

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 76 (1985)

Heft: 13

Artikel: Anlaufverhalten des Kühlwassers in Kabeln mit Eigenkühlung

Autor: Adolph, U.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-904635>

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: 18.02.2026

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

Anlaufverhalten des Kühlwassers in Kabeln mit Eigenkühlung

U. Adolph

Bei Kabeln mit Eigenkühlung wurde bisher vor allem der stationäre Betriebszustand untersucht. Der vorliegende Aufsatz befasst sich mit den Anlaufverhältnissen. An einem Modell werden die Vorgänge berechnet und anschliessend mit Messungen an einem praktischen Beispiel verglichen. Es zeigt sich, dass die Temperatur des Wasserendverschlusses beim Anlauf kurzzeitig recht hoch über die sich stationär einstellende Temperatur steigen kann.

Pour les câbles à refroidissement propre, on a examiné jusqu'ici surtout l'état de service stationnaire. L'auteur traite des conditions lors de l'enclenchement. A un modèle, les répartitions de température ont été calculées, puis comparées avec des mesures en pratique. On constate que, lors l'enclenchement, la température de l'eau dans la boîte d'extrémité peut brièvement monter considérablement au-dessus de la température stationnaire.

1. Einleitung

Bei Kabeln, die für eine Leiterkühlung vorgesehen sind, kann durch einen geeigneten Aufbau der Kabelanlage ein Eigenumlauf des Kühlwassers erreicht werden. Da in den Kühlwasserrückführungsrohren eine Abkühlung des Wassers stattfindet, ergibt sich eine Eigenkühlung des Kabels. Diese eingekühlten Kabel können ohne Pumpen und Kühlstationen Leistungen übertragen, die grösser sind als diejenigen bei natürlicher Kühlung [1...4]. Das Ziel beim Entwurf einer solchen Kabelanlage ist es, eine Antriebskraft zu erhalten, die eine solche Strömungsgeschwindigkeit des Kühlwassers im Kabel bewirkt, dass eine hinreichende Kühlung des Kabels erreicht wird und trotzdem zulässige Grenztemperaturen in den Endverschlüssen nicht überschritten werden. Die bisher zu diesem Thema gemachten Untersuchungen und Aussagen bezogen sich nahezu ausschliesslich auf den stationären Betriebszustand. Entscheidend für den sicheren Betrieb einer solchen Anlage ist jedoch, auch zu wissen, ob das Wasser ohne Pumpen anläuft und wie gross die Wassertemperaturen während des Anlaufs werden.

Im folgenden soll an einer möglichst einfachen Modellanordnung das Berechnungsprinzip für das Anlaufverhalten des Wassers in einem Kabel mit Eigenkühlung erläutert werden. In einem Vergleich mit Versuchsergebnissen einer komplizierteren Anordnung wird gezeigt, wie gut die Berechnungsergebnisse die tatsächlichen Verhältnisse beschreiben.

2. Modellanordnung und Berechnungsansatz

In Figur 1 ist eine möglichst einfache Anlagenkonzeption, die zur Eigenkühlung herangezogen werden könnte, einphasig skizziert. An den

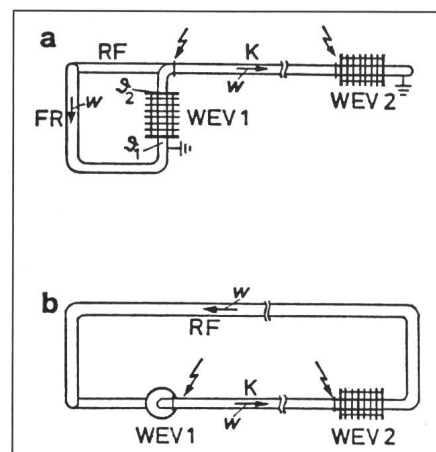


Fig. 1 Skizze des einphasigen hydraulischen Modellkreislaufes

Die Kabelendverschlüsse sind der Übersichtlichkeit wegen nicht gezeichnet worden.

