Wärme konstant bleiben soll. Da für diese das Quadrat der Stromstärke massgebend ist, müsste die Stromstärke somit um rund 3 % reduziert werden. Der Unterschied ist allerdings nicht sehr gross; doch zeigt das Beispiel, dass bei Vergleichsmessungen auch auf gleiche Raumtemperaturen abgestellt werden sollte.

e) Spezifischer Widerstand des Leitermaterials

Obwohl der spezifische Widerstand der gebräuchlichen Leitermaterialien nur innerhalb enger

Grenzen schwankt, ist für Vergleichszwecke die Angabe des spezifischen Widerstandes der verwendeten Leiter bei beispielsweise 20 °C erwünscht. Für die Erwärmung eines Leiters ist allerdings nicht der reine Gleichstromwiderstand allein massgebend, sondern, da es sich in der Regel um Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz handelt, auch der zusätzliche Widerstand durch Skineffekt und bei Aluminiumstahlseilen ausserdem die durch Magnetisierung der Stahlseele bedingte Widerstandserhöhung. Der zusätzliche Widerstand kann durch genügende Unterteilung des Seilquerschnittes und durch sorgfältige Kompensierung der Aluminiumstahlseile (Aufhebung der Durchflutung durch geeignete Drallängen der Al-Drahtlagen im Gegen-schlag) weitgehend reduziert oder praktisch ganz unterdrückt werden.

f) Temperatur-Messmethoden

Während die genaue Messung der Belastungsstromstärke keine Schwierigkeiten bietet, erfordert die Feststellung der effektiven Leitertemperatur besondere Massnahmen und Sorgfalt. Grundsätzlich kann die Temperaturmessung auf verschiedene Arten erfolgen, wobei folgende Messmethoden in Betracht kommen:

A. indirekt

1. mittels Schmelzkörpern von bekanntem Schmelzpunkt
2. aus der Beobachtung des mechanischen Verhaltens des Leiters während der Erwärmung:
 - a) Aenderung des Durchhanges
 - b) Aenderung der Schwingungszahl
3. aus der Widerstandsänderung:
 - a) Ermittlung des Widerstandes aus Strom und Spannung
 - b) Messung des Widerstandes mittels Messbrücke oder Differentialgalvanometer

B. direkt

4. mittels Hg-Thermometer
5. mittels Thermoelementen

Von diesen Messmethoden kommt heute wohl nur noch die letzte in Betracht, weil sie die gesuchte Temperatur einfach und rasch abzulesen gestattet und jede Aenderung praktisch ohne Verzögerung anzeigt. Die Thermoelemente können an beliebigen Stellen des Versuchsleiters angebracht werden, auch im Innern eines verseilten Leiters, so dass die Temperaturverhältnisse genau erfasst und überwacht werden können.

3. Theoretische Betrachtung des Wärmeproblems von elektrischen Freileitungen

Wird ein Leiter mit einer bestimmten Stromstärke belastet, so erhöht sich seine Anfangstemperatur so lange, bis zwischen der durch den Strom zugeführten und der von der Leiteroberfläche abgegebenen Wärmemenge Gleichgewichtszustand herrscht. Die Wärmeabfuhr erfolgt bei blanken Leitungen hauptsächlich durch Konvektion, während die Wärmeabgabe durch Leitung oder Strahlung bei langen Leitungen, die hier behandelt werden, praktisch keine Rolle spielt.

Nach dem Jouleschen Gesetz beträgt die in einem Leiter durch den elektrischen Strom erzeugte Wärmemenge

$$W = 0,24 I^2 R t \text{ cal} \quad (1)$$

wo I den Effektivwert der Stromstärke in Ampere, R den Leiterwiderstand in Ohm und t die Zeitdauer des Stromdurchganges in Sekunden bedeuten.

Unter der Annahme, dass die Wärmeabgabe proportional der Leiteroberfläche, der Temperaturerhöhung über die Umgebung und der Zeitdauer des Stromdurchganges ist (*Dorn*), gilt für den stationären Zustand die Beziehung

$$\Delta t = \frac{0,24 I^2 R}{10 \alpha d \pi} = \frac{0,96 I^2 \varrho}{10 \alpha \pi^2 d^3} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$\text{oder} \quad I = \frac{\pi}{0,31} \sqrt{\frac{\alpha}{\varrho} \Delta t d^3} \quad (3)$$

Hier bedeuten:

Δt die Temperaturerhöhung des Leiters in °C

I die Belastungsstromstärke in A

ϱ den spezifischen Widerstand des Leiters in Ohm pro 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt bei der betreffenden Leitertemperatur

d den Durchmesser des Leiters in mm

α den Koeffizienten der Wärmeabgabe pro 1 mm² Oberfläche in 1 s bei 1 °C Temperaturerhöhung

Für Δt , ϱ und α = konstant ergibt sich aus vorstehender Gleichung (3) die Formel

$$I = C d^{3/2} \quad (4)$$

welche schon von *Müller* und *Zöllner* aufgestellt und benützt wurde, jedoch nur beschränkte Gültigkeit besitzt.

Die Vorausberechnung des zulässigen Belastungsstromes aus den Dimensionen des Leiters nach Formel (3) scheitert daran, dass der Koeffizient der Wärmeabgabe α in Wirklichkeit keine Konstante ist, sondern eine Grösse, die mit zunehmendem Querschnitt bzw. Durchmesser des Leiters ziemlich rasch abnimmt und die auch von der Leiteroberflächenbeschaffenheit und der Leitertemperatur beeinflusst wird. Zur Aufstellung allgemein brauchbarer Belastungs-Tabellen bzw. -Kurven soll deshalb nicht von diesen theoretischen Ueberlegungen, sondern direkt von praktischen Versuchsergebnissen ausgegangen werden, wobei die Resultate der Erwärmungsversuche von *Schurig* und *Frick* [7] und die Ergebnisse anderer Autoren zum Vergleich herangezogen werden.

