**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:** 75 (1984)

**Heft:** 5

**Artikel:** Mögliche Überbeanspruchung von HGÜ-Kabeln im Übergangsbereich zu den Endverschlüssen

**Autor:** Honerla, J.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-904370

**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:** 13.07.2025

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

2.222 ✓

# Mögliche Überbeanspruchung von HGÜ-Kabeln im Übergangsbereich zu den Endverschlüssen

J. Honerla

*Durch die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit sind die elektrischen Beanspruchungen von HGÜ-Kabeln abhängig von der Temperaturverteilung. Mit Hilfe numerischer Feldberechnungsverfahren wird nachgewiesen, dass im Übergangsbereich zu den Endverschlüssen durch achsiale Wärmeströme Feldstärken auftreten können, die weit über denjenigen liegen, die sich auf analytischem Wege bei Berücksichtigung ausschliesslich radialer Wärmeströme ergeben.*

*La conductivité électrique dépendant de la température, les sollicitations électriques des câbles de transport d'énergie en courant continu sous haute tension dépendent de la répartition de la température. Par calculation numérique du champ, on prouve que, dans la zone de transition aux boîtes d'extrémité, des courants thermiques axiaux peuvent donner lieu à des intensités de champ excédant grandement celles qui résultent d'études analytiques ne tenant compte que des courants thermiques radiaux.*

**Adresse des Autors**

Dipl.-Ing. *Jörg Honerla*, Universität Duisburg, Fachbereich Elektrotechnik, Elektrische Energieübertragung, Bismarckstrasse 81, D-4100 Duisburg 1.

## 1. Einleitung

Bei Kabeln für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ-Kabeln) bestimmen neben der Spannung nicht nur wie bei Drehstromkabeln die geometrischen Abmessungen, sondern auch die Leitfähigkeit des Isoliermaterials die elektrische Feldstärke in der elektrischen Isolierung. Bei Kabeln mit einer getränkten Papierisolierung (Massekabel, Ölkabel) ist die Leitfähigkeit eine Grösse, die stark von der Temperatur und in geringerem Mass von der elektrischen Feldstärke beeinflusst wird. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit ist die elektrische Feldverteilung abhängig von den Stromwärmeverlusten.

Zur Berechnung der sich in HGÜ-Kabeln im erwärmten Zustand einstellenden elektrischen Felder wird üblicherweise angenommen, dass die Kabeloberfläche eine Isotherme darstellt und die Verlustwärme ausschliesslich in radialer Richtung aus dem Kabel abfliesst. Im folgenden soll gezeigt werden, dass Kabelabschnitte in der Nähe der Endverschlüsse von elektrischen Feldstärken beansprucht werden können, die weit über denjenigen liegen, die sich mit Hilfe der Annahme nur radialer Wärmeströmung berechnen lassen. Der Grund dafür liegt in den in der Nähe der Endverschlüsse auftretenden Wärmelängsströmungen, die hauptsächlich im Leiter und im Mantel des Kabels auftreten und unterschiedliche Temperaturen in der Isolierung in achsialer Richtung hervorrufen.

## 2. Analytische Verfahren zur Feldberechnung

Unter der Voraussetzung, dass die Kabeloberfläche eine Isotherme ist, kann bei geeigneten Ansätzen für die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Temperatur und der Feldstärke eine geschlossene analytische Beziehung für die Feldstärke als Funktion des Radius angegeben werden. Wird aus der Vielzahl von Näherungen, die zur Beschreibung der Leitfähigkeit als Funktion der Temperatur und der Feldstärke angegeben werden, der Ansatz

$$\kappa = \kappa_0 (E/E_0)^\gamma \exp(\alpha\vartheta) \qquad (1)$$

ausgewählt, so kann für das elektrische Feld in Kabeln mit zylindersymmetrischem Aufbau ein geschlossener Ausdruck gefunden werden [1]. Dieser lautet:

$$E(r) = \beta U / [r_i \cdot [(r_a/r_i)^\beta - 1]] (r/r_i)^{\beta-1} \qquad (2)$$

mit

$$\beta = (\alpha P_V' / (2\pi\lambda) + \gamma)/(\gamma + 1) \qquad (3)$$

In diesen Gleichungen bedeuten

- $\kappa$ Leitfähigkeit des Isoliermaterials
- $\kappa_0$ Ausgangsleitfähigkeit des Isoliermaterials
- $E$ Feldstärke
- $E_0$ Bezugsfeldstärke
- $\gamma$ Feldstärkekoeffizient
- $\alpha$ Temperaturkoeffizient
- $\vartheta$ Temperatur
- $U$ Spannung
- $r$ Radius
- $r_a$ Aussenradius der Isolierung
- $r_i$ Innenradius der Isolierung
- $P_V'$ längenbezogene Stromwärmeverluste
- $\lambda$ thermische Leitfähigkeit der Isolierung

