

**Zeitschrift:** Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES

**Band:** 100 (2009)

**Heft:** 1

**Artikel:** Thermische Grenzkapazität von Kabelsystemen berechnen

**Autor:** Schell, Fabian

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-856347>

### **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:** 19.11.2024

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

# Thermische Grenzkapazität von Kabelsystemen berechnen

## Grenzen der etablierten Berechnung, Neuerungen in der IEC 60287 und weiterführende Methoden

Nach mehreren Jahren ohne nennenswerte Neuerungen hat das Thema Kabelbelastbarkeitsrechnung in den Normungsgremien wieder an Bedeutung gewonnen. Mit zunehmender Auslastung der vorhandenen Leitungskapazitäten und einhergehender Verkabelung der Übertragungsnetze rückt nun auch bei den Betreibern die Bestimmung der thermischen Grenzkapazitäten ins Zentrum des Interesses. Der Artikel enthält eine Übersicht über den Stand der Technik der Belastbarkeitsrechnung. Ein detaillierter Bericht steht unter [www.technik-forum.ch](http://www.technik-forum.ch) zum Download bereit [1].

Unterirdische Kabelverbindungen sind neuralgische Abschnitte in elektrischen Übertragungssystemen. Der Trend zu immer längeren Kabeln in der Hoch- und Höchstspannungsebene wirft grundlegende Fragen auf, wie die Kabel in die vorhandenen Netzstrukturen eingebunden werden und

Fabian Schell

wie sie sich auf die Zuverlässigkeit auswirken [2]. Zwei wesentliche Faktoren müssen berücksichtigt werden: Erstens stellen lange Kabeltrassen ausgedehnte Kapazitäten dar mit den daraus resultierenden Konsequenzen hinsichtlich Blindleistungskompensation und Netzstabilität [3]. Zweitens führen Schäden von Kabeln im Betrieb aufgrund der aufwendigen Reparaturprozeduren zu relativ langen Ausfallzeiten.

Der wochenlange Blackout vom 28. Februar 1998 im Stadtzentrum von Auckland wurde durch das thermische Versagen von mehreren Kabelverbindungen ausgelöst – und kostete die Stadt nach offiziellen Schätzungen mehr als 200 Mio. Neuseeländische Dollar (ca. 100 Mio. Euro per 1998) [4]. Die thermische Dimensionierung und Überwachung von Kabeltrassen bedarf also einer besonderen Beachtung.

Ein erdverlegtes Kabel ist während seiner Lebensdauer verschiedenen Gefahren ausgesetzt: Erstens kann die Kabelumgebung austrocknen, wenn das Rückfüllmaterial von schlechter Qualität ist. Dadurch verschlechtert sich die Wärmeleitfähigkeit und das Kabel erhitzt sich stärker, ohne dass dies der Betreiber erkennt, wenn er nicht die

Kabeltemperatur überwacht. Aber auch zusätzliche Bauten in der Umgebung sind ein Risiko für das Kabel, zum Beispiel bei lokal höherer Überdeckung oder zusätzlichen Wärmequellen. Dies können andere Kabel, Gas- oder Fernwärmeleitungen sein.

All diese Faktoren führen zu einer beschleunigten Alterung der Kabelisolation und beanspruchen zusätzlich das Kabelzubehör mechanisch. Beides sind langsame, aber stetige und meist unumkehrbare Prozesse, die letztendlich in lokalen Durchschlägen enden. Um zumindest jene Ausfälle aufgrund von thermischer Überlastung zu vermeiden, ist eine exakte Kenntnis der thermischen Umgebungsbedingungen von Vorteil.

Darüber hinaus stellt die thermische Kabelbelastbarkeitsrechnung ein wichtiges

Hilfsmittel für die Umsetzung der seit 1999 in der Schweiz geltenden Verordnung über den Schutz nicht ionisierender Strahlung (NISV) dar. Diese legt Grenzwerte für die elektromagnetische Strahlung fest, die beim thermischen Grenzstrom gelten (auch Bemessungs- oder Nennstrom genannt).

### Verluste im Drahtschirm

Die Verluste in den Metallmänteln von Kabeln können einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtbelastbarkeit des Kabelsystems haben. Eine Überarbeitung der bisherigen, konservativen Methode nach IEC 60287 erschien daher überfällig, insbesondere da die gängigen Kabelkonstruktionen mit Drahtschirmen (Bild 1) nicht ausreichend berücksichtigt wurden.

Im Jahr 1999 veröffentlichten Dejean, Zaccone et al. [5] Untersuchungen an EPR-Kabeln mit einfachem Drahtschirm. Aus den Experimenten bildeten sie ein analytisches Modell für die Berechnung der Schirmverluste auf Basis des exakten Schirmaufbaus, also von Drahtdurchmesser und -anzahl, Schlaglänge, der Dimension der Gegenwendel und der Phasenabstände. Die wesentliche Erkenntnis dieser Veröffentlichung ist, dass der in IEC 60287 beschriebene Algorithmus zu viel zu pessimistischen Annahmen bezüglich der Schirmverluste und damit zur Überdimensionierung des Kabelleiters führt.