4. Auswertung von praktischen Versuchsergebnissen und Aufstellung allgemein gültiger Belastungskurven

Untersucht man die Prüfungsergebnisse verschiedener ausgeführter Erwärmungsversuche, so kann man zwischen dem Belastungsstrom I und der bei einer konstanten Umgebungstemperatur t_1 auftretenden Erwärmung (Ubertemperatur) Δt eine Gesetzmässigkeit feststellen, die sich durch die Beziehung

$$I^2 = C \Delta t \text{ oder } \Delta t = \frac{I^2}{C} \text{ oder } C = \frac{I^2}{\Delta t} \quad (5)$$

ausdrücken lässt. Trägt man die für eine bestimmte Ubertemperatur, z. B. $\Delta t = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$, aus Formel (5)

berechnete Konstante C in einem logarithmischen Koordinatensystem als Funktion des Leiterquerschnittes auf, so erhält man eine Gerade, die wir « C -Gerade» benennen wollen. In Fig. 1 sind die C -Geraden für verschiedene Leitermaterialien und Querschnitte aufgetragen, wobei die C -Gerade für

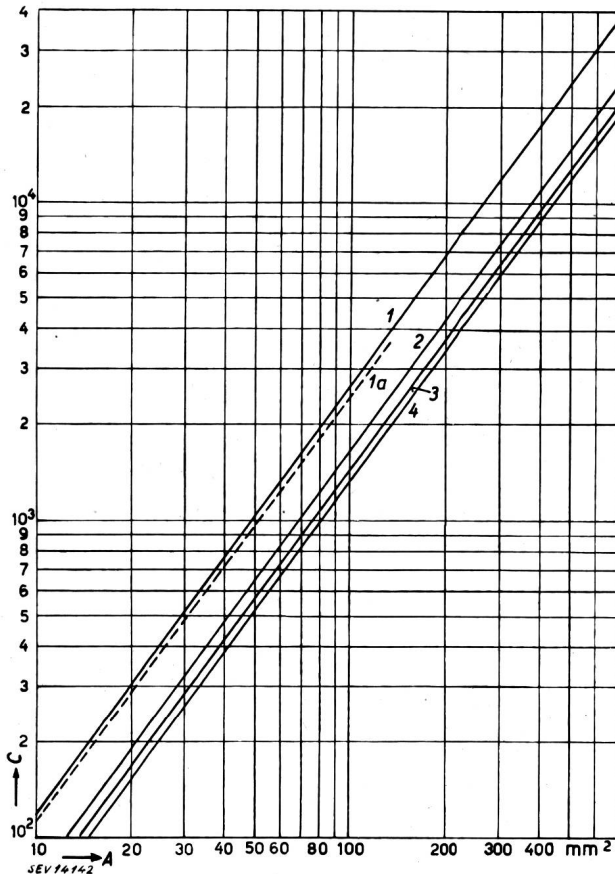


Fig. 1

C -Geraden für verschiedene Leitermaterialien und -querschnitte

$$C = I^2 / \Delta t \text{ für } \Delta t = 40^\circ \text{ C}$$

1 Kupferseil; 1a Kupferdraht; 2 Aluminiumseil; 3 Aldreyseil;
4 Al/St-Seil mit 30 + 7 Drähten; A Leiterquerschnitt;
C Konstante zur Berechnung der zulässigen Belastung.

Kupferseile und Kupferdrähte aus den Versuchen von Schurig und Frick ermittelt und die C -Geraden für Reinaluminium-, Aldrey- und Aluminiumstahlseile im Verhältnis der spez. Leitfähigkeiten, d. h. 57:35,5:31:29, umgerechnet wurden. Der letzte Wert gilt für Al/St-Seile mit 30 + 7 Drähten und bezieht sich auf den vollen Leiterquerschnitt.

Mit Hilfe dieser C -Geraden lässt sich nun für jeden Leiter die zulässige Belastungsstromstärke aus der Beziehung $I = \sqrt{\Delta t C A}$ berechnen. Streng genommen sind die Geraden Fig. 1 nur für $\Delta t = 40^\circ \text{ C}$ gültig, da mit steigender Uebertemperatur der Wert C ebenfalls zunimmt. Bei Querschnitten unter 200 mm^2 kann C jedoch praktisch als konstant betrachtet werden, während bei Querschnitten über 200 mm^2 die steigende Tendenz von C mit zunehmendem Querschnitt immer stärker in Erscheinung tritt. Dies rührt offenbar davon her, dass sich bei höheren Temperaturen des Leiters eine stärkere Luftströmung an der Oberfläche einstellt, welche eine abkühlende Wirkung auf den Leiter ausübt.

Wenn man somit den Berechnungen der zulässigen Belastungsstromstärken die C -Geraden der Fig. 1 zugrunde legt, so erhält man bei höheren Uebertemperaturen etwas kleinere I -Werte als zulässig, so dass für allfällig auftretende Ueberlastungen noch eine gewisse Reserve zur Verfügung steht.

Die Anwendung der Kurventafel Fig. 1 soll an einigen Beispielen erläutert werden.

Gesucht ist die zulässige Belastungsstromstärke verschiedener Leiter unter Annahme einer Uebertemperatur von 40° C .

Nach Gleichung (5) ist

$$I = \sqrt{\Delta t C} = \sqrt{40 C}$$

Der C -Wert für den betreffenden Leiterquerschnitt und das in Betracht kommende Leitermaterial sind der Fig. 1 zu entnehmen.