Gleichung (2) zeigt, dass nicht nur die Höhe der Feldstärke an jedem Ort in der Isolierung, sondern auch der Ort mit der höchsten Feldstärke von der Belastung des Kabels abhängig sind. Drei Fälle sind dabei zu unterscheiden:

a) $\beta < 1$ Die höchste Feldstärke tritt am Leiter auf.

b) $\beta = 1$ Die Feldstärke in der Isolierung ist überall gleich.
c) $\beta > 1$ Die höchste Feldstärke tritt am Mantel auf.

Die höchstzulässige Betriebsfeldstärke, die im Falle von $\beta > 1$ am Mantel des Kabels auftritt, stellt neben der höchstzulässigen Isolierungstemperatur eine Grenze für die Übertragungsfähigkeit des Kabels dar, da die Stromwärmeverluste eine bestimmte Grenze nicht überschreiten dürfen, damit die Feldstärke am Mantel nicht über die angegebenen Grenzen hinaus ansteigt.

Für ein Kabel mit den Abmessungen aus Tabelle I tritt bei Verlusten von 24,5 W/m gerade die hier angesetzte höchstzulässige Betriebsfeldstärke von 30 kV/mm am Mantel auf. Ziel der folgenden Untersuchungen soll sein, die elektrischen Beanspruchungen der Kabelisolierungen in der Nähe der Endverschlüsse bei einer Belastung mit einem Strom zu untersuchen, bei dem im ungestörten Wärmefeld die obengenannten Verluste entstehen.

*Zusammenstellung der angenommenen Kabeldaten* Tabelle I

| | |
|---|---|
| Leiterquerschnitt | 240 mm² |
| Innendurchmesser der Isolierung | 20 mm |
| Isolierungsdicke | 10 mm |
| Bleimanteldicke | 3 mm |
| Korrosionsschutzdicke | 5 mm |
| Temperaturkoeffizient der elektrischen Leitfähigkeit | 0,105 1/K |
| Feldstärkekoeffizient der elektrischen Leitfähigkeit | 0 |
| höchstzulässige Betriebsfeldstärke | 30 kV/mm |
| Spannung | 200 kV |

Da in diesen Berechnungen auch der thermische Einfluss des Endverschlusses mit seiner relativ komplizierten Geometrie berücksichtigt werden musste, kamen für diese Untersuchungen nur numerische Verfahren in Betracht.

## 3. Numerische Verfahren zur Feldberechnung

Prinzipiell ist es möglich, die gleichen numerischen Verfahren zur Berechnung einerseits der elektrischen und anderseits der thermischen Felder zu verwenden. Es ist jedoch bei der Auswahl des Verfahrens darauf zu achten, dass die verschiedenen Berechnungsverfahren unterschiedlich gut in der Lage sind, die in diesem Fall geforderten Randbedingungen und Materialeigenschaften zu berücksichtigen. So musste vom anzuwendenden Verfahren gefordert werden, dass es in der Lage ist, eine Vielzahl von unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten bei der thermischen Feldberechnung zu berücksichtigen. Gleiche Forderungen sind auch bei der Berechnung der elektrischen Felder zu stellen, da durch die Temperaturabhängigkeit eine Ortsabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit entsteht.

Von den meistgebräuchlichen Verfahren zur Berechnung elektrischer und thermischer Felder – Finite Differenzen-, Finite-Elemente- und Ersatzladungsverfahren – ist das Finite-Elemente-Verfahren [2] für diese Untersuchungen am besten geeignet. Zum einen lassen sich bei diesem Verfahren Wärmequellendichten sehr einfach berücksichtigen, der zusätzliche Programmieraufwand dafür ist nahezu vernachlässigbar, zum anderen ist es durch die Zuordnung der Materialeigenschaften zu den einzelnen Elementen möglich, eine Anzahl von unterschiedlichen Materialeigenschaften zu berücksichtigen, die nur von der Anzahl der Elemente und damit von der Diskretisierungsschrittweite abhängt. Zwar können auch Finite-Differenzen-Verfahren zur Berechnung solcher Felder herangezogen werden, jedoch ist hierbei der programmtechnische Aufwand zur Berücksichtigung einer grossen Anzahl unterschiedlicher Materialeigenschaften grösser.