Bild 1 Kabelkonstruktionen mit Drahtschirm und Folie (a) und solidem Glattmantel (b).

Diese Erkenntnisse wurden von einer Arbeitsgruppe des Cigré aufgegriffen und im Juni 2005 in einem technischen Bericht veröffentlicht [6]. Darin wurden die Schirmverluste für Kompositenschirme, im Beispiel ein Aluminium-Schichtmantel, mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) quantifiziert. Die Arbeitsgruppe kam ebenfalls zum Schluss, dass die effektiven Drahtschirmverluste etwa eine Zehnerpotenz kleiner sind als nach der analytischen IEC-Methode (Tabelle). Die Ergebnisse fanden 2006 Eingang in eine zusätzliche Fussnote in der neuen Ausgabe der IEC 60287 [7]. Darin wird explizit erwähnt, dass die Verluste im Drahtschirm für bestimmte Kabelkonstruktionen, die lediglich den Drahtschirm und ein Ausgleichsband oder eine laminierte Folie enthalten, vernachlässigt werden können. Ausgenommen davon sind jedoch weiterhin Kombischirme mit dicken Metallmänteln, zum Beispiel Bleimänteln, insbesondere wenn die Drahtdurchmesser aufgrund einer hohen Kurzschlussstromanforderung eine signifikante Grösse erreichen.

### Kabelkreuzungen

Eine weitere Neuerung trat mit der Erweiterung der IEC 60287 um Teil 3-3 [8] in Kraft. Darin wird eine Methode zur Berechnung der Kabelbelastbarkeit von zwei sich in beliebigem Winkel kreuzenden Kabelsystemen beschrieben. Im Gegensatz zur Berechnung einer punktuellen Wärmequelle nach IEC 60287-1-1, bei der die Temperaturdifferenz lediglich um die Temperatur der Wärmequelle reduziert wird, kann nach der neuen Methode der exakte longitudinale Temperaturverlauf berechnet werden.

Wenn sich zwei in unterschiedlicher Tiefe verlegte Kabelsysteme kreuzen, wird für jedes ein Reduktionsfaktor (engl. Derating Factor) in Bezug auf die Belastbarkeit

	Berechnung nach IEC-Methode	Berechnung nach [5]
Kabeltyp	XDRCU-ALT 1×800 mm <sup>2</sup> 220 kV	XDRCU-ALT 1×800 mm <sup>2</sup> 220 kV
Verlegeart	Direkt, flach	Direkt, flach
Erdung	Einseitig	Einseitig
Schirmverluste	2,1 W/m	0,459 W/m
Verlustfaktor $\lambda_1''$	0,059 W/m	0,009 W/m
Maximale Dauerstrombelastbarkeit bei 90 °C	1074	1315 (+ 22%)

Tabelle 1 Gegenüberstellung der Verluste.

definiert. Dieser Reduktionsfaktor ist abhängig von den Verlegetiefen  $L_1$  und  $L_2$ , dem Kreuzungswinkel  $\beta$ , der Beeinflussungszone und der Strombelastbarkeit im unbeeinflussten Zustand (Bild 2). Dabei wird unterschieden zwischen einer *einfachen* Kreuzung durch ein 3-adriges Kabel oder beispielsweise ein Fernwärmerohr und einer *multiplen* Kreuzung, beispielsweise durch drei 1-adrige Kabel. Ausgehend von der Kabelbelastbarkeit im unbeeinflussten Zustand wird dann in einem iterativen Verfahren die Temperaturerhöhung des Leiters innerhalb der Beeinflussungszone berechnet (Bild 3). Dazu wird erst der Reduktionsfaktor des einen Systems ermittelt und dann mit diesem reduzierten zulässigen Strom die Belastbarkeit des zweiten Kabelsystems bestimmt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis sich ein stabiler Zustand zwischen den beiden Systemen ergibt.

Ein Beispiel aus der Praxis: Bei einem Kraftwerk waren die Leiterquerschnitte der drei Kraftwerksausleitungen zu bestimmen. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten musste eine der drei Verbindungen die beiden anderen in einem Winkel von 45° bis 90° kreuzen. Aufgrund der grösseren Verlegetiefe wurde entschieden, beim kreuzen-

den System von Dreieck- auf Flachverlegung überzugehen. Für die beiden oberen Systeme wurde jedoch die Dreiecksverlegung beibehalten. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass beim kreuzenden System auf eine Querschnittserhöhung verzichtet werden konnte. In Einzelfällen kann es aber nötig sein, an solchen Stellen zusätzliche Lüftungsrohre zu installieren. Entsprechende Berechnungsgrundlagen sind in [9] beschrieben.

### Die Praxis ist weiter als die Norm

Einige in der Praxis bereits genutzte Rechenmethoden für gängige Installationsvarianten haben noch keinen Eingang in die IEC 60287 gefunden: Sei dies die Erhöhung der Stromtragfähigkeit durch forcierte Kühlung oder Ventilation, Gräben und Rohrblöcke mit aussergewöhnlichen Seitenverhältnissen oder die Verlegung in Kabeltunneln. Auch Kabelumgebungen aus Materialien verschiedener Resistivität werden in der Norm noch nicht abgedeckt. Einige dieser Themen werden zwar von den entsprechenden Arbeitsgruppen bearbeitet, Resultate sind jedoch aufgrund der teilweise komplizierten Sachverhalte nicht in Kürze zu erwarten.