Beispiel	Leiter	Querschnitt A mm ²	C	I A
1	Cu-Seil	350	14 700	765
2	Cu-Draht	50	980	200
3	Al-Seil	150	2 900	340
4	Ad-Seil	95	1 400	245
5	Al/St-Seil	210	3 700	385

Um die allgemeine Gültigkeit der in Fig. 1 dargestellten C -Geraden zu überprüfen, sollen noch einige andere Messergebnisse von Erwärmungsversuchen zur Kontrolle herangezogen werden.

a) Messungen von Teichmüller und Humann (1907) [2]

Cu-Seil, $A = 500 \text{ mm}^2$, $\Delta t = 29,5^\circ \text{ C}$ I (gemess.) = 835 A
nach Fig. 1: $C = 24\,000$ I (berech.) = 840 A

b) Messungen von Zeerleder und Bourgeois (1929) [5]

Cu-Seil, $A = 34,7 \text{ mm}^2$, $\Delta t = 69^\circ \text{ C}$ I (gemess.) = 210 A
nach Fig. 1: $C = 640$ I (berech.) = 210 A

Cu-Seil, $A = 94 \text{ mm}^2$, $\Delta t = 24,5^\circ \text{ C}$ I (gemess.) = 250 A
nach Fig. 1: $C = 2500$ I (berech.) = 247 A

Al-Seil, $A = 77,6 \text{ mm}^2$, $\Delta t = 14^\circ \text{ C}$ I (gemess.) = 130 A
nach Fig. 1: $C = 1200$ I (berech.) = 129 A

Al-Seil, $A = 150 \text{ mm}^2$, $\Delta t = 24^\circ \text{ C}$ I (gemess.) = 270 A
nach Fig. 1: $C = 2900$ I (berech.) = 264 A

Ad-Seil, $A = 43,2 \text{ mm}^2$, $\Delta t = 33^\circ \text{ C}$ I (gemess.) = 130 A
nach Fig. 1: $C = 500$ I (berech.) = 128 A

Ad-Seil, $A = 117 \text{ mm}^2$, $\Delta t = 56^\circ \text{ C}$ I (gemess.) = 325 A
nach Fig. 1: $C = 1800$ I (berech.) = 318 A

Ad-Seil, $A = 228,5 \text{ mm}^2$, $\Delta t = 26,5^\circ \text{ C}$ I (gemess.) = 350 A
nach Fig. 1: $C = 4500$ I (berech.) = 346 A

Ad-Seil, $A = 376 \text{ mm}^2$, $\Delta t = 57^\circ \text{ C}$ I (gemess.) = 720 A
nach Fig. 1: $C = 8800$ I (berech.) = 710 A

Al/St-Seil, $A = 210 \text{ mm}^2$, $\Delta t = 32^\circ \text{ C}$ I (gemess.) = 350 A
30/7 Drähte nach Fig. 1: $C = 3700$ I (berech.) = 344 A

c) Messungen BKW (nach Bulletin SEV Bd. 35(1944), Nr. 3, S. 63)

Al/St-Seil, $A = 210 \text{ mm}^2$, $\Delta t = 43^\circ \text{ C}$ I (gemess.) = 400 A
30/7 Drähte nach Fig. 1: $C = 3700$ I (berech.) = 399 A

Wie aus diesen Vergleichswerten hervorgeht, besteht somit zwischen den gemessenen und den nach Fig. 1 berechneten Belastungsstromstärken eine gute Uebereinstimmung. Zu den Messergebnissen von Teichmüller und Humann ist allerdings zu bemerken, dass bei kleineren Querschnitten die gemessenen

senen I -Werte allgemein tiefer liegen als die nach Fig. 1 berechneten, was offenbar auf den Umstand zurückzuführen ist, dass die Versuchsbedingungen nicht die gleichen waren wie bei den Messungen von Schurig und Frick. Aus den vorstehenden Vergleichswerten geht ferner hervor, dass die Umrechnung von Kupfer auf andere Leitermetalle unter Annahme der nach Gl. (5) genannten spezifischen Leitfähigkeiten ohne weiteres zulässig ist und mit der Messung gut übereinstimmende Werte liefert.

Für den praktischen Gebrauch ist es zweckmässig, Belastungskurven zur Hand zu haben, aus denen für jeden beliebigen Leiterquerschnitt und alle gebräuchlichen Leitermaterialien die für eine bestimmte Uebertemperatur zulässige Belastbarkeit direkt abgelesen werden kann. Als «zulässige» Belastung soll dabei diejenige Stromstärke bezeichnet werden, bei welcher der Leiter eine Temperatur annimmt, die für den Leiter selbst sowie für die Verbindungs-Klemmen und -Muffen auf die Dauer keine merkbare Festigkeitsabnahme zur Folge hat. Der Festigkeitsrückgang ist nicht nur von der Höhe der Leitertemperatur abhängig, sondern auch vom Kaltverformungsgrad und der Zusammensetzung der Legierung des verwendeten Leiters. Bei hartgezogenem Kupfer und Reinaluminium ist der Festigkeitsabfall um so grösser, je höher die vorangegangene Kaltverfestigung war. Bei Aluminium-Legierungen, z. B. Aldrey, wird das hartgezogene Material nachträglich einem thermischen Prozess unterworfen, der den nachteiligen Einfluss der Kaltreckung wieder aufheben soll. Nach Angaben der Aluminium-Industrie-A.-G. sind bei 12monatiger Dauererwärmung Aluminium und Aldrey beständig bis etwa 50°C und Kupfer bis etwa 40°C . Bei höheren Temperaturen erleidet das Material einen Festigkeitsabfall, der beim Kupfer am grössten und bei Aldrey am kleinsten ist. In Tabelle I sind die Resultate von Versuchen der AIAG Neuhausen an Cu-, Al- und Ad-Leitern bei Dauererwärmung im Oelbad als Mittelwerte zusammengestellt.

Festigkeitsabnahme von Cu-, Al- und Ad-Leitern
bei Dauertemperatur von $75\ldots 80^{\circ}\text{C}$

Tabelle I

Festigkeitsabnahme	Kupfer %	Reinalu- minium %	Aldrey %
nach 1 Monat	5,0	6,5	0
nach 3 Monaten	10,7	7,5	0,5
nach 6 Monaten	17,0	7,7	1,5
nach 9 Monaten	21,5	7,9	3,5
nach 12 Monaten	25,0	8,0	7,0

Nach dieser Tabelle ist ein ganz unterschiedliches Verhalten von Aluminium gegenüber Aldrey zu bemerken. Bei Reinaluminium fällt die Festigkeit nach kurzer Zeit praktisch auf den Wert, der sich bei gleicher Temperatur nach einem Jahr einstellt, während bei Aldrey die Festigkeit längere Zeit praktisch fast unverändert bleibt. Diese Zahlen sind jedoch nicht als absolute Festwerte zu betrachten, da sie, wie bereits erwähnt, durch die Vorbehandlung des Leiters wesentlich beeinflusst werden.

