

Grenzen der etablierten Kabelbelastbarkeitsberechnung nach IEC 60287 und ihre Bedeutung für die Netzqualität

Übersicht über Neuerungen in den Normen und weiterführende Methoden zur Berechnung der dauerhaften Übertragungsleistung von Kabelsystemen

Einleitung

Unterirdische Kabelverbindungen stellen aus verschiedenen Gründen immer neuralgische Abschnitte in elektrischen Übertragungssystemen dar. Insbesondere der seit einigen Jahren anhaltende Trend zur Realisierung immer grösserer Längen auch in der Hoch- und Höchstspannungsebene wirft grundlegende Fragen über die Einbindung solcher Systeme in die vorhandenen Netzstrukturen und die Auswirkungen auf deren Zuverlässigkeit auf [1]. Einerseits repräsentieren lange Kabeltrassen ausgedehnte Kapazitäten mit all den daraus resultierenden Konsequenzen hinsichtlich Blindleistungskompensation oder Netzstabilität [2]. Andererseits führen eventuelle schadenbedingte Ausfälle aufgrund der teilweise aufwendigen Reparaturprozeduren praktisch immer zu relativ langen Ausfallzeiten. Insbesondere in der Hoch- und Höchstspannungsebene kann dies möglicherweise zu kritischen Netzzuständen führen.

Der, inzwischen etwas mehr als zehn Jahre zurückliegende, wochenlange Blackout vom 28. Februar 1998 im Stadtzentrum von Auckland, der auf das thermische Versagen von mehreren Kabelverbindungen zurückzuführen ist, nach offiziellen Schätzungen Schäden von mehr als 200 Mio. Neuseeländische Dollar (ca. 100 Mio. Euro per 1998) verursacht hat [3]. Die Bedeutung einer sorgfältigen thermische Dimensionierung und Überwachung von Kabeltrassen kann daher nicht hoch genug eingeschätzt werden.

Über seine gesamte Lebensdauer ist einer erdverlegten Kabeltrasse verschiedensten Gefahren ausgesetzt:

- Eine unzulängliche Qualität des Rückfüllmaterials kann zu Austrocknung der unmittelbaren Kabelumgebung führen.
- Durch Modifikationen oder Zubauten wird die nähere Kabelumgebung thermisch negativ beeinflusst, z.B. durch
 - o lokal höhere Überdeckung
 - o zusätzliche Wärmequellen (Gas, Fernwärme, Kabelkreuzungen).
- Mangelnde oder gänzlich fehlende Überwachung der Kabeltemperatur verdeckt mögliches Risiko einer langsamen aber stetigen Erwärmung der Kabelumgebung.

Als Konsequenz daraus folgt einerseits beschleunigte, thermische Alterung der Isolation und andererseits eine erhöhte mechanische Belastung des Kabelzubehörs. Bei beiden handelt es sich um langsame, aber stetige, meist unumkehrbare Prozesse, die letztendlich in lokalen Durchschlägen enden. Um zumindest jene Ausfälle aufgrund von thermischer Überlastung zu vermeiden, ist eine exakte detaillierte 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 nichtionisierender Strahlung“ (NISV) dar. Danach muss für alle bestehenden und neu zu errichtenden Anlagen und Leitungen der Nachweis erbracht werden, dass beim thermischen Grenzstrom (auch Bemessungs- oder Nennstrom) festgelegte Grenzwerte für elektromagnetische Strahlung nicht überschritten werden.

Der vorliegende Artikel soll daher anhand von Praxisbeispielen aus Sicht des Planers eine Übersicht über die wichtigsten vorhandenen Rechenmethoden der thermischen Kabelbelastbarkeitsrechnung und ihre Anwendung in der Praxis geben.

Theoretische Grundlagen der thermischen Kabelbelastbarkeitsberechnung nach IEC 60287

Der Beginn der dokumentierten Geschichte der thermischen Kabelbelastbarkeitsrechnung geht zurück auf das Jahr 1932, als D.M. Simmons eine Reihe von Artikeln in der amerikanischen Zeitschrift *AIEE Transactions* zu diesem Thema veröffentlichte. Diese Arbeiten wurden über die

Jahre weitergeführt und verfeinert, bis im Jahre 1957 J.H. Neher and M.H. McGrath [4] eine Zusammenfassung vorausgehender Untersuchungen zusammen mit einem umfassenden Formelsystem veröffentlichten. Das darin aufgestellt Formelsystem bildete später die Grundlage für die erste internationale Norm IEC 60287 [5].