Wer dennoch genauere Berechnungen will, ist auf forschungsnahen Gremien (wie Cigré) oder Dokumentationen von Praxisbeispielen angewiesen. Eine Methode, die

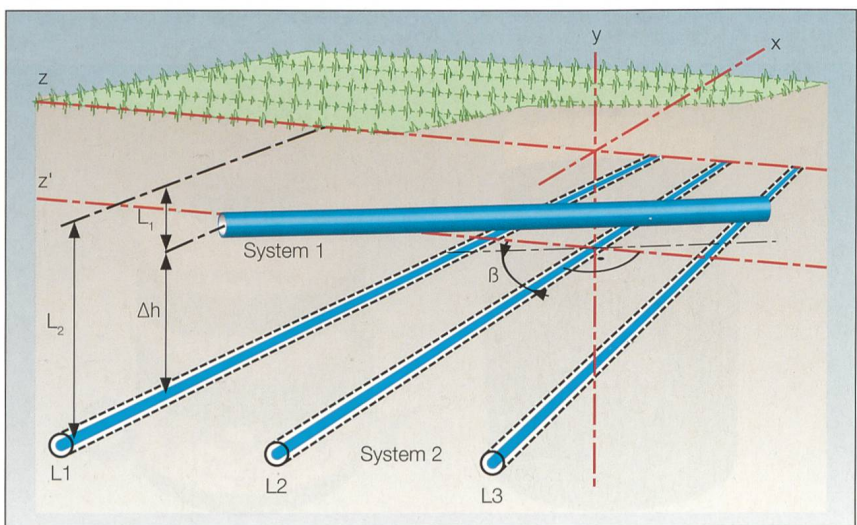


Bild 2 Anordnung und axialer Verlauf bei Kabelkreuzungen gemäss IEC 60287-3-3.

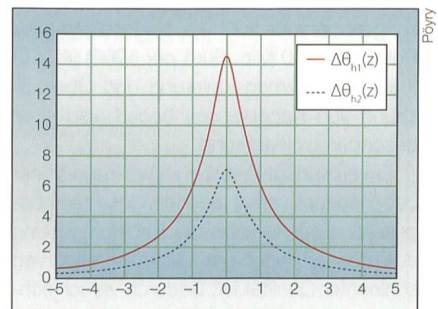


Bild 3 Typische axiale Leitertemperaturverteilung zweier sich kreuzender Kabel (heissste Phase) gemäss IEC 60287-3-3.

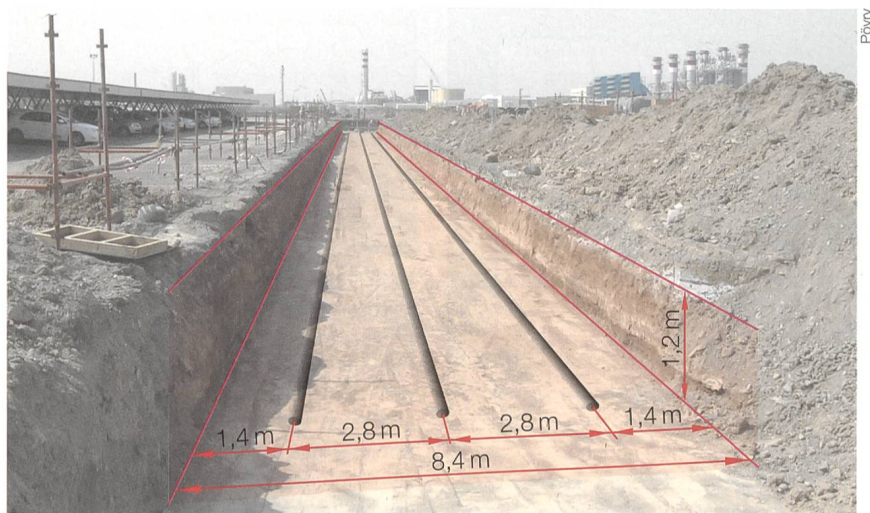


Bild 4 Kabelgraben mit aussergewöhnlichen Dimensionen (Seitenverhältnis Breite/Höhe=7).

immer wieder genutzt wird, ist die Finite-Elemente-Methode (FEM). Sie wurde für die Kabelbelastbarkeitsberechnung bereits umgesetzt und in einem technischen Bericht der IEC veröffentlicht [10]. Mit ihrer Hilfe kann praktisch jede zweidimensionale Verlegung nachgebildet werden.