WEV1 Eingangswasserendverschluss
WEV2 Ausgangswasserendverschluss
K Kabel
RF Rückführrohr
FR Fallrohr
W Wassergeschwindigkeit
a Seitenansicht
b Draufsicht

senkrecht stehenden Eingangswasserendverschluss (WEV1) ist das waagrecht liegende Kabel (K) mit dem Ausgangswasserendverschluss (WEV2) angeschlossen. Das ebenfalls waagrecht liegende Rückführrohr (RF) verbindet zusammen mit dem Fallrohr (FR) die Anlage zu einem geschlossenen Wasserkreislauf. Wird das Kabel an Spannung gelegt (Blitzsymbole), so fliesst Strom durch das Wasser in den Wasserendverschlüssen. Das Wasser erwärmt sich, wird im Wasserendverschluss WEV1 leichter als im Fallrohr und setzt sich in Richtung der eingezeichneten Geschwindigkeitspfeile in Bewegung. Das Wasser im Ausgangswasserendverschluss WEV2 erwärmt sich in gleicher Weise, trägt aber, da der Wasserendverschluss waagrecht liegt, zum Antrieb nicht bei. Im Rückführrohr kühlt das Wasser ab. Für die Berechnung wird eine so starke

Adresse des Autors

Dipl. Ing. U. Adolph, Universität-Gesamthochschule Duisburg, Fachgebiet Elektrische Energieübertragung, Postfach 1016 29, D-4100 Duisburg.

Kühlung vorausgesetzt, dass die Wassertemperatur im Fallrohr für alle Zeiträume konstant bleibt. Im folgenden werden nur die Temperaturverteilungen und -verläufe am Wasserendverschluss WEV1 betrachtet, da diese massgeblich den Antrieb bestimmen und die Temperatur vorgeben, mit der das Wasser in das Kabel hineinfliesst. Zur Bestimmung des Anlaufverhaltens des Wassers in der Modellanordnung wurden die folgenden vereinfachenden Annahmen und Voraussetzungen getroffen:

- die Wasserendverschlüsse sind wärmedicht,
- das Wasser strömt nur in Richtung der Rohrachse, das heisst, es treten keine Verwirbelungen auf,
- es wird nur im Wasserendverschluss WEV1 mit der temperaturabhängigen Dichte gerechnet,
- die Temperatur in den Fallrohren und damit die Temperatur am Fuss des Wasserendverschlusses WEV1 sind konstant.

Der Strömungsvorgang in den Rohren kann dann durch zwei Gleichungen beschrieben werden. Einmal durch eine Bewegungsgleichung (1), die den Zusammenhang zwischen dem Antriebsdruck und den Druckverlusten, die durch Massenbeschleunigung und Reibung entstehen, beschreibt. Zum zweiten eine Energiegleichung (2), die die Temperaturänderung im betrachteten Volumen der Wasserendverschlüsse angibt.

$$g \cdot h \cdot (\rho(\vartheta_1) - \rho(\vartheta)) = \rho(\bar{\vartheta}) \cdot l \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\lambda(w)}{2 \cdot d} \cdot w(t)^2 \right) \quad (1)$$

$$\rho(\vartheta) \cdot c \cdot \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial t} + w \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) = \frac{dP}{dV} \quad (2)$$

In den Gl. (1) und (2) bedeuten

- g Erdbeschleunigung
- h wirksame Höhe
- ρ Dichte
- ϑ Temperatur
- $\bar{\vartheta}$ mittlere Temperatur
- w Strömungsgeschwindigkeit
- V Volumen
- l Gesamtlänge (Kabellänge + Länge der RZ + Länge des RF + Länge des WEVs)
- λ Reibungsbeiwert
- d Rohrdurchmesser
- x axiale Koordinate
- c spez. Wärmekapazität
- ϑ_1 Temperatur im Fallrohr
- P zugeführte elektrische Leistung
- t Zeit