Ganz allgemein betrachtet gibt ein unterirdisches Kabel seine (Strom-)Wärme mittels Wärmeleitung an seine Umgebung ab, außer es befindet sich in freier Luft oder in einem Rohr oder Kanal und ist mit Luft umgeben. Diese Wärmeleitung kann mittels der folgenden Differentialgleichung beschrieben werden:

$$\frac{\partial}{\partial x} t(x, y) + \frac{\partial}{\partial y} t(x, y) + \alpha \cdot t(x, y) = 0 \Rightarrow t(x) = t_0 e^{-\alpha x} e^{-\alpha y}$$

Diese Gleichung kann für die meisten komplizierteren Geometrien und Kabelanordnungen in geschlossener Form nicht gelöst werden. Zudem war es damals in den 50er-Jahren ohne leistungsstarke Computer nicht möglich, numerische Lösungen dieser Gleichung zu erlangen.

Eingeschwungener Zustand

IEC 60287 deckt lediglich den vollständig eingeschwungenen Zustand (engl. „*steady-state*“) bei 100% Lastfaktor ab. Dabei wird das Kabelsystem als unendlich lang ausgedehnt angenommen, bzw. allgemein ausgedrückt, die Länge des durch die Verlegeart repräsentierten Abschnitts ist viel größer als die Verlegetiefe. Änderungen in der Verlegeart und variierende Abstände sind nicht berücksichtigt, so dass longitudinale Effekte ausgeschlossen werden können. Für diesen Fall besteht das thermische Modell lediglich aus Wärmequellen und thermischen Widerständen (siehe Bild 1).

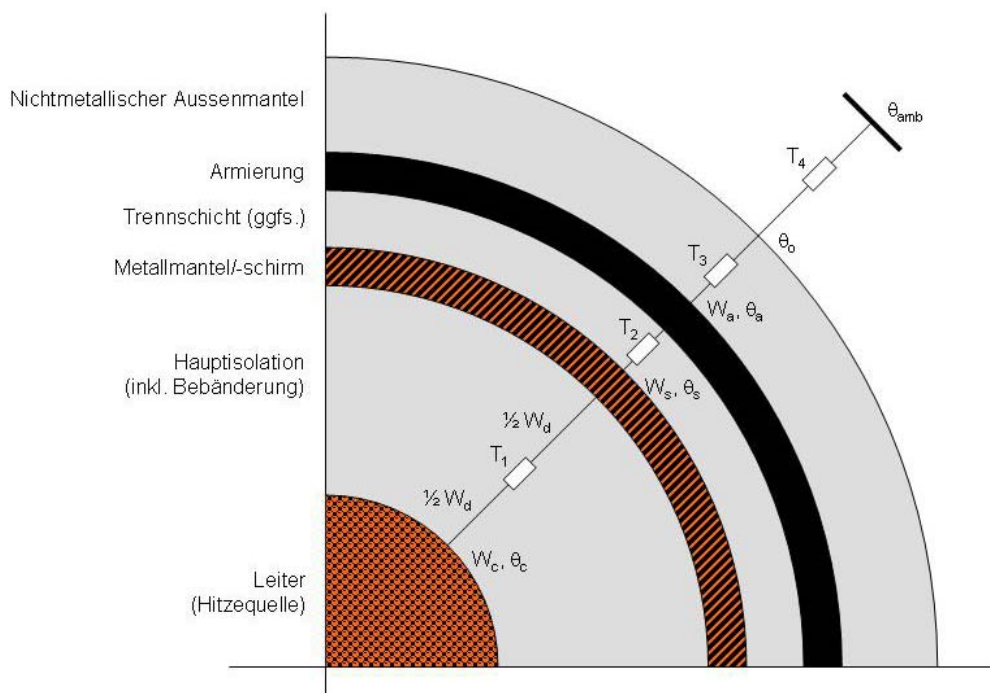


Bild 1: Thermisches Modell eines Kabels (Bezeichnungen nach IEC 60287)

Im eingeschwungenen Zustand finden keine Temperaturänderungen mehr statt und die Temperaturen der einzelnen Schichten sind stabil. Es ergibt sich dann das in Bild 2 dargestellte Ersatzschaltbild mit zugehöriger Formel.