### Aussergewöhnliche Dimensionen

Trotz aller Nachteile für den elektrischen Betrieb kann es aus thermischen Gründen notwendig sein, bei der Trassenauslegung sehr grosse Phasenabstände zu realisieren. Insbesondere bei Grenzleistungen kann dies zu grossen Trassenbreiten führen (Bild 4). Kommt dann noch das Design eines thermisch stabilen Rückfüllmaterials für solch grosse Volumina hinzu, erreicht man schnell die Grenzen der gängigen Berechnungsmethoden für den externen thermischen Widerstand. Nach IEC 60287 sind die Seitenverhältnisse für solche Rückfüllgebiete auf  $y/x < 3$  begrenzt, wobei mit  $x$  die kürzere und mit  $y$  die längere Seite bezeichnet wird. Der Grund für diese Limitierung liegt im Formelsystem von Neher und McGrath [11]. Ihre Untersuchungen basieren auf den in den USA wie in der Schweiz üblichen Rohrblöcken. Hier nehmen sie an, dass alle vier Seiten des Rohrblocks eine Isotherme definieren, mit einem Kreis mit dem Radius  $x$ , der die Innenseiten des Rohrblocks berührt, und einen grösseren, der die vier Ecken umfasst. Daraus leitet sich ein Ersatzradius  $r_b$  ab, der zwischen diesen beiden Kreisen liegt und ursprünglich sogar nur für Verhältnisse  $y/x < 2$  galt.

Betrachtet man die Seitenverhältnisse des Beispiels in Bild 4 ( $y/x = 7$ ), so ist offensichtlich, dass hier die vier Seiten keine Isotherme mehr bilden und folglich die bekannten Formeln nicht mehr angewendet werden dürfen (Bild 5). Abhilfe schafft ein IEEE-Arti-

kel aus dem Jahr 1988 [12], in dem für bestimmte Konfigurationen mit  $y/x > 3$  die modifizierten Geometriefaktoren auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet wurden. 2007 erschien eine weitere Untersuchung zu diesem Thema, die am Beispiel eines rechteckigen Rohrblocks die Gültigkeit sowohl der Neher-McGrath- als auch der IEC-Formeln überprüfte, ebenfalls anhand der Finite-Elemente-Methode [13]. Diese wies bei genauer Nachbildung der Kabelumgebung und Rückfüllung eine um 30% höhere Kabelbelastbarkeit nach.

### Inhomogene Kabelumgebung

In der Realität findet man praktisch nie Umgebungsbedingungen vor wie jene, auf denen die Normen IEC 60287 und IEC 60853 [14] basieren. IEC 60287 verlangt komplett homogene Rückfüllungen mit einheitlicher thermischer Resistivität oder alternativ geometrisch klar definierte Rückfüllbereiche in homogener Umgebung. Obwohl die entsprechenden Formeln der Berechnung der Kabelbelastbarkeit für im Boden

verlegte Kabel nach IEC 60287 Reserven beinhaltet, kann es also von Vorteil sein, die unmittelbare Kabelumgebung thermisch genauer zu beschreiben, beispielsweise nach der Finite-Elemente-Methode. So lassen sich im FEM-basierten Softwaremodul *Cymcap*<sup>1)</sup> beliebige Umgebungsgeometrien aus rechteckförmigen Bereichen definieren (Bild 6). In der Praxis kann man so Deckschichten an der Oberfläche simulieren, beispielsweise Asphalt oder Anordnungen aus mehreren Rohrblöcken mit Rückfüllmaterial dazwischen.

Das gilt allerdings nicht für teilweise oder ganz ausgetrocknete Bereiche. Hierfür behalten die entsprechenden Formeln in IEC 60287 weiterhin ihre Gültigkeit.

### Forcierte Kühlung

Zur gezielten Erhöhung der Übertragungsleistung von Kabelsystemen bei gleichzeitiger Einhaltung der materialspezifischen Temperaturlimiten, insbesondere der maximalen Leitertemperatur je nach Isolationsmaterial, werden bereits seit geraumer Zeit zusätzliche Kühlsysteme eingesetzt. Auf diese Weise können die Grenzleistungen von unterirdischen Kabelsystemen, Ölkabel- genauso wie VPE-Kabelsysteme, signifikant verbessert werden, insbesondere in dicht besiedelten Gebieten, wo nur stark begrenzte Trassenbreiten zur Verfügung stehen.

Grundsätzlich wird zwischen drei Kühlarten unterschieden: Die *interne* Kühlung ist nur bei Ölkabeln möglich. Hier wird das Kühlmittel (Kabel- bzw. Isolieröl) durch einen Hohlkanal des Leiters gepumpt. Bei der *direkten externen* Kühlung wird das Kühlmittel durch die Rohre gepumpt, in die die Kabel eingelegt sind. Die dritte Variante ist die *indirekte externe* Kühlung, wobei das Kühlmittel durch separate parallel zu den Kabeln verlegte Kühlrohre gepumpt wird.