Bei der Feststellung der praktisch zulässigen Höchsttemperatur ist zu beachten, dass es sich bei Freileitungen nicht um einen dauernden, sondern in der Regel um einen intermittierenden Betrieb handelt, bei welchem die höchstzulässige Stromstärke nur zu gewissen Belastungszeiten auftritt. Ferner hat man bei Freileitungen stets mit Windinflüssen zu rechnen, welche die Leitertemperatur mehr oder weniger stark herabsetzen. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren dürfte es ohne weiteres zulässig sein, die maximalen Betriebstemperaturgrenzen folgendermassen anzunehmen:

für Leiter aus hartgezogenem Kupfer 70°C
für Leiter aus Reinaluminium 80°C
für Leiter aus Al-Legierungen (Aldrey) 80°C

Obwohl Aldrey nach den Laboratoriumsversuchen einen kleineren Festigkeitsrückgang aufweist als Reinaluminium, erscheint es, schon mit Rücksicht auf die Leiterverbinder, trotzdem angezeigt, die Grenztemperatur für Aldrey nicht höher zu wählen als für Reinaluminium.

Mit Hilfe der C-Geraden aus Fig. 1 sowie der vorstehend gewählten Grenztemperaturen ist man nun in der Lage, für alle Leiter-Materialien und -Querschnitte die maximal zulässigen Stromstärken unter Berücksichtigung der jeweiligen Umgebungstemperatur zu ermitteln. Man hat dabei in die Formel $I = \sqrt{\Delta t C}$ diejenige Uebertemperatur einzusetzen, die sich aus der Differenz der zulässigen Grenztemperatur und der Umgebungstemperatur ergibt.

Bei den für Freileitungen bei uns praktisch in Frage kommenden Umgebungstemperaturen dürfen demnach folgende Leiter-Uebertemperaturen zugelassen werden:

Uebertemperaturen von Freileitungen
bei verschiedenen Umgebungstemperaturen

Tabelle II

Umgebungstemperatur $t_1 (^{\circ}\text{C})$	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40
Cu:							
Grenztemperatur $t_2 (^{\circ}\text{C})$	70	70	70	70	70	70	70
Uebertemperatur $\Delta t (^{\circ}\text{C})$	90	80	70	60	50	40	30
Al und Leg. Ad:							
Grenztemperatur $t_2 (^{\circ}\text{C})$	80	80	80	80	80	80	80
Uebertemperatur $\Delta t (^{\circ}\text{C})$	100	90	80	70	60	50	40

Bei der Annahme der massgebenden Umgebungstemperatur ist zu berücksichtigen, dass einzelne Strecken, namentlich bei Leitungen, die durch das Gebirge führen, tagsüber höheren Umgebungstemperaturen ausgesetzt sein können als andere, während bei Ortsnetzen in der Regel mit der jeweils herrschenden Ortstemperatur gerechnet werden kann. Ferner sei daran erinnert, dass bei direkter Sonnenbestrahlung der unbelastete Leiter eine höhere Temperatur annehmen kann als die ihn umgebende Luft. Dieser Einfluss wird allerdings im allgemeinen überschätzt. Auf Grund sorgfältiger Messungen, die von Hünervadel [10] an einem frei-

gespannten Al-Draht von $d = 4,5$ mm ausgeführt wurden, ergab sich durch den Einfluss der Sonnenbestrahlung nur eine Temperaturerhöhung von $2...3$ °C über die umgebende Lufttemperatur. In den USA angestellte Versuche, die den gleichen Zweck verfolgten, ergaben praktisch das gleiche Resultat [7].

Die auf Grund dieser Annahmen ermittelten zulässigen Belastungsstromstärken sind in den Kurventafeln Fig. 2 bis Fig. 7 in Funktion des Querschnittes von Drähten und Seilen graphisch dargestellt. In Fig. 8 ist ferner die Belastbarkeit von Kupferhohlseilen für eine Uebertemperatur von 40 °C enthalten. Zum Vergleich ist in Fig. 8 die entsprechende Kurve für Kupfervollseile eingetragen. In

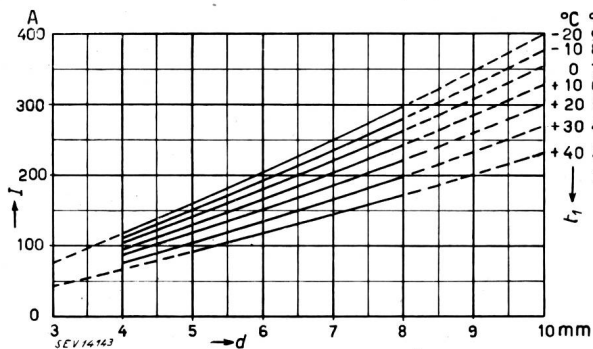


Fig. 2

Zulässige Belastung von Kupferdrähten bei verschiedenen Umgebungstemperaturen (ohne Wind) und einer maximalen Leitertemperatur von 70 °C

d Drahtdurchmesser; I Stromstärke; t_1 Umgebungstemperatur; Δt Uebertemperatur.

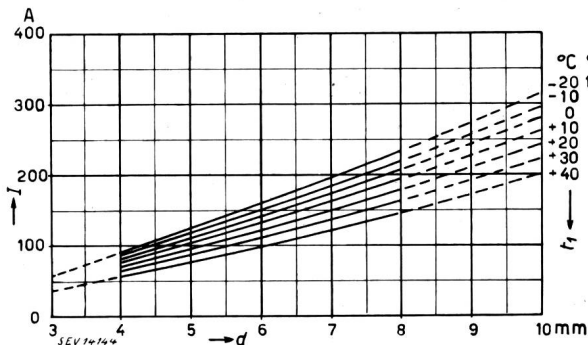


Fig. 3

Zulässige Belastung von Aludrähten bei verschiedenen Umgebungstemperaturen (ohne Wind) und einer maximalen Leitertemperatur von 80 °C

(Erläuterungen siehe Legende Fig. 2.)