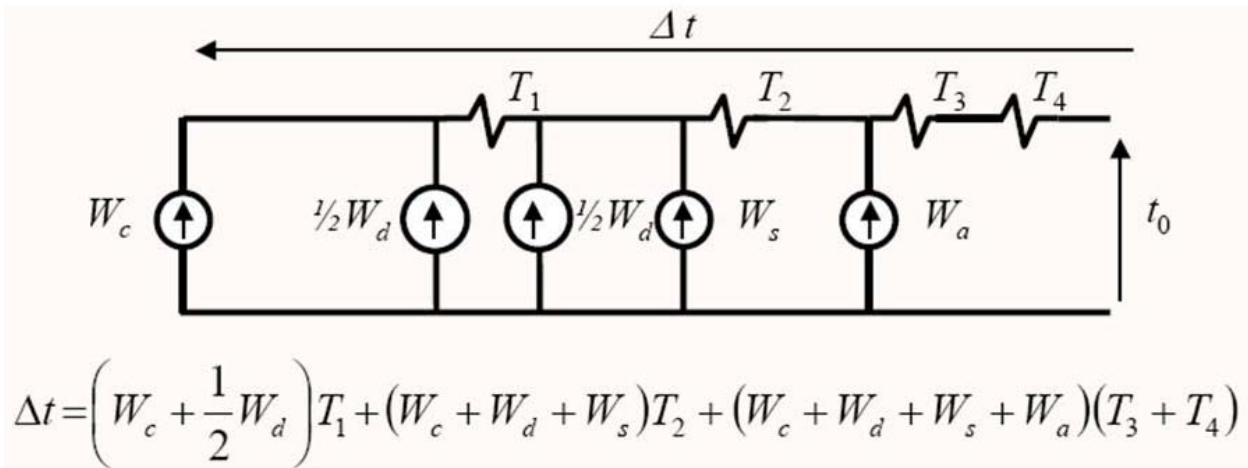


Bild 2: Thermisches Ersatzschaltbild eines Kabels im eingeschwungenen Zustand (nach IEC 60287)

Bei bekannter Temperaturdifferenz lässt sich dann nach Auflösen der obigen Formel nach W_c der maximal zulässige Dauerstrom bei diesen Temperaturverhältnissen bestimmen.

Elektrisches Analogon

Die Analogie zu einem elektrischen Stromkreis ist offensichtlich. Statt einer Potentialdifferenz (= Spannung) wird eine Temperaturdifferenz berechnet, wobei die erzeugten Verluste dem Strom und die thermischen Widerstände den elektrischen Widerständen entsprechen.

Thermisches Ersatzschaltbild	Elektrisches Analogon
$U = \phi_2 - \phi_1 = \sum R_i \cdot I$	$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \sum T_i \cdot W_i$
Mit	Mit
$\phi_{1/2} = \text{Potentialniveaus}$	$\theta_{1/2} = \text{Temperaturniveaus}$
$R_i = \text{elektrische Widerstände}$	$T_i = \text{thermische Widerstände}$
$I = \text{Summe aller Stromquellen}$	$W_i = \text{Verlust- bzw. Wärmequellen}$

Transiente Vorgänge

Transiente und zyklische Belastungen werden nach IEC 60853 [6] berechnet. Dabei betrifft Teil 1 nur Kabel bis $U_m=36$ kV, die eine vergleichsweise kleine Zeitkonstante besitzen. Teil 2 deckt alle Kabel über $U_m=36$ kV ab, da hier aufgrund der höheren Isolationswandstärken die Zeitkonstante berücksichtigt werden muss. Der transiente Verlauf wird durch die Einführung von thermischen Kapazitäten C_i (bzw. Q_i) parallel zu den Verlustquellen erreicht.

Berechnung der Dauerstrombelastbarkeit

Anhand der einzelnen Teile von IEC 60287 werden im Folgenden kurz die Berechnungsmethoden der wichtigsten Parameter für den eingeschwungenen Zustand erläutert. Sie lassen sich im wesentlichen in drei Arten unterteilen:

- Stromabhängige Werte wie Leiter- und Schirmverluste
- Spannungsabhängige Werte wie die dielektrische Verluste
- Rein Geometrieabhängige Werte wie thermische Widerstände

Aufgrund der Stromabhängigkeit der Verluste wird bereits die Notwendigkeit eines iterativen Verfahrens zur Ermittlung der Strombelastbarkeit sichtbar.

1. Leiterverluste

Ausgehend von dem in IEC 60228 normierten Leiter-Gleichstromwiderstand bei 20°C R_0 wird der Leiter-Wechselstromwiderstand R bei Betriebstemperatur θ gemäss IEC 60287-1-1 errechnet. Zur Veranschaulichung dient das folgende Schema (siehe Bild 4).