Für die externe Kühlung eignet sich besonders Wasser, da es gegenüber Kabelöl,

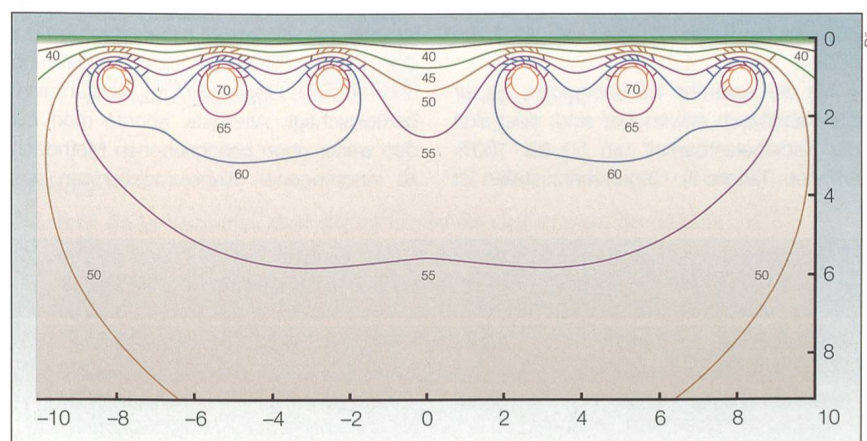


Bild 5 Zugehörige Temperaturverteilung zum obigen Beispiel (erstellt mit Cymcap).

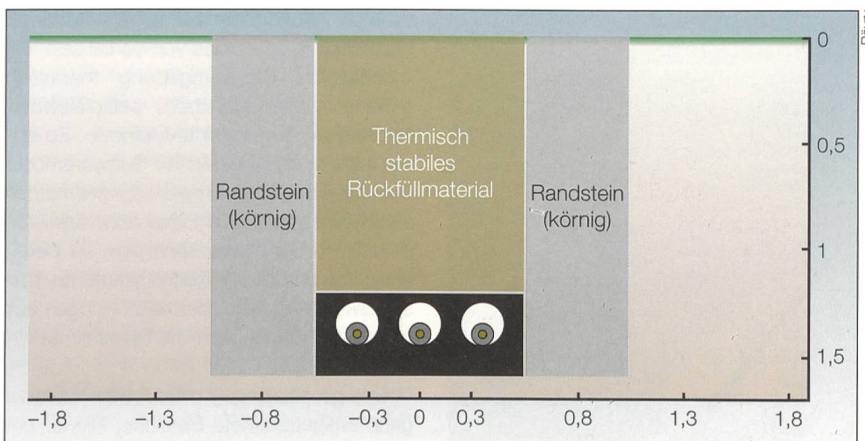


Bild 6 Nachbildung einer realen Verlegeanordnung (erstellt mit Cymcap).

Materialien verschiedener Resitivität rechnen.

Die einzige in der IEC-Norm beschriebene Methode betrifft ebenerdige, luftgefüllte Kanäle, wie man sie häufig in niedrigen Spannungsebenen und im Bahnbereich findet. Danach wird mit der im Kanal erzeugten gesamten Verlustleistung für einen bestimmten Strom und mithilfe des thermisch wirksamen Umfangs des Kanals (also Boden und Wände, ohne Deckel) eine Temperaturerhöhung definiert. Mit ihr berechnet man den externen thermischen Widerstand gemäss der Berechnung von Kabeln in freier Luft nach IEC 60287-2-1 und damit den Strom. Diese Methode kann aber lediglich als grobe Abschätzung dienen, da bereits alle Formen der Wärmeabgabe an die Umgebung pauschal berücksichtigt sind.

Etwas genauer ist die Methode zur Berechnung von luftgefüllten Kabelkanälen nach [18]. Ihr liegt ein Modell zugrunde, das vier Formen der Wärmeabführung berücksichtigt:

- Wärmeleitung in radialer Richtung innerhalb des Kabels,
- Konvektion von der Kabeloberfläche über die Luft an die Kanalwand,
- Strahlung von der Kabeloberfläche an das umgebende Luftvolumen,
- Wärmeleitung durch die Kanalwände an die Umgebung.

Zieht man das thermische Ersatzschaltbild heran, so bilden Konvektion und Strahlung Parallelwiderstände und die Wärmeleitung einen Serienwiderstand. Diese Methode ist jedoch auf rechteckige Querschnitte und Überdeckelungen bis 30 cm (empirischer Wert) begrenzt, weshalb sie nicht geeignet ist für grosse und tiefer liegende Kabeltunnel.

### Grosse Kabeltunnel mit Ventilation

In den vergangenen 10 Jahren wurden in einigen europäischen Grossstädten sogenannte *Bulk-Power-Transmissions*systeme realisiert, die grosse Leistungen in der Höchstspannungsebene bis in die Lastzentren von Ballungsgebieten übertragen [19,20]. Oft bieten sich hier als einzige technische Lösung lange unterirdische Kabeltrassen in speziellen, teilweise sehr tief liegen-

Luft oder Stickstoff eine hohe Wärmekapazität hat und ökologisch unbedenklich ist. Der Bedarf des Kühlmittels und die Temperaturverhältnisse lassen sich leicht abschätzen, wenn man annimmt, dass die gesamte im Kabel erzeugte Verlustleistung unmittelbar an ein Kühlmedium abgegeben wird [15]. Detailliertere analytische Methoden zur Berechnung der Kabelbelastbarkeit bei forcierter Kühlung findet man für den eingeschwungenen Zustand in [16] und für transiente bzw. zyklische Belastung in [17]. Danach lässt sich für die Wärmequellen im Kabel (also Leiter und ggfs. Schirm) und die Kühlelemente das exakte Temperaturprofil entlang eines Kühlabschnitts berechnen. Hierzu werden die thermischen Widerstände zwischen allen beteiligten Elementen berechnet.