diesen Kurventafeln ist der Einfluss des Windes nicht berücksichtigt, d. h. sie gelten für windstille Verhältnisse. Sie enthalten somit eine weitere Sicherheitsreserve, die je nach den Windverhältnissen in Anspruch genommen werden kann. In Wirklichkeit kommt für Freileitungen «ruhende» Luft praktisch kaum vor, schon deshalb nicht, weil zwischen Erdboden und Atmosphäre stets Temperaturunterschiede bestehen, die zu einer vertikalen Luftbewegung führen, auch wenn kein Wind vorhanden ist. Es ist deshalb zulässig, bei Freileitungen mit einer dauernd vorhandenen Luftbewegung zu rechnen, die nach französischen und amerikanischen Autoren [6] im Minimum zu $0,5...0,6$ m/s

Geschwindigkeit angenommen werden darf. Der Einfluss dieser Windstärke auf die Belastbarkeit der Leitung wurde sowohl durch Rechnung, als auch durch Versuche bestimmt. Die Ergebnisse weichen aber voneinander ab, wie aus Tabelle III hervorgeht.

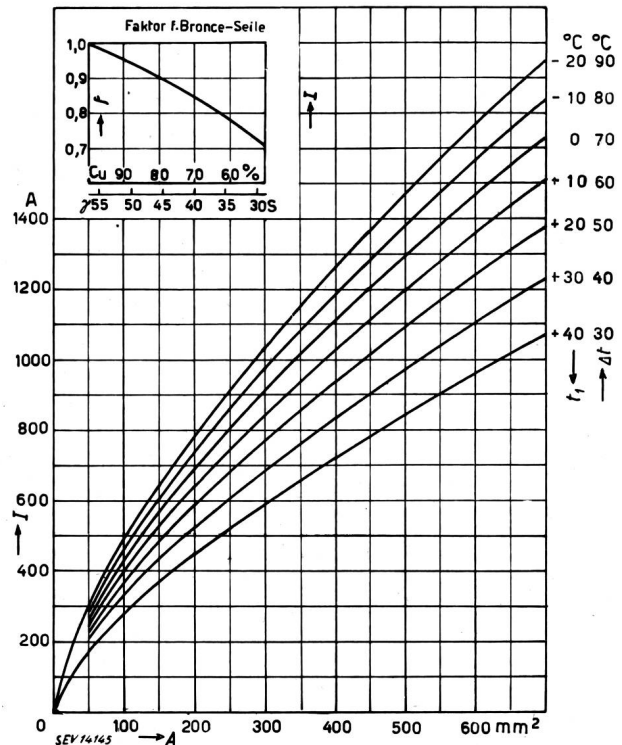


Fig. 4

Zulässige Belastung von Kupferseilen bei verschiedenen Umgebungstemperaturen (ohne Wind) und einer maximalen Leitertemperatur von 70 °C

A Leiterquerschnitt; I Stromstärke; t_1 Umgebungstemperatur; Δt Uebertemperatur; γ elektrische Leitfähigkeit; f Umrechnungsfaktor für Bronze-seile.

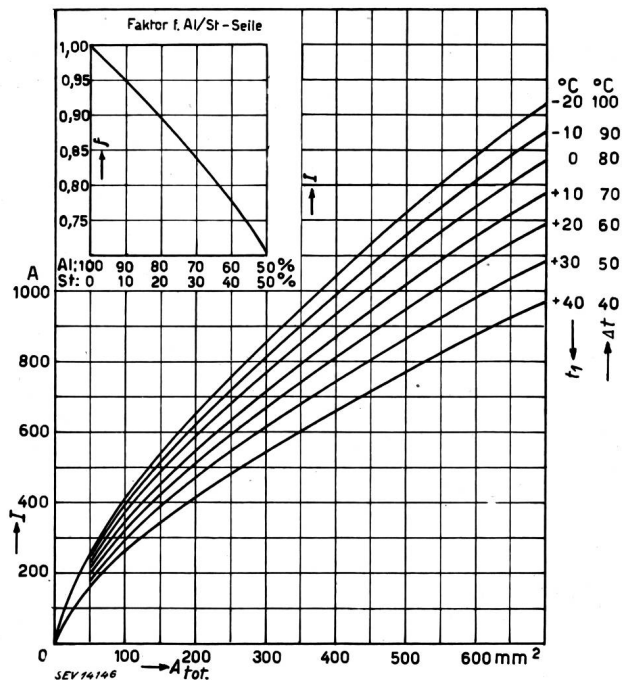


Fig. 5

Zulässige Belastung von Aluminiumseilen bei verschiedenen Umgebungstemperaturen (ohne Wind) bei einer maximalen Leitertemperatur von 80 °C

f Umrechnungsfaktor für Al/St-Seile (weitere Erläuterungen siehe Legende Fig. 4.)

*Einfluss des Windes
auf die Belastbarkeit von Freileitungen
bei $v = 0,5...0,6$ m/s und $\Delta t = 40^\circ\text{C}$*

Tabelle III

Land	Autor	Ermittlung	Querschnitt mm^2	Korrekturfaktor
Amerika	C. W. Frick [6]	berechnet	Al 200	1,23
		berechnet	Al 400	1,20
		berechnet	Al 600	1,17
Frankreich	Al. Français	gemessen	Al 200	1,18
		gemessen	Ad 200	1,21
		gemessen	Al/St 227 + 102	1,16
Schweiz	VSM 23 985 E	—	—	1,30

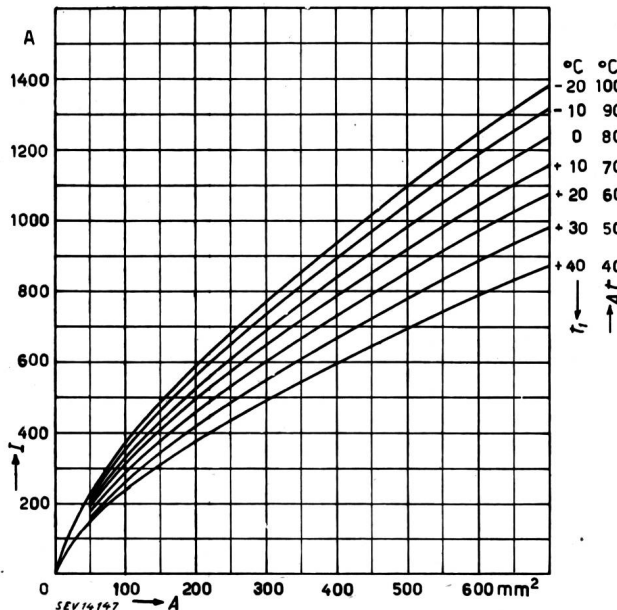


Fig. 6

Zulässige Belastung von Aluminium/Stahl-Sellen (30 + 7 Drähte) bei verschiedenen Umgebungstemperaturen (ohne Wind) und einer maximalen Leitertemperatur von 80°C (Erläuterungen siehe Legende Fig. 4.)
 A totaler Leiterquerschnitt (Al + St)