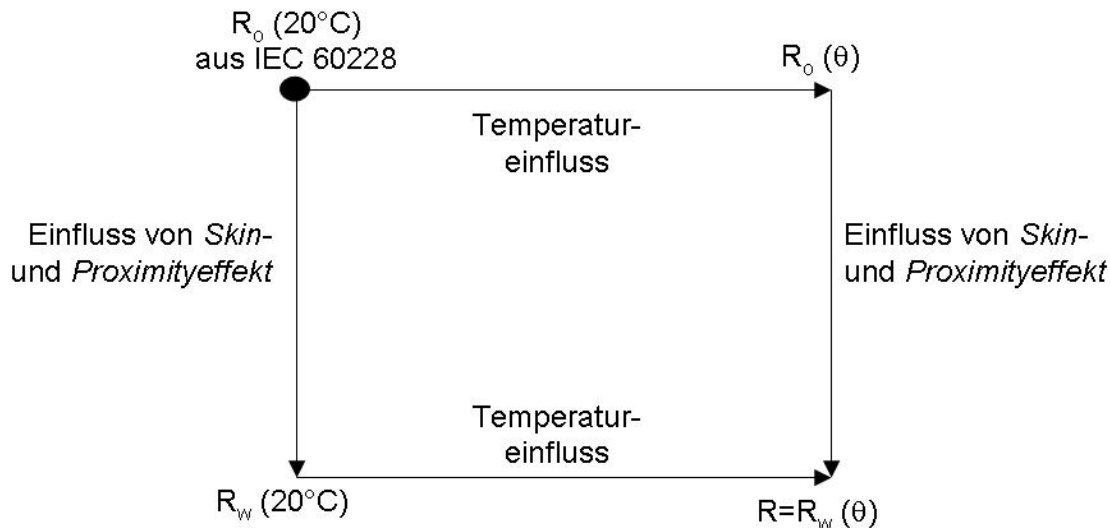


Bild 4: Schema für die Berechnung der Leiterverluste (bei Betriebstemperatur)

Dieser Leiter-Wechselstromwiderstand R fließt dann in die Leiterverluste $W_c = R \cdot I^2$ ein.

2. Mantel- bzw. Schirmverluste

Für das weitere Verständnis ist es zweckmässig, zunächst einige Begrifflichkeiten zu klären. Der Begriff „Schirmverluste“ umfasst die Verluste aller Bestandteile der metallischen Schirmung des Kabels, also der feldbegrenzenden und kurzschlussstromtragenden metallischen Komponenten, und einer evtl. zusätzlich vorhandenen Armierung.

Ebenfalls in IEC 60287-1-1 werden die Schirmverluste (und ggfs. Verluste für zusätzliche Armierung) berechnet. Die gesamten Schirm- bzw. Mantelverluste lassen sich als Funktion der Leiterverluste über die Formel $W_s = \lambda W_c$ darstellen. Da beide Bestandteile den Leiterstrom beinhalten, lässt sich dieser Faktor λ auch einfacher als Verhältnis eines zusätzlichen äquivalenten Leiterwiderstandes zum ursprünglichen Leiterwiderstand ausdrücken. Er besteht im wesentlichen aus zwei Anteilen, den induzierten Zirkelströmen, die sich durch geeignete Erdungsmassnahmen ausschalten bzw. reduzieren lassen [7] [8], und den Wirbelstromverlusten, die abhängig sind von der Schirmgeometrie und der Leitfähigkeit des verwendeten Materials. Alle Werte sind bei der jeweiligen Betriebstemperatur zu berechnen.

Diese Wirbelstromverluste von (Kabeln mit) soliden Metallmänteln können bis zu 30% der Leiterverluste betragen und reduzieren somit unvermeidlich die Belastbarkeit um bis zu 15%. Das illustriert den entscheidenden Vorteil, den Drahtschirmkonstruktionen, insbesondere mit dünnen Folien als radiale Wassersperre (Schichtenmantelkonstruktionen), gegenüber anderen Kabelkonstruktionen haben.

Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass Teil -1-2 lediglich einen untersuchten Sonderfall, nämlich zwei Systeme in Flachverlegung, und Teil -1-3 die Berechnung der Schirmverluste für Verlegungen mit mehreren Kabeln pro Phase, also den Einfluss zusätzlicher Verluste durch Selbst- und Gegeninduktivität, behandelt.