Ersatzladungsverfahren sind demgegenüber nur unter sehr einschränkenden Randbedingungen in der Lage, die Ortsabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit zu berücksichtigen. Nur wenn Äquipotentiallinien und Isothermen aufeinanderfallen und sich daher eine Beziehung zwischen der Temperatur und dem Potential und damit zwischen der Leitfähigkeit und dem Potential angeben lässt, könnte analog dem Verfahren zur Berechnung thermischer Felder bei temperaturabhängiger Leitfähigkeit [3], das zur Berechnung thermischer Felder in Kabelgräben bei Berücksichtigung von Bodenaustrocknung verwendet wird [4], das elektrische Feld mit Hilfe von Ersatzladungsverfahren berechnet werden. Aus diesem Grund können im allgemeinen Ersatzladungsverfahren nicht zur Untersuchung von elektrischen Feldern bei temperaturabhängiger Leitfähigkeit herangezogen werden.

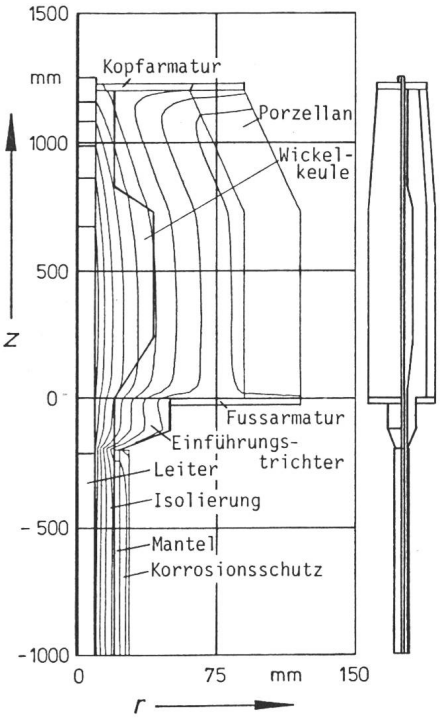


**Fig. 1 Isothermen in einem Endverschluss für ein Kabel mit den Daten aus Tabelle I bei Leiterverlusten, die im Kabel eine Mantelfeldstärke von 30 kV/mm bewirken**

Temperaturdifferenz zwischen zwei Isothermen: 5 K. In der rechten Teilabbildung ist der Endverschluss massstabgerecht abgebildet. In der linken Teilabbildung ist die Radialkomponente gespreizt.

Insbesondere die einfache Berücksichtigung ortsabhängiger Leitfähigkeiten führte dazu, dass ein auf der Finite-Elemente-Methode basierendes Rechenprogramm entwickelt wurde, mit dem die folgenden Ergebnisse gewonnen wurden.

### *3.1 Thermisches Feld in einem Kabelendverschluss*

Figur 1 zeigt das thermische Feld in einem Endverschluss für ein Kabel mit den Daten aus Tabelle I. In der rechten Teilabbildung ist der Endverschluss massstäblich, in der linken Abbildung die Radialkomponente gespreizt dargestellt. Bei den Berechnungen wurde vereinfachend angenommen, dass sowohl die Umgebungstemperatur als auch der Wärmeübergangskoeffizient auf der ganzen Kabel- und Endverschlussoberfläche gleich sind. Die Höhe der Umgebungstemperatur besitzt bei den hier gewählten Näherungen keinen Einfluss auf die Verteilung des elektrischen Feldes. Dies gilt jedoch nicht für die Höhe des Wärmeübergangskoeffizienten. Durch Änderung des Wärmeübergangskoeffizien-

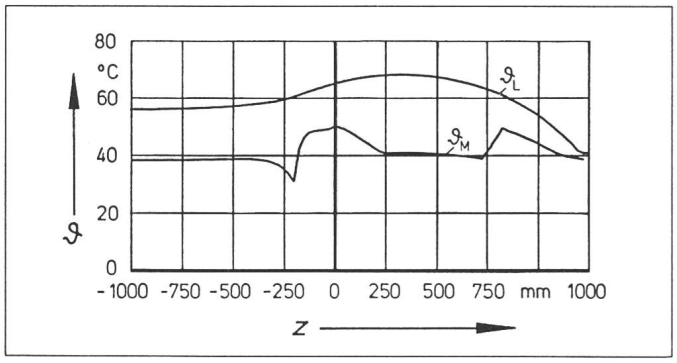


**Fig. 2 Oberflächentemperatur des Leiters ($\theta_L$) und des Mantels bzw. der Keule ($\theta_M$) als Funktionen des achsialen Ortes im Endverschluss nach Figur 1**