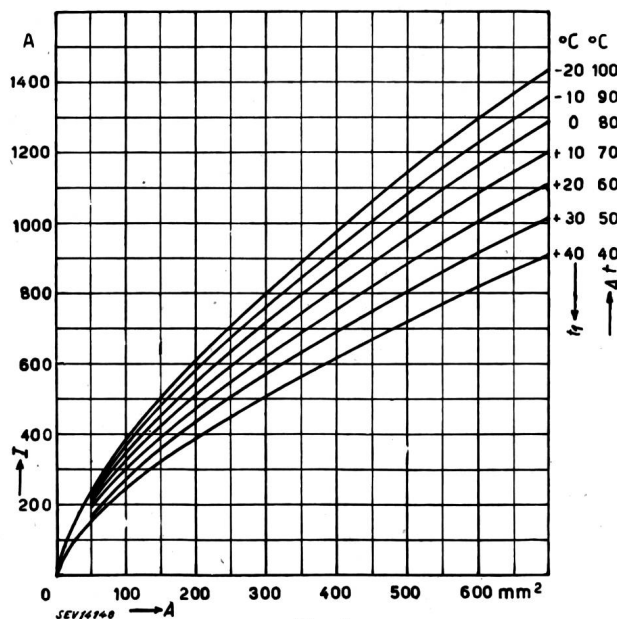


Fig. 7

Zulässige Belastung von Aldreysellen bei verschiedenen Umgebungstemperaturen (ohne Wind) und einer maximalen Leitertemperatur von 80°C (Erläuterungen siehe Legende Fig. 4.)

Wie ersichtlich, nimmt der Korrekturfaktor mit zunehmendem Leiterdurchmesser ab, welchem Umstände das Normblatt VSM allerdings nicht Rechnung trägt. Auf alle Fälle kann der Tabelle

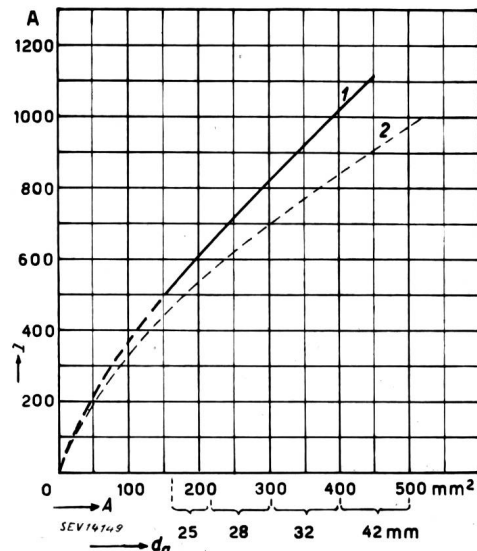


Fig. 8

Zulässige Belastung von Kupferhohlseilen, gültig für eine Uebertemperatur von 40°C (ohne Wind)

1 Kupferhohlseil; 2 Kupfervollseil (zum Vergleich); A Leiterquerschnitt; d_a Aussendurchmesser des Leiters; I Stromstärke.

entnommen werden, dass schon bei der verhältnismässig kleinen Windgeschwindigkeit von $0,5...0,6$ m/s die für ruhende Luft zulässige Belastungsstromstärke um mindestens 15...20 % erhöht werden darf.

In Fig. 9 ist der Korrekturfaktor f nach Frick [6] in Funktion des Leiterquerschnittes für eine Windgeschwindigkeit von $0,6$ m/s aufgetragen. Die

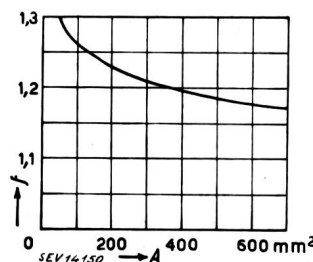


Fig. 9
Einfluss des Windes auf die Belastbarkeit der Freileitungen

f Korrekturfaktor für eine Windgeschwindigkeit $v = 0,6$ m/s (nach Frick);
 A Leiterquerschnitt.

aus den Kurventafeln ermittelten Stromstärken dürfen somit, sofern es sich um Ueberlandleitungen handelt, mit dem entsprechenden Korrekturfaktor multipliziert werden.

5. Anwendung der Belastungskurven und praktische Beispiele

Die zulässige Belastung von Leitungen aus Kupfer, Reinaluminium und Aldrey kann aus den entsprechenden Kurventafeln direkt abgelesen werden. Für Bronze- und Aluminiumstahlleitungen sind die Kurvenwerte mit einem von der Leiterzusammensetzung abhängigen Umrechnungsfaktor (Fig. 4 bzw. 5) zu multiplizieren. Die zulässige Belastung von

Aluminiumstahlseilen mit einer Seilkonstruktion von $30 + 7 = 37$ Drähten (Querschnittsverhältnis 81 % : 19 %) kann aus Kurventafel Fig. 6 ebenfalls direkt abgelesen werden. Dabei ist zu beachten, dass sich der auf der Abszissenaxe aufgetragene Querschnitt bei Aluminiumstahlseilen stets auf den totalen Leiterquerschnitt bezieht.