3. Dielektrische Verluste

Die spannungsabhängigen dielektrischen Verluste werden nach IEC 60287-1-1 berechnet unter Berücksichtigung der Kabelkapazität C , der relativen Permeabilität ϵ_r und dem Verlustfaktor $\tan \delta$ des jeweils verwendeten Isolationsmaterials.

$$W_d = U_0^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan \delta$$

Auch wenn ihr Einfluss in den meisten Fällen relativ klein ist, kommt es hierbei in der Praxis immer wieder Unklarheiten. Je nach Isolationsmaterial sind die dielektrischen Verluste erst bei höheren Spannungen (z.B. bei VPE ab $U_0 \geq 127$ kV also Nennspannungen von 220 kV und höher) zu berücksichtigen. Oft wird bei VPE-Kabeln für den Verlustfaktor $\tan \delta$ statt dem maximal zulässigen der für dieses Isolationsmaterial typischerweise gemessene Wert eingesetzt, was der Realität näherkommt. Des weiteren ist beispielsweise zu beachten, dass die „Kabelkapazität“ als Kapazität der Hauptisolation definiert ist, also über dem inneren und unter dem äusseren Halbleiter.

4. Thermische Widerstände

Alle nichtmetallischen Bestandteile innerhalb einer Kabelkonstruktion einschliesslich dem nichtmetallischen Aussenmantel repräsentieren thermische Widerstände. Bedingt durch ihre radialsymmetrische Geometrie lassen sich für *einadrige* Kabel, wie sie in der Hochspannung üblich sind, konzentrische Schichten ganz allgemein mit der folgenden Formel darstellen:

$$T_i = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad \text{mit } r_2 \text{ als Radius über der Schicht, } r_1 \text{ als Radius unterhalb der Schicht und}$$

$i=1, 2, 3$ gemäss Bild 1a.

Für alle anderen Geometrien, insbesondere die Kabelumgebung ausserhalb des Aussenmantels bis zur Erdoberfläche, die eine Isotherme darstellt, gilt $T_4 = \frac{\rho}{2\pi} \cdot G$, wobei G ein Geometriefaktor ist, der u.a. den Kabeldurchmesser, die Verlegetiefe und die Umgebungsbedingungen beinhaltet. IEC 60287-2-1 enthält Angaben über Geometriefaktoren für lediglich einige wenige typische Verlegeanordnungen. Da diese jedoch immer auf Verlegungen im Boden oder bestimmte Anordnungen in freier Luft begrenzt und in ihren Abmessungen stark limitiert sind, sei für alle davon abweichenden, in der Praxis vorkommenden Varianten auf die weiterführenden Methoden in den folgenden Abschnitten verwiesen.

Wesentliche Neuerungen bei der Berechnung nach IEC 60287

Nach mehreren Jahren mit etwas geringerer Aktivität und ohne nennenswerte Neuerungen hat das Thema *Kabelbelastbarkeitsrechnung* auch in den nationalen und internationalen Normungsgremien wieder an Bedeutung gewonnen. Im Folgenden werden die beiden wichtigsten Neuerungen bzw. Erweiterungen der etablierten Berechnungsgrundlagen nach IEC 60287 kurz erläutert.

Berechnung der Verluste von Drahtschirmen

Wie bereits oben detaillierter beschrieben, können die Verluste in Metallmänteln von Kabeln einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtbelastbarkeit des Kabelsystems haben. Eine eingehendere Prüfung und Überarbeitung der als eher konservativ einzustufenden bisherigen Methode nach IEC 60287 erschien daher längst überfällig, insbesondere da die seit langem gängigen Kabelkonstruktionen mit Drahtschirmen (siehe Bild 5) nicht ausreichend berücksichtigt werden.



Bild 5: Kabelkonstruktionen mit Drahtschirm und Folie und solidem Glattmantel

Im Jahre 1999 erschien eine Publikation, die einen ersten wichtigen Schritt in diese Richtung unternahm [9]. Grundlage bildeten experimentelle Untersuchungen an EPR-Kabeln mit einfachem Drahtschirm. Daraus wurde ein analytisches Formelsystem für die Berechnung der Schirmverluste auf Basis des exakten Schirmaufbaus, also von Drahtdurchmesser und –anzahl, Schlaglänge, der Dimension der Gegenwendel und der Phasenabstände entwickelt. Die wesentliche Erkenntnis dieser Veröffentlichung ist, dass der in IEC 60287 beschriebene Algorithmus unzureichend ist und zu viel zu pessimistischen Annahmen bzgl. der Schirmverluste – und damit letztendlich zur Überdimensionierung des Kabelleiters - führt.