Bei externer indirekter Kühlung und mehreren parallel geführten Kühlrohren kann diese Berechnung aufwendig werden, da die entsprechenden Berechnungsmatrizen gross sind. Die Grundidee ist aber einfach: Ausgehend von der Umgebungstemperatur, wird einerseits die Erwärmung durch die Leiter, andererseits die Kühlung durch die Kühlelemente berücksichtigt, jeweils bezogen auf einen Kabelabschnitt. Als Längenintervall empfiehlt sich nach [16], auch zur Überprüfung der Druckverhältnisse im Kühlrohr bei langen Trassen, ein Wert von 500 m.

Mit den externen Kühlmethode, die für alle Kabeltypen anwendbar sind, lässt sich die Kabelbelastbarkeit um 50 bis 100% erhöhen (Tabelle II). Gegenüberzustellen ist

dem jedoch der Mehraufwand für die Kühlanlage und alle dazugehörigen Systeme. Auch der Bau einer Bypass-Lösung an Muffenorten im Falle der direkten Oberflächenkühlung ist hierbei zu berücksichtigen.

### Kabelkanäle

Das thermisch gesehen komplexeste und auch aus Sicht des Planers am schwierigsten zu umfassende Thema sind Verlegearten in luftgekühlten Kanälen und Tunneln mit eingebauter Ventilation, da hier die Umgebungsbedingungen der Kabel entlang ihrer Länge nicht konstant sind. Im Prinzip müssen also dreidimensionale Effekte berücksichtigt werden.

Vom einfachsten Fall, ebenerdig verlegten Kabelkanälen mit thermisch stabiler Rückfüllung, über den etwas komplizierteren Fall mit luftgefüllten, ebenerdig verlegten Kabelkanälen und Kabelkanälen mit vollständiger Überdeckung bis hin zu sehr tiefen, speziellen Kabeltunneln trifft man heute diverse Verlegearten an. Die Kabelbelastbarkeitsberechnung ist für diese Fälle jedoch teilweise recht komplex und hat bisher noch keinen Eingang in die gängigen Normen gefunden.

Für ebenerdige rückgefüllte Kanäle gibt die Norm IEC 60287-2-1 lediglich die Empfehlung, mit 2,5 km/W zu rechnen, um auf der sicheren Seite zu liegen. Kanalwand und mögliche Überdeckung werden nicht berücksichtigt. Alternativ könnte man mit den weiter oben beschriebenen Methoden zu inhomogenen Kabelumgebungen aus

Kühlmethode	Leiter (mm <sup>2</sup> )	Länge Kühlabschnitt	Einlass-temperatur	Auslass-temperatur	Gesteigerte Strombelastbarkeit	Original-Strombelastbarkeit	Erhöhung
Direkte Oberflächenkühlung	1200	5000 m	20 °C (hin)	30 °C (hin) 32,5 °C (rück)	1725 A	900 A	<b>200%</b>
Indirekte Kühlung	1200	5000 m	20 °C (hin)	24/28 °C (hin) 30 °C (rück)	1607 A	1025 A	<b>150%</b>

Tabelle II Effektivität der verschiedenen Kühlmethode.

fachbeiträge

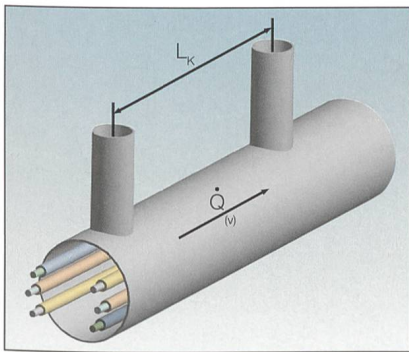


Bild 7 Tunnel mit FEM-Raster (3-D-Ansicht).

den Kabeltunneln an. Bekannte Beispiele hierfür sind die 400-kV-Systeme in Berlin, London und Madrid. Ähnliche Systeme findet man in Tokio, Singapur, Chicago und Auckland.

Bei einigen dieser Systeme mussten zur Steigerung der Übertragungsgrenzleistung aufwendige Ventilationssysteme installiert werden. Die entsprechenden Algorithmen für die Bestimmung des Leiterquerschnitts sind komplex, und der bauliche Aufwand durch separate Ventilationsgebäude oberhalb von Vertikalschächten inklusive intelligenter Ventilationssteuerung ist gross, zusätzlich zu den bereits hohen Baukosten für den Tunnel.