Die Belastungskurven für Aluminiumstahlseile (Fig. 5 bzw. 6) gelten nur für Seilkonstruktionen mit «Gegenschlag», d. h. mit praktisch kompensierter Durchflutung, wie sie heute ausschliesslich zur Verwendung kommen. Aluminiumstahlseile mit «Gleichschlag» weisen bekanntlich einen zusätzlichen Wechselstromwiderstand auf, der bei hohen Strombelastungen sehr stark in Erscheinung tritt und eine wesentliche Temperatursteigerung verursacht [8]. Bei Erwärmungsversuchen an zwei Aluminiumstahlseilen von je $170 + 40 \text{ mm}^2$ Querschnitt, wovon das eine im Gegenschlag und das andere im Gleichschlag verseilt, wurden folgende Unterschiede in der Temperaturerhöhung festgestellt:

Belastungsstromstärke	$I \text{ (A)}$	200	300	400	500
Al/St-Seil m. Gegenschlag $\Delta t \text{ (}^\circ\text{C)}$		14,5	29,5	49,0	72,5
Al/St-Seil m. Gleichschlag $\Delta t \text{ (}^\circ\text{C)}$		22,5	44,0	73,5	103

Da in der Schweiz noch grosse Strecken des 150-kV-Netzes mit Gleichschlagseilen von $170 + 40 \text{ mm}^2$ Querschnitt ausgerüstet sind, werden in folgender Tabelle die zulässigen Stromstärken für diese spezielle Seilart angegeben:

Zulässige Belastung
von Al/St-Seilen $170 + 40 \text{ mm}^2$ mit Gleichschlag
Tabelle IV

Umgebungstemp. $t_1 \text{ (}^\circ\text{C)}$	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40
Uebertemp. $\Delta t \text{ (}^\circ\text{C)}$	100	90	80	70	60	50	40
Zul. Belastung							
ohne Wind $I \text{ (A)}$	490	460	430	400	365	325	285
mit Wind $I_w \text{ (A)}$	600	560	525	490	445	400	350
$(v = 0,6 \text{ m/s})$							

Bei langen Leitungen wird man mit Rücksicht auf den Spannungsabfall und die Leitungsverluste im allgemeinen mit der Belastung nicht so hoch gehen dürfen, wie dies im Hinblick auf die maximale Erwärmung der Leiter zulässig wäre. Beim Abschmelzen von Schnee- oder Rauhreifwalzen bei kurzgeschlossenener Leitung handelt es sich andersseits darum, die Leitung möglichst stark zu erwärmen, um die Zusatzlast in kurzer Zeit zu beseitigen. In diesem Falle kann mit der Belastung bis an die höchstzulässige Grenze gegangen werden, sofern die Konstruktion und der Zustand der Seilverbinder dies zulässt. Auf einer durch Rauhreifgebiet führenden 150-kV-Leitung mit $170 + 40 \text{ mm}^2$ Al / St-Gleichschlagseilen wird z. B. das Abschmelzen der Zusatzlast mit 300 A innerhalb 20...30 min bewerkstelligt, wobei sich das Seil auf zirka 45°C erwärmt ($t_1 = 0^\circ\text{C}$ angenommen). Nach Tabelle IV wäre für dieses Seil bei $t_1 = 0^\circ\text{C}$ ohne Wind eine Belastung von 430 A zulässig, wobei sich das Seil auf 80°C erwärmen würde, so dass die Abschmelzzeit

und damit der nötige Betriebsunterbruch entsprechend abgekürzt werden könnten.

Die herrschende, wohl noch einige Zeit dauernde Materialknappheit und der Personalmangel, sowie die gleichzeitige starke Belastungssteigerung machen es nötig, die vorhandenen Uebertragungs- und Verteilungen bis zur äussersten Grenze auszunützen. Soweit für die zulässige Maximalstromstärke die Erwärmung der Leiter massgebend ist, kann aus den Belastungstabellen Fig. 2...7 die zulässige Maximalleistung, die auf der in Frage stehenden Leitung übertragen werden kann, bestimmt werden. Dabei zeigt sich, dass bei tiefen Aussentemperaturen ganz bedeutende Leistungssteigerungen möglich sind, d. h. gerade in den Wintermonaten, in denen der Leistungsbedarf am grössten ist. Diese Tatsache wird nun durch einige Beispiele, für welche jeweils eine Umgebungstemperatur von $+40$, $+20$ und 0°C angenommen wurde, illustriert. In vielen Fällen steht die Leistung, welche für die Leitung aus thermischen Gründen noch zulässig wäre, nicht zur Verfügung; doch ist es für den Betriebsleiter interessant zu wissen, was er seinen Leitungen zumuten darf, wenn es sich darum handelt, bei Störungen grosse Leistungsquoten über die noch intakten Leitungen oder eventuell einen einzigen noch verfügbaren Leitungsstrang zu übertragen.

Anmerkung zu den folgenden Beispielen ²⁾

Die Berechnung der Uebertragungsleistung erfolgte in jedem Beispiel mit einer um 10 % reduzierten Spannung und einem Leistungsfaktor von 0,8 am Leitungsende. Bei der Berechnung des Spannungsabfalles und der Energieverluste wurde jeweils die für die betreffende Leitertemperatur massgebende spezifische Leitfähigkeit, welche aus Fig. 10 hervorgeht, eingesetzt. Alle Werte beziehen

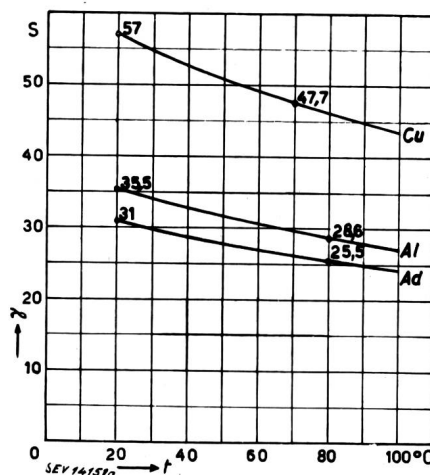


Fig. 10
Spezifische Leitfähigkeit von Kupfer, Aluminium und Aldrey
in Funktion der Leitertemperatur
 t Leitertemperatur; γ spezifische elektrische Leitfähigkeit.
Temperaturkoeffizienten für 1°C :

Cu hart 0,0039
Al hart 0,0040
Ad verg. 0,0036

²⁾ Die angenommenen Spannungen entsprechen nicht überall der Publ. Nr. 159 des SEV (Genormte Werte der Spannungen, Frequenzen und Ströme für elektrische Anlagen. Regeln des SEV. Zürich, 1941.).