Diese Erkenntnisse wurden dann in einer Cigré Working Group aufgegriffen und im Juni 2005 in einem Technischen Bericht veröffentlicht [10]. Darin wurden die Schirmverluste für sog. „Kompositenschirme“, in dem beschriebenen Beispiel ein Aluminium-Schichtenmäntel, unter Zuhilfenahme der Finite-Elemente-Methode (FEM) quantifiziert und zwar unter Berücksichtigung und Vernachlässigung des Einflusses der Folie. Auch hier kam man zu dem gleichen Ergebnis wie in [9], nämlich dass die Drahtschirmverluste etwa eine Zehnerpotenz kleiner ist als nach der analytischen IEC-Methode.

	Berechnung nach IEC- Methode	Berechnung nach Jicable-Methode	
Kabeltyp	XDRCU-ALT 1x800mm ² 220kV	XDRCU-ALT 1x800mm ² 220kV	
Verlegeart	Direkt, flach	Direkt, flach	
Erdung	Einseitig	Einseitig	
Schirmverluste	2.1	0.459	W/m
Verlustfaktor λ_1 "	0.059	0.009	
Maximale Dauerstrombelastbarkeit bei 90°	1074	1315 (+22%)	A

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Verluste

Diese Ergebnisse fanden dann im Jahr 2006 Eingang in eine zusätzliche Fussnote in der neuesten Ausgabe der IEC 60287 [5]. 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 auch weiterhin Kombischirme mit dickeren Metallmänteln, wie sie z.B. bei Blei- oder Aluminium-Wellmänteln vorkommen, insbesondere auch wenn die Drahtdurchmesser aufgrund einer hohen Kurzschlussstromanforderung relativ hoch werden.

Insbesondere bei Grenzleistungen wirkt sich diese Annahme positiv auf die Belastbarkeit eines Kabelsystems und damit die Wirtschaftlichkeit der gewählten Lösung aus. Nichtsdestotrotz bleibt es dem Planer selbstverständlich überlassen, auch weiterhin die konservative Rechnung in betracht zu ziehen.

2. Kabelkreuzungen, Kreuzung von externen Wärmequellen

Eine weitere sehr interessante und nützliche Neuerung trat mit der Erweiterung der IEC 60287 um Teil 3-3 [11] in Kraft. Hierin 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 $\Delta\theta$ (bzw. Δt in Bild 2) lediglich um die Temperatur der Wärmequelle reduziert wird, kann nach der neuen Methode der exakte longitudinale Temperaturverlauf berechnet werden.

Zwei in unterschiedlicher Tiefe direkt im Boden verlegte Kabelsysteme (1) und (2) kreuzen sich an einer Stelle P. Dieser Punkt wird als Ursprung eines Koordinatensystems mit $x=0$, $y=0$ und $z=0$ definiert (siehe Bild 6).