Erste Untersuchungen zur Strombelastbarkeit von Kabeltunneln liegen einige Jahrzehnte zurück. Electra Nr. 143 [21] und 144 [22] aus dem Jahr 1992 beschreiben jedoch zum ersten Mal umfassend die bis dahin gesammelten Erkenntnisse in einem einheitlichen numerischen Formelsystem. Berücksichtigt werden hier auch die forcierte Luftkühlung mit Ventilatoren, grosse Verlegetiefen und zyklische bzw. transiente Belastung der Kabel. Das zugrunde liegende Modell ist bezüglich der Wärmeabgabemechanismen viel detaillierter als das oben erwähnte nach [18]. Danach wird zusätzlich die Konvektion der Kabeloberfläche an die umgebende Tunnelluft berücksichtigt, die Konvektion von der umgebenden Tunnelluft an die Tunnelwand sowie die Wärmeleitung in Längsrichtung aufgrund des natürlichen Zugwinds oder der Ventilation (Bild 7).

Eine Grundvoraussetzung für dieses Modell ist jedoch, dass alle Kabel identisch und gleich belastet sind, also dieselbe Leitertemperatur aufweisen. Ausserdem beschränkt sich das Modell auf rein axiale und radiale Effekte. Pro Abschnitt wird dann die Temperaturverteilung berechnet anhand der bekannten Lufteintrittstemperatur und der Windgeschwindigkeit  $v$ . Die Grundlage dazu bildet das Gleichgewicht aus der sich linear aufbauenden Wärmeabgabe der Kabel und der Wärmeabfuhr über das bewegte Luftvolumen an den Tunnelquer-

schnitt, wobei die Kabelverluste auf Basis eines angenommenen Stroms berechnet werden. Am Ende eines jeden Kühlabschnitts darf die Kabelleitertemperatur das Maximum (z.B. 90 °C für VPE) nicht überschreiten. Über die Änderung des angenommenen Stroms oder der Windgeschwindigkeit lässt sich dieses Gleichgewicht anpassen und somit die Strombelastbarkeit ermitteln.

### Schlussbemerkung

Nach mehreren Jahren geringer Aktivität hat das Thema Kabelbelastbarkeitsrechnung also wieder an Bedeutung gewonnen. Die erläuterten Methoden sollen helfen, die thermisch-physikalischen Vorgänge, denen ein Kabelsystem im Betrieb ausgesetzt ist, besser zu verstehen. Für den Betreiber von Kabelanlagen können sie dazu dienen, bestehende Anlagen auf ihre Übertragungsfähigkeit zu überprüfen, um gegebenenfalls korrigierend eingzugreifen. Andererseits geben die Methoden dem Planer Hinweise, wie er Neuanlagen bereits im Planungsstadium optimieren kann und gegebenenfalls Zusatzmassnahmen zur Leistungssteigerung auslegen und deren Aufwand abschätzen kann.

Angesichts veränderter Umweltbedürfnisse, wie sie in vielen Industrienationen zu beobachten sind, wird man in Zukunft auch in Übertragungsnetzen einen immer höheren Anteil an Kabeln beobachten können. Um diese zukünftigen Netzstrukturen mit der gleichen Versorgungsqualität betreiben zu können, wie man es bisher gewohnt war, müssen diese Kabelanlagen sorgfältig geplant werden.

Eine ausführliche Version dieses Artikels inklusive detaillierter Berechnungen steht unter [www.technik-forum.ch](http://www.technik-forum.ch) zum Download bereit [1].

### Referenzen

- [1] F. Schell: Grenzen der etablierten Kabelbelastbarkeitsberechnung nach IEC 60287 und ihre Bedeutung für die Netzqualität. [www.technik-forum.ch](http://www.technik-forum.ch) > Download > Suche nach «Schell».
- [2] TenneT TSO B.V. (Übertragungsnetzbetreiber der Niederlande): Responsible and innovative underground cable installation. Positionspapier 27.5.2008 ([www.tennet.org](http://www.tennet.org)).

- [3] M. Márquez, G. Alvarez: Active and reactive operation area of insulated cables. Cigré 2008, Paper B1-310.
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/1998\\_Auckland\\_power\\_crisis](http://en.wikipedia.org/wiki/1998_Auckland_power_crisis).
- [5] P.M. Dejean, E. Zaccone et al.: The additional losses in the metallic screens of HV cables. Jicable '99.
- [6] Cigré: Large cross-sections and composite screen designs. TB 272 (6/2005).
- [7] IEC 60287: Electric cables – Calculation of the current rating.
- [8] IEC 60287-3-3: Electric cables – Calculation of the current rating, Part 3-3: Sections on operating conditions – Cables crossing external heat sources.
- [9] H. Brakelmann: Kühlung von Kabelkreuzungen durch Belüftungsrohre. SEV-Bulletin 15/2000.
- [10] IEC TR 62095: Electric cables – Calculations for current ratings – Finite element method.
- [11] J.H. Neher, M.H. McGrath: The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems. AIEE Transactions Part III – Power Apparatus and Systems, Vol. 76, October 1957, pp. 752–772.
- [12] G.J. Anders et al.: Modified Values for Geometric Factor of External Thermal Resistance of Cables in Ducts. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, Oktober 1988, pp. 1303–1309.
- [13] J. Karlstrand, G. Henning: Modern FEM-tools – an example of cables installed in duct-banks. Jicable 2007, Paper C.521.
- [14] IEC 60853: Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables. Part 1: <math>\leq 36\text{ kV}</math>, Part 2: >36 kV.
- [15] E. Peschke, R. v. Olshausen: Kabelanlagen für Hoch- und Höchstspannung. Siemens, Publicis-MCD-Verlag, 1998.
- [16] Cigré: The calculation of continuous ratings for forced cooled cables. Electra Nr. 66 (10/1979).
- [17] Cigré: Forced cooled cables – Calculation of thermal transients and cyclic loads. Electra Nr. 104 (1/1986).
- [18] L. Heinhold, R. Stubbe: Kabel und Leitungen für Starkstrom – Power Cables. 2003.
- [19] Argaut, Schell et al.: Large projects of EHV underground cable systems. Jicable 2007.
- [20] Granadino, Schell et al.: Undergrounding the first 400 kV Transmission Line in Spain. Jicable 2003.
- [21] Cigré: Calculation of temperatures in ventilated cable tunnels (Part I). Electra Nr. 143 (9/1992).
- [22] Cigré: Calculation of temperatures in ventilated cable tunnels (Part II). Electra Nr. 144 (10/1992).

