

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 50 (1959)
Heft: 6

Artikel: Spezifische thermische Festigkeit elektrischer Leiter
Autor: Dassetto, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059445>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 03.04.2025

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

fréquence d'oscillation. Il sera donc généralement préférable d'adopter le premier type de limitation par coupure du courant, ou tout autre méthode ne présentant pas l'inconvénient mentionné.

D. Conclusions

Notre but était d'aborder quelques problèmes de réaction et contre-réaction dans les montages à transistors, après avoir rappelé les propriétés générales de ces éléments.

La technique classique des circuits à tubes électroniques a certainement largement contribué au

rapide essor de circuits adaptés aux transistors. Toutefois de nombreux problèmes propres aux transistors doivent être traités en tenant compte du comportement souvent fort complexe de ces éléments.

Les quelques données expérimentales exposées plus haut ont été établies au Laboratoire d'Electronique de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne au cours de travaux pour lesquels la Fondation Hasler nous a accordé son appui.

Adresse de l'auteur:

R. Dessoulavy, Professeur à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne, 33, avenue de Cour, Lausanne.

Spezifische thermische Festigkeit elektrischer Leiter

Von G. Dassetto, Zürich

621.315.53.019.33

Auf Grund eines neuen Begriffes — der spezifischen thermischen Festigkeit eines Leiters bei Kurzschluss — wird die Überlegenheit von Aluminium- und besonders von Aldrey-Leitern gegenüber widerstandsgleichen Kupferleitern gezeigt.

Par une nouvelle notion — la résistance spécifique d'un conducteur au choc thermique dû aux courants de court-circuit — on démontre la supériorité des conducteurs en aluminium et surtout en Aldrey par rapport à ceux en cuivre électriquement équivalents.

Jeder elektrische Leiter muss nicht nur den durch Kurzschlüsse hervorgerufenen elektrodynamischen Beanspruchungen widerstehen, sondern es müssen auch seine Abmessungen (Querschnitt) derart gewählt werden, dass er von einem Kurzschlussstrom i_k während einer Zeit τ durchflossen werden kann, ohne dass eine bestimmte Grenztemperatur ϑ_l überschritten wird.

Diesbezüglich taucht neuerdings in der technischen Literatur [1]¹⁾ ein neuer Begriff auf, nämlich die «spezifische thermische Festigkeit» eines Leiters, d. h. sein spezifischer Widerstand in Bezug auf den thermischen Stoss.

Nimmt man einfachheitshalber an, dass sich der ganze Kurzschlussstrom in Wärme umsetzt, so gilt die Gleichung:

$$i_k^2 \frac{\rho l}{A} \Delta t = A l \delta c \Delta \vartheta \cdot 4,1868 \cdot 10^{-3} \text{ [Ws]} \quad (1)$$

I
II
III

Hierin bedeuten:

- i_k Mittlerer, wirksamer Kurzschlussstrom [A]
- ρ Spezifischer elektrischer Widerstand [Ωmm²/m]
- l Leiterlänge [m]
- A Leiterquerschnitt [mm²]
- Δt Zeit [s]
- δ Dichte des Leitermaterials [kg/m³]
- c Spezifische Wärme des Leitermaterials [kcal/kg°C]
- $\Delta \vartheta$ Während Δt erfolgte Temperaturerhöhung [°C]
- I Elektrische Energie [Ws]
- II In Wärme umgewandelte Energie [kcal]
- III Umrechnungsfaktor von [kcal] in [Ws] und [mm²] in [m²].

Wenn man diejenigen Grössen, die für die Beanspruchung des Leiters massgebend sind (Strom und Zeit) von denjenigen trennt, die dessen Festigkeit

darstellen (Materialkonstanten), so erhält man eine neue Gleichung, die den neuen Begriff zu erklären vermag:

$$i_k^2 \Delta t = A^2 \frac{\delta c}{\rho} \Delta \vartheta \cdot 4,1868 \cdot 10^{-3} \text{ [A}^2\text{s]} \quad (2)$$

IV
V

wo IV Thermische Beanspruchung des Leiters [A²s]