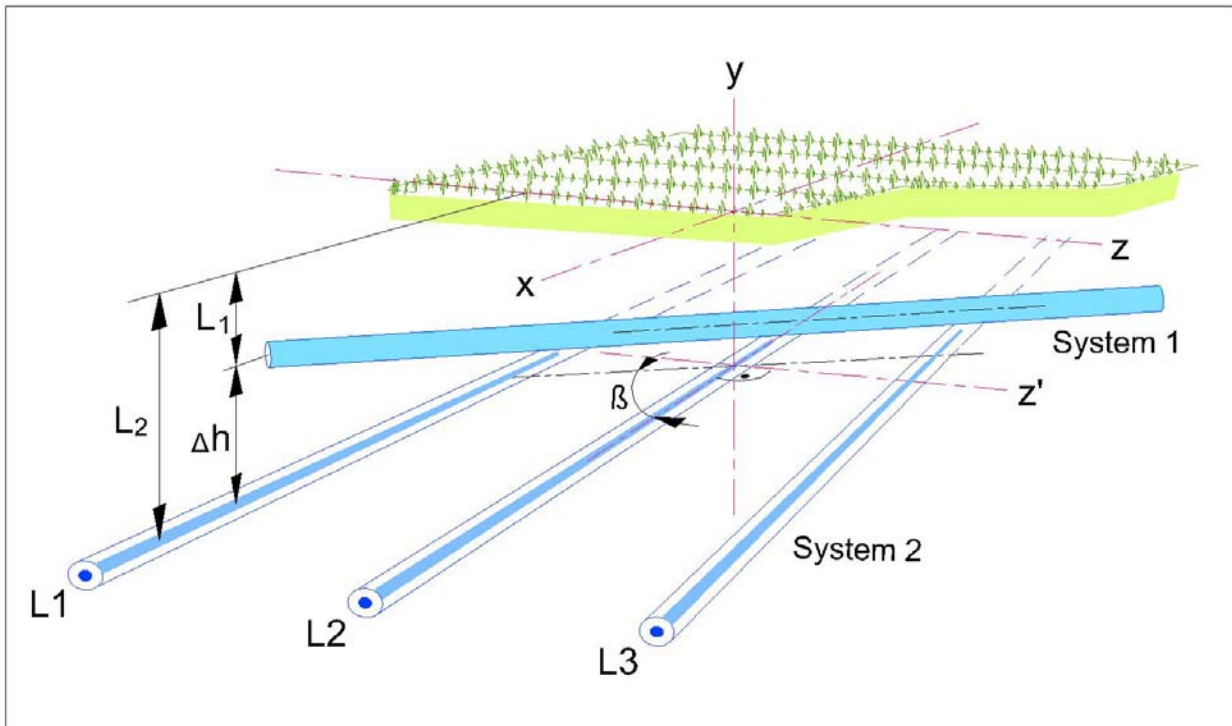


Bild 6: Anordnung und axialer Verlauf bei Kabelkreuzungen gem. IEC 60287-3-3

Für jedes der beiden sich kreuzenden Systeme wird ein Reduktionsfaktor DF (engl. *Derating Factor*) in Bezug auf die Belastbarkeit ohne Einfluss des jeweils anderen Systems (Wärmequelle) definiert. Dieser Reduktionsfaktor ist im wesentlichen abhängig von

- den Verlegetiefen L_1 und L_2 der beiden Systeme,
- dem Kreuzungswinkel β ,
- der Beeinflussungszone z_{max} (unterteilt in N Intervalle Δz) und
- den Parametern der Strombelastbarkeit im unbeeinflussten Zustand beider Systeme.

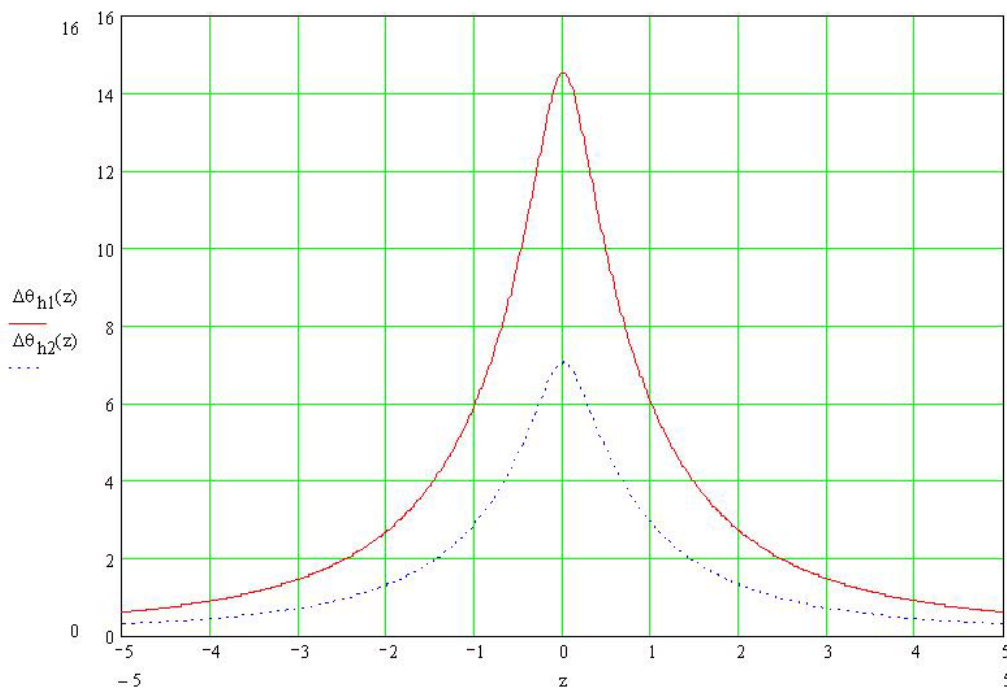


Bild 7: Typische axiale Leitertemperaturverteilung zweier sich kreuzender Kabel gem. IEC 60287-3-3

Bei der Berechnung des Reduktionsfaktors wird unterschieden zwischen *einfacher* Kreuzung durch ein dreiadriges Kabel oder eine andere konzentrierte Wärmequelle, wie z.B. ein Fernwärmerohr, und *multipler* Kreuzung, z.B. durch drei einadrige Kabel. Ausgehend von der Berechnung der Kabelbelastbarkeit im unbeeinflussten Zustand wird dann in einem iterativen Verfahren die durch das jeweils andere System verursachte Temperaturerhöhung des Leiters für alle Intervalle Δz innerhalb der Beeinflussungszone z_{\max} berechnet (siehe Bild 7).