Können bei der Bestimmung der stationären Kenngrössen zuerst die

Grössen der Modellanordnung nach Figur 1

Tabelle I

Bauelement	Grösse	Wert	Einheit
Wasserendverschlüsse (WEV1 und WEV2)	Länge	1,23	m
	Hohlkanaldurchmesser	40,00	mm
	Spannung	63,00	kV
Kabel	Länge	400,00	m
	lichter Durchmesser des Kühlmittelrohres	40,00	mm
Rückführungsrohr	Länge	400,00	m
	lichter Durchmesser	40,00	mm
	Grundleitfähigkeit bei 20 °C	5,00	µS/cm
	Starttemperatur	20,00	°C

Strömungsgeschwindigkeit und dann die daraus resultierende Temperaturverteilung berechnet werden, so müssen im transienten Fall, also beim Anlauf des Kühlwassers, Geschwindigkeit, Druck und die Temperaturverteilung als Funktionen der Zeit gleichzeitig berechnet werden.

Zur Berechnung der oben aufgeführten Differentialgleichungen wurde ein Rechnerprogramm auf einem Digitalrechner erstellt, das die Anfangs- und Randbedingungen der jeweiligen Anordnung berücksichtigt. Grundlage des Berechnungsverfahrens ist die Vorstellung, dass zu jedem festgelegten, äquidistanten Zeitschritt eine von der momentanen Strömungsgeschwindigkeit bestimmte Wassermenge am Fuss des Wasserendverschlusses zufliesst, während am Kopf die entsprechende Menge abfliesst. Die jeweils zugeflossene Wassermenge

wird als Wasserschicht mit der Höhe h_i , die für die gesamte Verweilzeit im Wasserendverschluss konstant bleibt, betrachtet. Erst bei der abfliessenden Menge wird es nötig, Bruchteile der entsprechenden Höhe zu berücksichtigen.

Es entsteht somit für jeden Zeitschritt ein Schichtenmodell für die Wassersäule im Wasserendverschluss mit verschieden vielen und verschieden hohen Wasserschichten, die innerhalb einer Schicht die gleiche Temperatur haben. Es wird vorausgesetzt, dass sich diese Schichten nicht vermischen. Zur Lösung der Gleichungen (1) und (2) wurde auf das Verfahren von Heun [5] zurückgegriffen.

3. Temperaturverteilungen und -verläufe

Für die Berechnung der in Figur 1 vorgestellten Modellanordnung sollen die Grössen aus Tabelle I gelten. Die Rechenergebnisse sind in Figur 2 und 3 dargestellt.

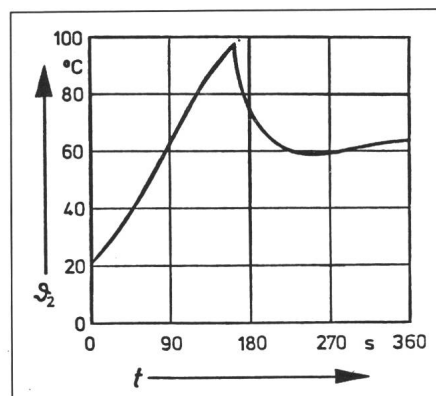


Fig. 2 Verlauf der Temperatur am Kopf des Wasserendverschlusses WEV1
Die Spannung wird zur Zeit null eingeschaltet.

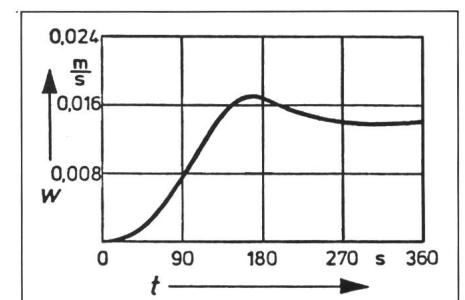


Fig. 3 Strömungsgeschwindigkeit des Kühlwassers in Abhängigkeit von der Zeit

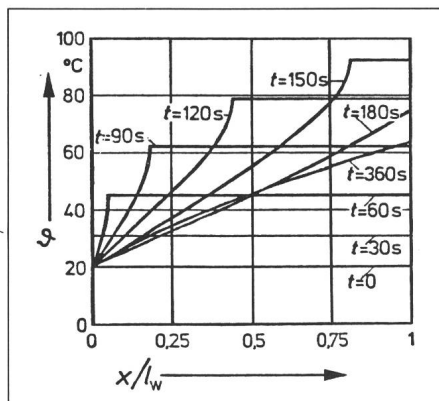


Fig. 4 Temperaturverteilung über dem Wasserendverschluss WEV1 zu verschiedenen Zeitpunkten
 l_w Länge des Wasserendverschlusses WEV1