V Spezifische thermische Festigkeit des Leiters [A²s/mm⁴]

Unter der Annahme, dass δ und c von der Temperatur unabhängig, also Konstanten sind, und dass

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha (\vartheta - \vartheta_0)]$$

wo α Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes [°C⁻¹]

ρ_0 Spezifischer Widerstand bei der Temperatur ϑ_0 [Ωmm²/m]

kann man also schreiben:

$$\int_0^\tau i_k^2 dt = 4,1868 \cdot 10^{-3} \cdot A^2 \frac{\delta c}{\rho_0} \int_{\vartheta_n}^{\vartheta_l} \frac{d\vartheta}{1 + \alpha (\vartheta - \vartheta_0)} \quad (3)$$

wo ϑ_l Zulässige Grenztemperatur bei Kurzschluss [°C]

ϑ_n Maximal zulässige Temperatur für Dauerbetrieb laut Normen [°C]

Durch Integration erhält man:

$$i_k^2 \tau = 4,1868 \cdot 10^{-3} \cdot A^2 \frac{\delta c}{\rho_0 \alpha} \ln \left[\frac{1 + \alpha (\vartheta_l - \vartheta_0)}{1 + \alpha (\vartheta_n - \vartheta_0)} \right] = 9,64 \cdot 10^{-3} \cdot A^2 \frac{\delta c}{\rho_0 \alpha} \lg \left[\frac{1 + \alpha (\vartheta_l - \vartheta_0)}{1 + \alpha (\vartheta_n - \vartheta_0)} \right] = A^2 k_{th} \quad (4)$$

wo $k_{th} = 9,64 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\delta c}{\rho_0 \alpha} \lg \left[\frac{1 + \alpha (\vartheta_l - \vartheta_0)}{1 + \alpha (\vartheta_n - \vartheta_0)} \right]$

Man erhält somit:

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

$$k_{th} = \frac{i_k^2 \tau}{A^2} = \sigma^2 \tau \quad [A^2s/mm^4] \quad (5)$$

wo σ Stromdichte $[A/mm^2]$

Die «spezifische thermische Festigkeit», wie sie durch die Gleichung (5) definiert ist, ist also eine Konstante des Leitermaterials, gültig jedoch nur für eine ganz bestimmte Zeit τ , welcher ein bestimmter Wert von ϑ_l entspricht.

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

$$i_k^2 \tau \leq A^2 k_{th} \quad (6)$$

oder

$$A \geq \sqrt{\frac{i_k^2 \tau}{k_{th}}} \quad (7)$$

Die Gleichung (7) gestattet also, den für die thermische Sicherheit bei Kurzschluss erforderlichen Querschnitt zu bestimmen.

Neuzeitliche Untersuchungen [2; 3] haben zur Bestimmung der zulässigen Grenztemperatur ϑ_l in Funktion der Kurzschlussdauer geführt. Aus den entsprechenden Kurven können folgende Werte abgelesen werden (Tabelle I):

Grenztemperatur ϑ_l verschiedener Leitermaterialien als Funktion der Kurzschlussdauer τ

Tabelle I

Leitermaterial	Grenztemperatur für Kurzschlussdauer von		
	1 s [°C]	3 s [°C]	5 s [°C]
Kupfer	170	165	160
Aluminium	200	190	180
Aldrey	250	220	200

Die schweizerischen Normen schreiben andererseits folgende maximal zulässige Temperaturen für Dauerbetrieb vor (Tabelle II):

Schweizerische Normen für maximal zulässige Temperaturen ϑ_n im Dauerbetrieb

Tabelle II

Leitermaterial	ϑ_n für	
	Seile [°C]	Sammelschienen [°C]
Kupfer	70	65
Aluminium	80	65
Aldrey	80	65

Unter Anwendung der Gleichung (5) für Drähte und Profile erhält man somit die in Tabelle III wiedergegebenen Werte von k_{th} :