### Angaben zum Autor

Fabian Schell, Dipl.-Ing. (TU), ist Senior-Ingenieur bei Pöyry Energy, ehemals Elektrowatt, in Zürich. Seit 2006 ist er Vorsitzender des Expertengremiums TK 20-4 «Cable Rating» im Technischen Komitee TK 20 des CES (Electrosuisse).  
Pöyry Energy AG, 8037 Zürich,  
[fabian.schell@poyry.com](mailto:fabian.schell@poyry.com)

<sup>1)</sup> [www.cyme.com](http://www.cyme.com)

### Résumé

#### Calcul de la capacité thermique limite des systèmes de câbles

Limites du calcul établi, nouveautés à la CEI 60287 et méthodes plus avancées. Après plusieurs années sans nouveautés notables, le sujet du calcul des sollicitations maximales des câbles a de nouveau gagné en importance parmi les organismes de normalisation. A mesure que les capacités de lignes sont de plus en plus sollicitées tandis que les réseaux sont progressivement câblés, la détermination des capacités thermiques limites revêt un intérêt central également pour les exploitants. L'article donne un aperçu de l'état actuel de la technique de calcul des sollicitations maximales. Un rapport détaillé peut être téléchargé sur [www.technik-forum.ch](http://www.technik-forum.ch).

Many electrical products in Europe are not safe – **we have the solution...**

ENEC is **the** high quality European mark for electrical products that demonstrates compliance with European safety standards.

Electrosuisse  
Luppenstrasse 1, CH-8320 Fehraltorf  
Phone +41 44 956 13 14  
testing@electrosuisse.ch  
www.electrosuisse.ch

electrosuisse >>



**Europe Safe**  
www.enec.com



## LANZ moderne Kabelführung aus **rostfreiem** Stahl A4

- Kabelschonend
- Funktionserhalt E30
- Sofort lieferbar
- Korrosionsbeständig
- Preisgünstig



**LANZ fabriziert** für die Lebensmittelindustrie, chem. Industrie, Abwasserreinigungs- und Kehrlichtverbrennungsanlagen, unterirdische Bauten, Bahn- und Strassentunnel:

- Multibahnen\*- und Weitspann-Mb 100 mm – 400 mm 6 m lang, mit verzahntem MULTIFIX-Trägermaterial
  - LANZ Gitterbahnen 100 mm – 400 mm Breite
  - LANZ C- und G-Kanäle\* 50 x 50 mm bis 75 x 100 mm
  - ESTA Elektro-Installationsrohre Ø M16 – M63
  - LANZ Rohrschellen für koordinierbare Installationen
- Stahl A4 WN 1.4571 und 1.4539 max. korrosionsresistent  
→ Schockgeprüft 3 bar und Basisschutz  
→ \*Geprüft für Funktionserhalt im Brandfall E 30 / E 90

Mich interessieren ..... Bitte senden Sie Unterlagen.

Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!

Name / Adresse / Tel. \_\_\_\_\_

K2

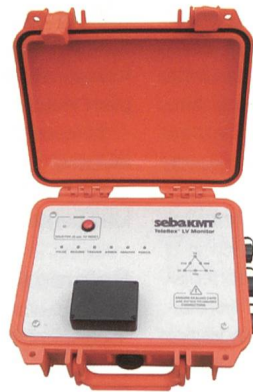


**lanz oensingen ag**

CH-4702 Oensingen  
Telefon 062 388 21 21  
www.lanz-oens.com

Südringstrasse 2  
Fax 062 388 24 24  
info@lanz-oens.com

## LV-Monitor



- TDR-basiertes, dreiphasiges Fehlerortungssystem
- Ortung von permanenten und intermittierenden Fehlern
- Einsatz an unter Spannung stehenden Niederspannungskabeln

### INTERSTAR AG

Alte Steinhauserstrasse 19, 6330 Cham  
Tel. 041 741 84 42, Fax 041 741 84 66  
www.interstar.ch, info@interstar.ch