Bis ungefähr 90 s nach Anschalten der Spannung steigt die Temperatur progressiv wie bei einer stehenden Wassersäule, obwohl sich das Wasser sofort nach dem Einschalten in Bewegung setzt. Während sich bei der stehenden Wassersäule die Potentialverteilung am Wasserendverschluss nicht ändert, hängt sie nun von der Strömungsgeschwindigkeit ab. Dies erklärt das Abbiegen der Temperaturkennlinie. Die Kopftemperatur durchläuft nach ungefähr 160 s ein Maximum von 97,2 °C und sinkt danach sehr steil, um sich auf die stationäre Endgrösse einzuschwingen.

Die Temperaturspitze und das schnelle Sinken der Temperatur können mit Hilfe von Figur 4 erläutert werden, das die Temperaturverteilung längs des Wasserendverschlusses zu verschiedenen Zeitpunkten zeigt. Zum Zeitpunkt null ist die Temperatur über dem gesamten Wasserendverschluss gleich. Danach fliesst Wasser mit der Temperatur θ_2 am Kopf des Wasserendverschlusses ab und die gleiche Menge kalten Wassers mit der Temperatur θ_1 am Fuss zu. Das neu zugeflossene Wasser und das im Endverschluss verbleibende Wasser erwärmen sich.

Unter der erwähnten Annahme, dass sich die Wasserschichten bei den niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten nicht miteinander vermischen, «schieben» die unteren, kälteren Wasserschichten im ersten Zeitbereich eine sich gleichmässig über ihre gesamte Höhe erwärmende Wassersäule langsam aus dem Wasserendverschluss hinaus. Die Kopftemperatur steigt bis zu dem Zeitpunkt, an dem der letzte Rest der heissen Wassersäule aus dem Wasserendverschluss gedrückt worden ist, und wird dann von der Temperatur

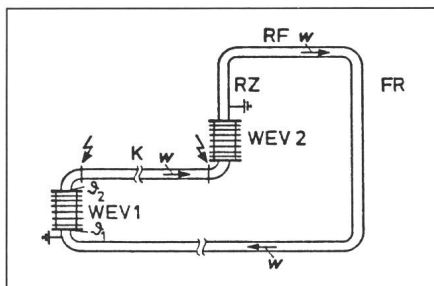


Fig. 5 Skizze des hydraulischen Kreislaufes der Versuchsanordnung aus [1]
 Die Kabelendverschlüsse sind der Übersichtlichkeit wegen nicht eingezeichnet worden.

WEV1 Eingangswasserendverschluss
 WEV2 Ausgangswasserendverschluss
 K Kabel
 RZ Rohrzusatzlänge
 RF Rückführungsrohr
 FR Fallrohr

der nachfolgenden Wasserschicht bestimmt, wobei sich die Charakteristik der Temperaturverteilung ändert.

Die Temperatur zeigt bei 360 s dieselbe Verteilung wie sie auch in [1] für den stationären Fall bestimmt wurde.