Spezifische thermische Festigkeit k_{th} als Funktion der Kurzschlussdauer τ

Tabelle III

Leitermaterial	k_{th} für Drähte bei Kurzschlussdauer von			k_{th} für Sammelschienen bei Kurzschlussdauer von		
	1 s	3 s	5 s	1 s	3 s	5 s
Kupfer	0,0140	0,0134	0,0128	0,0148	0,0142	0,0137
Aluminium	0,0072	0,0066	0,0062	0,0081	0,0076	0,0071
Aldrey	0,0085	0,0073	0,0064	—	—	—

Für Seile sind die Werte von k_{th} etwas grösser als diejenigen von Tabelle III, da δ gegenüber Drähten wegen der Verseilung und Drahtlagenanzahl etwas höher gewählt wird. Bei Verbundleitern, wie Stahlaluminium und Stahl-Aldrey sind die Werte von k_{th}

infolge des Gewichtseinflusses der Stahlseele auf den Endwert von δ ebenfalls höher als diejenigen der widerstandsgleichen monometallischen Leiter.

Die Gleichung (7) gestattet also, auf Grund der berechneten k_{th} -Werte und der zu wählenden Werte von i_k (τ ist eng mit k_{th} verbunden) Diagramme aufzustellen, die die unmittelbare Ableseung des in Bezug auf den thermischen Stoss maximal notwendigen Querschnittes ermöglichen.

Nimmt man $i_k = 1 A$ und $\tau = 1, 3, 5 s$, so erhält man mit Gleichung (7) Einheitsquerschnitte gemäss Tabelle IV.

Einheitsquerschnitte A bei Kurzschlußstrom $i_k = 1 A$ und verschiedener Kurzschlussdauer τ

Tabelle IV

Leitermaterial	A für Drähte bei Kurzschlussdauer von			A für Sammelschienen bei Kurzschlussdauer von		
	1 s [mm ²]	3 s [mm ²]	5 s [mm ²]	1 s [mm ²]	3 s [mm ²]	5 s [mm ²]
Kupfer	8,14	14,96	19,78	8,21	14,52	19,17
Aluminium	11,79	21,25	28,51	10,09	19,84	26,54
Aldrey	10,82	20,59	27,96	—	—	—

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

Verhältnis der Aluminium- und Aldrey- zu den Kupfer-Einheitsquerschnitten

Tabelle V

Vergleich	Verhältnis der Einheitsquerschnitte A					
	für Drähte bei τ von			für Sammelschienen bei τ von		
	1 s	3 s	5 s	1 s	3 s	5 s
Al/Cu	1,40	1,42	1,44	1,36	1,37	1,38
Ad/Cu	1,28	1,36	1,41	—	—	—

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

Verhältnis der spezifischen elektrischen Widerstände

Al/Cu 1,58
Ad/Cu 1,78

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

1. Aluminium- und Aldrey-Querschnitte kleiner als elektrisch gleichwertige Kupfer-Querschnitte gewählt werden könnten;
2. sämtliche dem Kupfer widerstandsgleichen Aluminium- und Aldrey-Querschnitte die in der Gleichung (7) festgelegte Bedingung erfüllen;
3. die elektrisch gleichwertigen Aluminium- und Aldrey-Querschnitte gegenüber denjenigen aus Kupfer eine thermische Sicherheit gemäss Tabelle VI bieten;

«Thermische Sicherheit» von elektrisch gleichwertigen Aluminium- und Aldrey- im Vergleich zu Kupfer-Querschnitten

Tabelle VI

Leitermaterial	Thermische Sicherheit für Drähte bei τ von			Thermische Sicherheit für Sammelschienen bei τ von		
	1 s	3 s	5 s	1 s	3 s	5 s
Aluminium	1,13	1,11	1,10	1,17	1,16	1,14
Aldrey	1,39	1,31	1,26	—	—	—

4. die widerstandsgleichen Aldrey-Querschnitte gegenüber denjenigen aus Aluminium eine höhere Sicherheit gemäss Tabelle VII bieten.