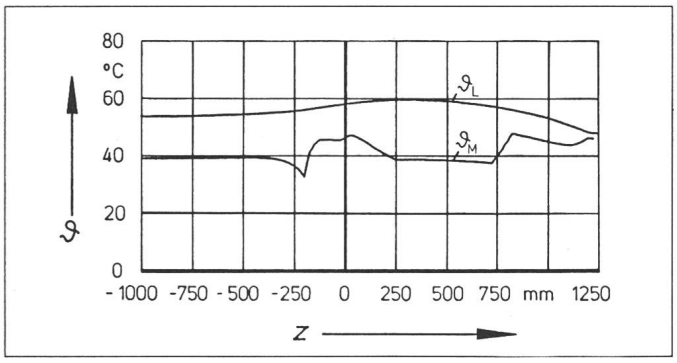


**Fig. 3 Leiter- und Mantel- bzw. Keulenoberflächentemperaturen als Funktionen des achsialen Ortes in einem Endverschluss für ein Kabel mit einem Leiterquerschnitt von 1000 mm²**

ten in weiten Grenzen konnte aber nachgewiesen werden, dass dieser nur einen sehr geringen Einfluss auf das elektrische Feld besitzt.

Figur 2 zeigt die Leiter- und Mantel- bzw. Oberflächentemperaturen auf der Wickelkeule. Um den Einfluss des Leiterquerschnittes auf die Temperaturverteilung zu ermitteln, wurde zusätzlich das thermische Feld in einem Endverschluss berechnet, der für ein Kabel mit einem Leiterquerschnitt von 1000 mm² bemessen ist. Die in diesem Fall berechneten Temperaturen sind in Figur 3 dargestellt. Deutlich ist ein wesentlich geringeres Ansteigen der Leitertemperatur auf der Höhe der Wickelkeule als im Falle des kleineren Leiterquerschnittes zu erkennen. Dafür steigt die Temperatur des Endverschlusskopfes. Beides ist auf die beim Leiter mit dem grösseren Querschnitt höhere thermische Längsleitfähigkeit zurückzuführen. Durch sie kann mehr Wärme in achsialer Richtung transportiert werden, was einen Temperaturausgleich in dieser Richtung zur Folge hat. Beide Bilder lassen die Stellen besonders interessant erscheinen, an der die Kabelmäntel enden und mit den Einführungstrichtern verlötet sind ($z = -200$ mm). Über die Einführungstrichter sind die Metallmäntel der Kabel thermisch gut leitend mit den metallischen Grundplatten der Endverschlüsse verbunden. Die Grundplatten wirken wie Wärmesenken und entziehen den Kabelmänteln und damit auch den Isolierungen an diesen Stellen Wärme. Dies führt in den Isolierungen zu einer örtlich begrenzten Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit und damit zu einer Erhöhung der Feldstärke.

Die Höhe dieser Feldstärkeanhebungen soll durch Berechnungen des elektrischen Feldes an diesen Stellen ermittelt werden.

### *3.2 Einfluss des Einführungstrichters auf das elektrische Feld im Kabelinnern*

Mit den Ergebnissen der Temperaturfeldberechnungen wurden die elektrischen Leitfähigkeiten und darauf aufbauend das elektrische Feld in den Kabelisolierungen bei Gleichspannungsbeanspruchung berechnet. In Figur 4 sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt.

Die Figuren 4a und 4b zeigen noch einmal die Temperaturen am Leiter und am Mantel im Bereich, wo der Bleimantel des Kabels endet und mit dem Einführungstrichter verlötet ist. In Figur 4c und 4d sind die elektrischen Feldstärken in der Isolierung des Kabels angegeben. Aus Figur 4c ist zu entnehmen, dass bei kleinem Leiterquerschnitt die Feldstärke am Aussenrand der Isolierung von 30 kV/mm, die als höchstzulässige Betriebsfeldstärke vorgegeben wurde, um 40% bis auf 42 kV/mm ansteigt. Im Falle des Kabels mit dem grösseren Leiterquerschnitt (Fig. 4d) ist ein geringerer Anstieg auf 40,5 kV/mm zu beobachten. Diese Feldstärkeanhebungen sind ausschliesslich durch die am Bleimantelende auftretenden Veränderungen in den elektrischen Leitfähigkeiten hervorgerufen, da die feldbegrenzende Schicht an dieser Stelle nicht unterbrochen ist.