4. Vergleich von Berechnungsergebnissen mit Messergebnissen

In [1, Seite 940, Bild 6] wurde eine bestimmte Versuchsanordnung vorgestellt. Zur Nachrechnung des Temperaturverlaufes am Kopf des Wasserendverschlusses dieser Versuchsanordnung wurde die in Figur 5 skizzierte

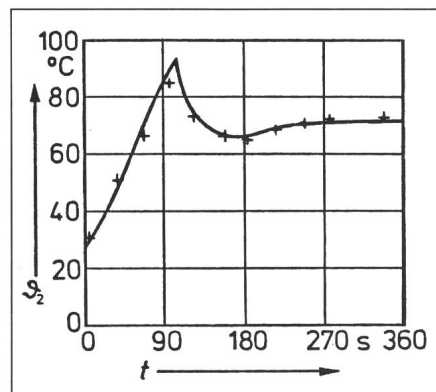


Fig. 6 Gerechneter Temperaturverlauf im Vergleich zu den Messergebnissen am Kopf des Wasserendverschlusses WEV1 in der Anordnung nach Figur 5

Gerechnet: durchgezogene Kennlinie + Messpunkte

Anordnung gewählt. Sie besteht aus den beiden senkrecht stehenden Wasserendverschlüssen, die hier beide zum Antrieb beitragen, einer thermisch isolierten Rohrzusatzlänge (RZ), dem Kabel (K) und dem Rückführungsrohr (RF) einschliesslich Fallrohr (FR), das den Wasserkreislauf schliesst. Im Gegensatz zu der Anordnung in Figur 1 trägt hier neben den beiden Wasserendverschlüssen auch die Rohrzusatzlänge zum Antrieb bei.

Für die Berechnung sollen die Grössen aus Tabelle II gelten. Die Berechnungsergebnisse sind zusammen mit den Messergebnissen in Figur 6 aufge-

Grössen der Modellanordnung nach Figur 5

Tabelle II

Bauelement	Grösse	Wert	Einheit
Wasserendverschlüsse (WEV1 und WEV2)	Länge	1,23	m
	Hohlkanaldurchmesser	40,00	mm
	Spannung	65,00	kV
Kabel	Länge	125,00	m
	lichter Durchmesser des Kühlmittelrohres	30,50	mm
Rohrzusatzlänge	Länge	1,20	m
	lichter Durchmesser	40,00	mm
Rückführungsrohr	Länge	125,00	m
	lichter Durchmesser	40,00	mm
	Grundleitfähigkeit bei 27 °C	6,20	$\mu\text{S/cm}$
	Starttemperatur	27,00	°C

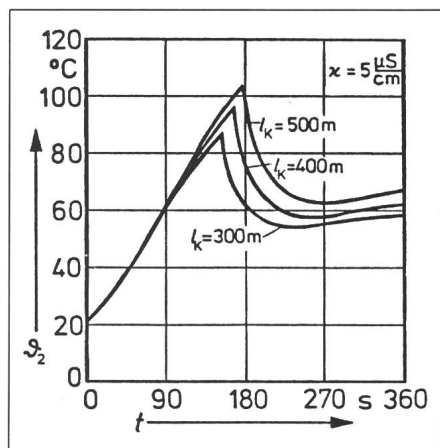


Fig. 7 Temperaturverlauf am Kopf des Wasserendverschlusses WEV1 nach Figur 1 für drei verschiedene Kühlabschnittslängen

tragen. Es zeigt sich, dass trotz der Vereinfachungen der Rechnung Mess- und Rechenergebnisse dicht beieinanderliegen.

5. Möglichkeiten der Temperaturbeeinflussung

Im folgenden werden zwei Größen verändert, die den Verlauf der Kopf-temperatur am Wasserendverschluss WEV1 beeinflussen. Figur 7 zeigt den Temperaturverlauf bei Veränderung der Kühlabschnittslängen (Länge des Kabels zwischen Kühlwasserzuführung und -abführung) bei sonst gleicher Anordnung wie in Figur 1. Physikalisch bedeutet eine Verlängerung der Kühlabschnittslänge eine grössere zu beschleunigende Masse des Wassers sowie eine Vergrößerung des Strömungswiderstandes. Dadurch bedingt stellen sich kleinere Strömungsgeschwindigkeiten ein als bei kürzeren Kühlabschnittslängen. Der Anstieg der Kopf-temperatur wird dadurch im

ersten Zeitbereich nicht sonderlich beeinflusst, wohl aber die maximale Temperatur und das Abklingen der Temperatur.