Erhöhte «thermische Sicherheit» elektrisch gleichwertiger Querschnitte von Aldrey gegenüber Aluminium

Tabelle VII

Leitermaterial	Erhöhte Sicherheit gegenüber Aluminium bei τ von		
	1 s	3 s	5 s
Aldrey	1,23	1,18	1,15

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Einfluss der Anwendung der Digital-Rechenmaschine auf die Berechnung von elektrischen Maschinen

681.14-523.8 : 621

[Nach P. A. Abetti, W. J. Cuthbertson und S. B. Williams: Philosophy of Applying Digital Computers to the Design of Electric Apparatus. Trans. AIEE, Part I, Bd. 77(1958), Nr. 37, S. 367...379]

In letzter Zeit wird verschiedenerseits die Rechenmaschine zur Berechnung von Transformatoren immer öfters hinzugezogen. Welche Berechnungswege in der Zukunft eingeschlagen werden, ist noch nicht genau vorauszusagen, da erstens den Wünschen entsprechend neue Rechenmaschinen-Modelle fortlaufend ausgearbeitet werden und zweitens diese Technik seit 1952 untersucht und geübt wird, also als sehr jung anzusprechen ist. Die besagten Wünsche betreffen die Einfachheit der Bedienung, ein weitgehendes automatisches Entschlussvermögen und nicht zu allerletzt die Verbilligung der grossen Rechenanlagen. Diese Verbilligung würde die Berechnungsmethoden und überhaupt die Konstruktion der behandelten Maschinen ändern, indem ein grösserer Kreis der Fabrikanten sich solche Anlagen leisten könnte, und sich dadurch die Erfahrungen vermehren würden.

Als technische Auswirkung würde nicht zuletzt eine Vereinheitlichung der Qualität herbeigeführt, da die Entscheidungen über den Aufbau der Produkte auf maschinelle Art gefällt werden, somit Unzulänglichkeiten eines Berechnungs-Ingenieurs wegfallen. Andererseits kommen Einfälle der begabtesten Konstrukteure nicht mehr zur Geltung, die in speziellen Fällen besondere Lösungen zur Hand hätten, die aber durch das Programm einer Rechenmaschine nicht zum Ausdruck kommen. Die Wirtschaftlichkeit der maschinellen Berechnung beruht auf verschiedenen Faktoren: die Arbeitsgeschwindigkeit bedingt ein Preisverhältnis von 1 : 10⁴, vergleicht man die Unkosten während der Betriebszeit mit den Ingenieur-Löhnen, vorausgesetzt, dass pro Sekunde bis 4 · 10⁴ Additionen ausgeführt werden. Allerdings ist die Arbeitszeit allein nicht ausschlaggebend, weil das Einrichten und Programmieren erheblich viel Zeit braucht. Zur Bestimmung der optimalen Verhältnisse beim Konstruieren einer Maschine oder eines Apparates wäre der Aufwand an Rechner-Monaten so hoch, dass meistens auf solche Untersuchungen verzichtet wird, was hingegen bei der Rechenmaschine sehr leicht durchführbar ist, zumal das Programm nur einmal eingestellt wird.

Ziel der Berechnung

Die Berechnungen haben nebst dem Hauptzweck der richtigen Dimensionierung einer Maschine, bevor sie der Konstruktion und der Fabrikation übergeben wird, weitere Anwendungen, wie die Berechnung für eine Offerte, um dem Kunden bei seiner Projektierung zu helfen; die Offertberechnung bleibt sehr oberflächlich und begnügt sich oft mit Angaben von Grössenordnungen. Ferner werden durch Berechnungen ganze Typenreihen aufgestellt, bei Berücksichtigung der gewünschten Eigenschaften und angemessener Kosten, wodurch die Apparate- oder Maschinen-Reihe konkurrenzfähig wird. Ebenfalls durch Berechnung lassen sich die Rückwirkungen voraussehen, bei Änderungen von Material, von Behandlungen, von Werkzeugen, vom Aufbau der betreffenden Maschine

Literatur

- [1] Schmitz, H.: Thermische Beanspruchung und Festigkeit elektrischer Leiter für Schaltanlagen. ETZ-A Bd. 79(1958), Nr. 16, S. 567...571.
- [2] Dassetto, G.: Continuità d'esercizio delle linee aeree elettriche. Bericht 302. Tagung der «Associazione Elettrotecnica Italiana (AEI)», Bari 1958.
- [3] Dassetto, G.: Einfluss von Wärme auf die Festigkeitseigenschaften von Freileitungsseilen. Aluminium Bd. 34(1958), Nr. 12, S. 716...718.