Dass die Feldstärkeanhebung beim Kabel mit dem grösseren Querschnitt kleiner ausfällt, ist mit der Temperaturverteilung am Bleimantelende zu erklären. Zum einen hat der Bleimantel im Falle des grösseren Leiterquerschnittes einen grösseren Durchmesser und damit bei gleicher Dicke einen grösseren Querschnitt und eine grössere Wärmeleitfähigkeit in Längsrichtung als der Bleimantel im Kabel mit kleinerem Leiterdurchmesser. Dadurch kann mehr Wärme zum

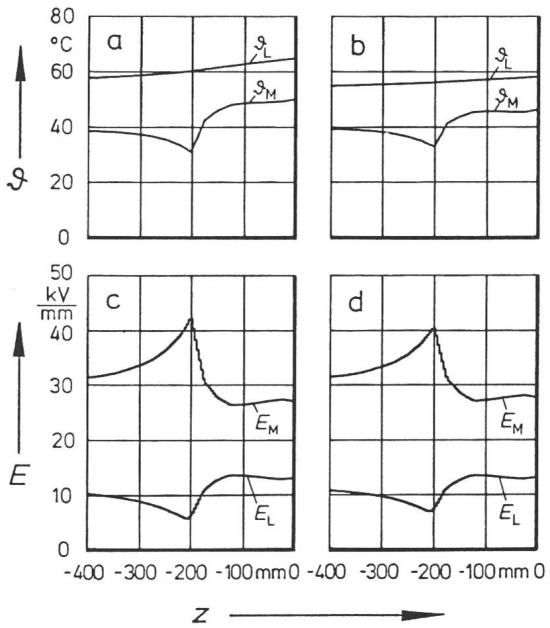


**Fig. 4**
**Temperaturen und elektrische Radialfeldstärken am Leiter und am Mantel als Funktionen des achsialen Ortes im Bereich des Einführungstrichters bei Verlusten, die im ungestörten Zustand eine Mantelfeldstärke von 30 kV/mm bewirken**

a und c Kabel mit einem Leiterquerschnitt von 240 mm²
b und d Kabel mit einem Leiterquerschnitt von 1000 mm²

Bleimantelende transportiert werden, was zur Folge hat, dass die Temperatur an dieser Stelle etwas höher liegt als im ersten Fall. Zum anderen ist an dieser Stelle der Temperaturanstieg im grossen Leiter wegen dessen besserer Wärmelängsleitung geringer. Beides führt dazu, dass der Anstieg der Temperaturdifferenz zwischen Leiter und Mantel an der betrachteten Stelle beim Kabel mit dem grösseren Leiterquerschnitt geringer ausfällt als beim Kabel mit dem kleineren Leiterquerschnitt. Die kleinere Temperaturdifferenz zwischen Leiter und Mantel hat eine gleichmässigere Leitfähigkeitsverteilung und damit eine geringere Feldstärkeanhebung zur Folge.

Eine Verringerung der aufgrund der Temperaturverteilung hervorgerufenen Feldstärkeüberhöhungen kann durch Änderung der thermischen Verhältnisse erfolgen. Dazu müsste der Einführungstrichter des Endverschlusses mit einer thermischen Isolierung ausgerüstet werden, die einen Widerstandsbelag in ähnlicher Höhe wie der Korrosionsschutz besitzen sollte. Damit könnte die kühlende Wirkung des Einführungstrichters und der Grundplatte des Endverschlusses verringert werden. Trotzdem wird es in diesem Bereich oder in dessen Nähe immer elektrische Feldstärken geben, die über den analytisch berechneten liegen.

**Literatur**


[1] *C.K. Eoll:* Theory of stress distribution in insulation of high voltage DC cables. Part I/II. IEEE Trans. EI 10(1975)1, p. 27...35 + No. 2, p. 49...54.

[2] *O.C. Zienkiewicz:* The finite element method in engineering science. London, McGraw-Hill, 1971.

[3] *E. Eckert:* Einführung in den Wärme- und Stoffaustausch. Berlin, Springer-Verlag, 1949.

[4] *H. Brakelmann:* Temperaturfelder im Erdboden verlegter Energiekabel. ETZ-Archiv 1(1979)6, S. 173...177.