In Figur 8 ist bei konstanter Kühlabschnittslänge die Grundleitfähigkeit des Kühlwassers verändert worden. Dies bedeutet eine Veränderung des elektrischen Widerstandes der Wassersäule im Wasserendverschluss. Es ist hierbei sowohl ein anderer Anstieg als auch ein anderes Abklingen der Temperatur zu erkennen.

Ein Verändern des Strömungsquerschnittes oder der Länge des Wasserendverschlusses hätte bei sonst gleichen Größen ähnlichen Einfluss auf den Temperaturverlauf, da diese Parameteränderungen eine Änderung des elektrischen Widerstandes im Wasserendverschluss bewirken.

6. Folgerungen

An einem Beispiel konnte gezeigt werden, dass trotz der gemachten vereinfachenden Annahmen und Voraussetzungen Berechnungs- und Messergebnisse dicht beieinander liegen. Das heisst, dass das Anlaufverhalten des Kühlwassers in Kabeln mit Eigenkühlung mit dem vorgestellten Berechnungsverfahren gut beschrieben werden kann.

Die Berechnungen für verschiedene Grundleitfähigkeiten und Kühlabschnittslängen zeigen, dass bei bestimmten Anordnungen beim Anlauf kurzzeitig sehr hohe Temperaturen auftreten können. Die daraus resultierende Gefahr der Überhitzung für die Wasserendverschlüsse und das nachfolgende Kabel müsste im Einzelfall diskutiert werden. Eine Herabsetzung der Temperaturspitzen lässt sich jedoch in jedem Fall durch geeignete

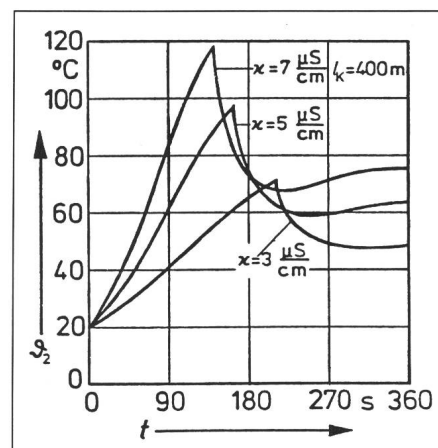


Fig. 8 Temperaturverlauf am Kopf des Wasserendverschlusses WEV1 nach Figur 1 für drei verschiedene Grundleitfähigkeiten

Wahl der Kühlabschnittslängen, der Grundleitfähigkeit oder durch konstruktive Massnahmen [4] finden. Man muss sich hierbei das Prinzip des Eigenumlaufes vor Augen halten, denn je grösser die Temperaturdifferenzen zwischen dem kälteren Fallrohr und dem heissen Wasserendverschluss WEV1 zusammen mit der heissen Rohrzusatzlänge ist, desto besser ist der Antrieb im Kreislauf, das heisst, die hohen Temperaturen treten nur kurzzeitig auf.

Literatur

- [1] G. Hülsken: Zwangskühlung von Kabeln ohne Pumpen. Elektrizitätswirtsch. 81(1982)26, S. 931...936.
- [2] W. Rasquin, G. Hülsken und B. Harjes: Massnahmen zur Eigensicherung von Kabeln mit innerer Wasserkühlung. Elektrizitätswirtsch. 81(1982)26, S. 937...941.
- [3] G. Hülsken und W. Rasquin: Eigenkühlung - eine neue Kühlart von Kabeln. Bull. SEV/VSE 75(1984)5, S. 260...265.
- [4] W. Rasquin: Ausbaumöglichkeiten und -grenzen von Kabeln mit Eigenkühlung. Elektrizitätswirtsch. 83(1984)26, S. 1118...1123.
- [5] G. Jordan-Engeln und F. Reutter: Numerische Mathematik für Ingenieure. 2. Auflage. - BI-Hochschultaschenbücher Band 104 - Mannheim, Bibliographisches Institut, 1978.