Beispiel 1						
8-mm-Cu-Draht (Fig. 2) $U = 16$ kV, $R_{70} = 4,2 \Omega$, $v = 0$ m/s $X = 3,5 \Omega$, $f = 1,0$						
t_1 °C	Δt °C	t_2 °C	I_{zul} A	P_{zul} kW	ΔU %	ΔP %
+ 40	30	70	174	3 480	10,3	9,9
+ 20	50	70	225	4 500	12,9	12,4
0	70	70	265	5 300	14,9	14,3
Beispiel 2						
70-mm ² -Cu-Seil (Fig. 4) $U = 24$ kV $R_{70} = 3,0 \Omega$, $v = 0$ m/s $X = 3,5 \Omega$, $f = 1,0$						
+ 40	30	70	220	6 600	7,4	6,2
+ 20	50	70	280	8 400	9,2	7,8
0	70	70	340	10 200	10,9	9,3
Beispiel 3						
172-mm ² -Br-Seil (Fig. 4) $\gamma = 50$ S $U = 150$ kV $R_{70} = 1,38 \Omega$, $v = 0,6$ m/s $X = 4,0 \Omega$, $f = 1,23$						
+ 40	30	70	490	92 000	2,2	1,1
+ 20	50	70	645	121 000	2,8	1,4
0	70	70	755	141 000	3,3	1,6
Beispiel 4						
150-mm ² -Al-Seil (Fig. 5) $U = 50$ kV $R_{80} = 2,3 \Omega$, $v = 0,6$ m/s $X = 3,5 \Omega$, $f = 1,23$						
+ 40	40	80	420	26 200	6,0	4,5
+ 20	60	80	515	32 000	7,3	5,4
0	80	80	600	37 400	8,3	6,2
Beispiel 5						
170+40-Al-St-Seile, $A=210$ mm ² total (Fig. 5,6) $U=150$ kV $R_{80} = 2,02 \Omega$, $v = 0,6$ m/s $X = 4,0 \Omega$, $f = 1,22$						
+ 40	40	80	475	89 000	2,4	1,5
+ 20	60	80	580	108 000	2,9	1,9
0	80	80	660	123 000	3,3	2,1
Beispiel 6						
185-mm ² -Ad-Seil (Fig. 7) $U = 87$ kV $R_{80} = 2,12 \Omega$, $v = 0,6$ m/s $X = 4,0 \Omega$, $f = 1,23$						
+ 40	40	80	455	49 500	4,0	2,7
+ 20	60	80	555	60 000	4,8	3,2
0	80	80	645	70 000	4,6	3,6

sich auf eine einfache Drehstromleitung, d. h. auf einen Leitungsstrang von 10 km Länge. R_{70} und R_{80} bedeuten die ohmschen Leitungswiderstände bei Leitertemperaturen t_2 von 70 und 80 °C und X die induktiven Leitungswiderstände bei der Frequenz von 50 Hz.

Bei Temperaturen unter 0 °C könnten die Uebertragungsleistungen noch entsprechend erhöht werden.

Wie aus diesen Beispielen hervorgeht, lässt sich unter Ausnützung der tiefen Ortstemperaturen im Winter eine wesentliche Steigerung der übertragbaren Leistung erzielen, soweit der zulässige Spannungsabfall und die Energieverluste es erlauben. Auf Verbindungs- und Verteilleitungen dürfte dies meistens der Fall sein, um so mehr, als es sich hier um einen vorübergehenden Betriebszustand handelt, mit dem nur während der Hauptbelastungszeiten zu rechnen ist. Die Kurventafeln bilden somit ein einfaches und zuverlässiges Mittel, um die bei verschiedenen Temperaturverhältnissen auf einer Freileitung übertragbare Maximalleistung zu bestimmen.

Literatur

- [1] Teichmüller, J.: Erwärmung elektrischer Leitungen. Stuttgart, 1905.
- [2] Teichmüller, J., und Humann, P.: Belastung von Leitungen für Hausinstallationen. Elektrotechn. Z. Bd. 38 (1907), Nr. 19, S. 475...479.
- [3] Leitsätze für die Verwendung von Aluminium und Aluminiumlegierungen im Regelleitungsbau (Leitsätze für Al-Regelleitungen). Publ. Nr. 174 des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins. Zürich, 1944.
- [4] Aluminium-Freileitungen. 5. ed. Berlin, 1940.
- [5] Zeerleder, A. von, und Bourgeois, P.: Effect of temperatures attained in overhead electric transmission cables. J. Inst. Metals Bd. 42(1929), Nr. 2, S. 321...329.
- [6] Frick, C. W.: Current-carrying capacity of bare cylindrical conductors for indoor and outdoor service. Gen. electr. Rev. Bd. 34(1931), Nr. 8, S. 464...471.
- [7] Schurig, O. R., und Frick, C. W.: Heating and current-carrying capacity of bare conductors for outdoor service. Gen. electr. Rev. Bd. 33(1930), Nr. 3, S. 141...157.
- [8] Oertli, H., und Köchli, W.: Die 150-kV-Leitung Innertkirchen—Wimmis—Mühleberg der Bernischen Kraftwerke A.-G. Bull. SEV Bd. 35(1944), Nr. 3, S. 57...69.
Jean-Richard, Ch.: Les pertes supplémentaires par aimantation dans les lignes triphasées à haute tension. Bull. SEV Bd. 28(1937), Nr. 13, S. 290...291.
- [9] Electric characteristics of ACSR. Hg. von der Aluminium Co. of America. Pittsburg, 1934.
- [10] Der Bericht von G. E. Hünervadel an das FK 7 des CES wurde nicht veröffentlicht; ein Aktenexemplar steht beim Sekretariat des CES, Seefeldstrasse 301, Zürich 8, zur Verfügung.

Adresse des Autors:

H. Ludwig, dipl. Ing., Kraftwerke Oberhasli A.-G., Innertkirchen.