Adresse des Autors:

G. Dassetto, dipl. Ingenieur ETH, Aluminium-Industrie-Aktiengesellschaft, Feldeggstrasse 4, Postfach Zürich 34.

oder von ihren Nenndaten. Diese Anwendungsgebiete der Konstruktions-Berechnung lassen sich sehr unterschiedlich behandeln. Die Offertberechnung sowie die Konstruktion nach genau bestimmten Nenndaten treten am häufigsten auf und verlangen einen grossen Anteil an Routine-Arbeit sowie Konstruktions-Erfahrungen, um eine Vielfalt an Parametern mit optimalen Werten zu versehen. Andererseits bietet die Ausarbeitung einer Typenreihe oder die Untersuchung der Auswirkungen irgendeiner Änderung auf bestehende Konstruktionen unendlich viele Lösungen, so dass nach einigen Annäherungen eine Lösung herausgegriffen wird, die als nächste von einem mutmasslichen Optimum angenommen wird.

Maschinelle Berechnung

Aus zwei Gründen wird die Digital- und nicht die Analog-Rechenmaschine verwendet: erstens befinden sich unter den Parametern viele un stetige Funktionen, die von Analog-Rechenmaschinen nicht behandelt werden können, zweitens hat vor allem bei den Digital-Rechenmaschinen eine sehr starke Entwicklung und Verbesserung stattgefunden. Eine erste, unvollkommene Anwendungsmethode, vor allem mit kleineren Geräten lässt dem Berechnungsingenieur die Freiheit, vor jedem Berechnungsgang einen oder mehrere Parameter einzustellen. Nach jeder maschinellen Berechnung muss der Mensch über die Verwendbarkeit der Resultate entscheiden, und davon ausgehend, nach erfolgter Änderung einiger Parameter, die Berechnung durch die Maschine neu ausführen lassen. Ist der betreffende Techniker nicht erfahren genug, so können leicht die Anfangsparameter im falschen Sinne verändert werden, und somit die Lösung vom Optimum entfernt werden. Einen anderen Nachteil findet man in den unterschiedlichen Arbeitszeiten zwischen Mensch und Rechenmaschine, so dass ein unverhältnismässig grosser Zeitaufwand in Vorbereitung und Programmieren der Rechenmaschine verloren geht.

Deshalb wird eine Berechnungsart vorgezogen, die den Menschen vom ersten Programmieren bis zur optimalen Endlösung ausschaltet. Die Rechenmaschine registriert nun nicht mehr die Lösung nach jeder Berechnung, um sie dem Ausgang zuzuführen, sondern vergleicht sie selber mit den hinzugegebenen Sollwerten, ändert programmgemäss im richtigen, d. h. konvergierenden Sinne sämtliche Parameter und beginnt die Berechnung von vorne, so lange, bis die Lösungen innerhalb vorgeschriebener Toleranzen liegen. Ein Eingreifen in die maschinellen Entschlüsse wird höchstens für eine Variable eingeräumt, z. B. die Wicklungsart beim Transformator, obwohl auch hier ein Rechenprogramm aufgestellt werden kann. Ist dann aber der erste Entschluss falsch, so wird das Rechengerät nach einigen Berechnungsgängen blockiert, weil keine Lösung möglich ist.

Eine sehr grosse Hilfe bedeutet die Rechenmaschine bei Neukonstruktionen. Ausgehend von besonders vielen veränderlichen Bedingungen müssen hier eine Reihe optimaler Lösungen gefunden werden. Bei menschlicher Berechnung kann wohl irgendein Optimum erreicht werden, es fehlt aber die Übersicht über alle Bedingungen und Möglichkeiten; Nomogramme und Diagramme vermitteln den Zusammenhang zwischen höchstens 3 Variablen, so dass es fraglich ist, ob das höchste Optimum erreicht ist, oder nur eine der vielen Lösungen, die einen Parameter auf Kosten der übrigen berücksichtigt. Die maschinelle Berechnung lässt diese Zweifel nicht auf-