Für die Bestimmung der Belastbarkeit beider Systeme gleichzeitig ist ein iteratives Verfahren anzuwenden. Hierzu wird zunächst der Reduktionsfaktor des einen Systems bei maximaler Belastung des anderen berechnet. Dieser Reduktionsfaktor wird dann auf den maximal zulässigen Strom des ersten angewendet. Dann wird der Reduktionsfaktor des zweiten Systems bei der nun reduzierten Belastbarkeit des ersten Systems berechnet, woraus sich der reduzierte zulässige Strom des zweiten ergibt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis sich ein stabiler Zustand zwischen den beiden Systemen ergibt.

Die Praxisbedeutung dieser neuen Norm kann anhand von folgendem Beispiel veranschaulicht werden. Bei einem Kraftwerk waren die Leiterquerschnitte der drei Kraftwerksausleitungen zu bestimmen. Aufgrund der Anlagenkonfiguration und der örtlichen Gegebenheiten musste eine der drei Verbindungen die beiden anderen unterhalb in einem Winkel von 45° bis 90° kreuzen. Aufgrund der grösseren Verlegetiefe wurde entschieden, bei dem kreuzenden System von Dreieck- auf Flachverlegung überzugehen. Für die die beiden oberen Systeme wurde jedoch die Dreiecksverlegung beibehalten. Auf diese Weise konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass bei dem kreuzenden System auf eine (erwartete) Querschnittserhöhung verzichtet werden konnte. In Einzelfällen kann es sogar notwendig sein, an solchen Stellen zusätzlich Lüftungsrohre zu installieren, um die Umgebungstemperatur mittels natürlichem Luftzug zu kühlen. Die dieser Lösung zugrundeliegenden Überlegungen wurden bereits früher hier im SEV-Bulletin veröffentlicht [12].

Grenzen der Berechnung der Kabelbelastbarkeit nach IEC 60287 anhand von Praxisbeispielen

Die bedeutendste und grundlegende Norm für die Kabelbelastbarkeitsberechnung IEC 60287 ist hinsichtlich verschiedener in der Praxis benötigter Rechenmethoden stark limitiert. Wichtige, in der Praxis bereits verwendete Rechenmethoden für übliche Installationsvarianten, gerade wenn sie die Erhöhung der Stromtragfähigkeit (wie z.B. durch forcierte Kühlung oder Ventilation) betreffen, haben bislang noch keinen Eingang in die darin beschriebenen Berechnungsgrundlagen gefunden. Bei derartigen Themenstellungen ist man in der Praxis auf weitergehende Literatur aus eher forschungsnahen Gremien (wie z. B. Cigré) oder die Dokumentation von Praxisbeispielen angewiesen. Im folgenden Abschnitt sollen daher einige der wichtigsten Grenzen der IEC 60287 aufgezeigt und weitergehende Berechnungsmethoden zu deren Lösung in ihren Grundzügen beschrieben werden. Dies sind

1. Gräben und Rohrböcke mit aussergewöhnlichen Seitenverhältnissen ($x/y > 3$)
2. Kabelumgebungen aus Materialien verschiedener Resistivität
3. Einsatz von Kühlmitteln, forcierte Kühlung bei im Boden verlegten Kabeln
4. Verlegung von Kabeln in Kabeltunneln, Einsatz von (Tunnel-)Ventilation

Einige dieser Themen befinden sich bereits auf den Planungslisten der entsprechenden Arbeitsgruppen von Normungsgremien. Ihre Umsetzung wird aber (aufgrund des teilweise komplizierten Sachverhalts) noch geraume Zeit dauern. Eine Methode, die auch in diesem Zusammenhang immer wieder benötigt wird ist die Finite-Elemente-Methode (FEM). Sie wurde insbesondere für die Kabelbelastbarkeitsberechnung bereits umgesetzt und in einem Technischen Bericht (TR) von IEC veröffentlicht [13]. Mit ihrer Hilfe kann praktisch jede zweidimensionale Verlegung relativ leicht nachgebildet werden. Entsprechende Software-Module existieren bereits auf dem Markt.

1. Gräben und Rohrblöcke mit aussergewöhnlichen Maßen

Trotz aller Nachteile oder Komplikationen für den elektrischen Betrieb kann es aus rein thermischen Gründen notwendig sein, sehr große Phasenabstände bei der Trassenauslegung zu wählen. Insbesondere bei Grenzleistungen kann dies zu grossen Trassenbreiten führen (siehe Bild 8).

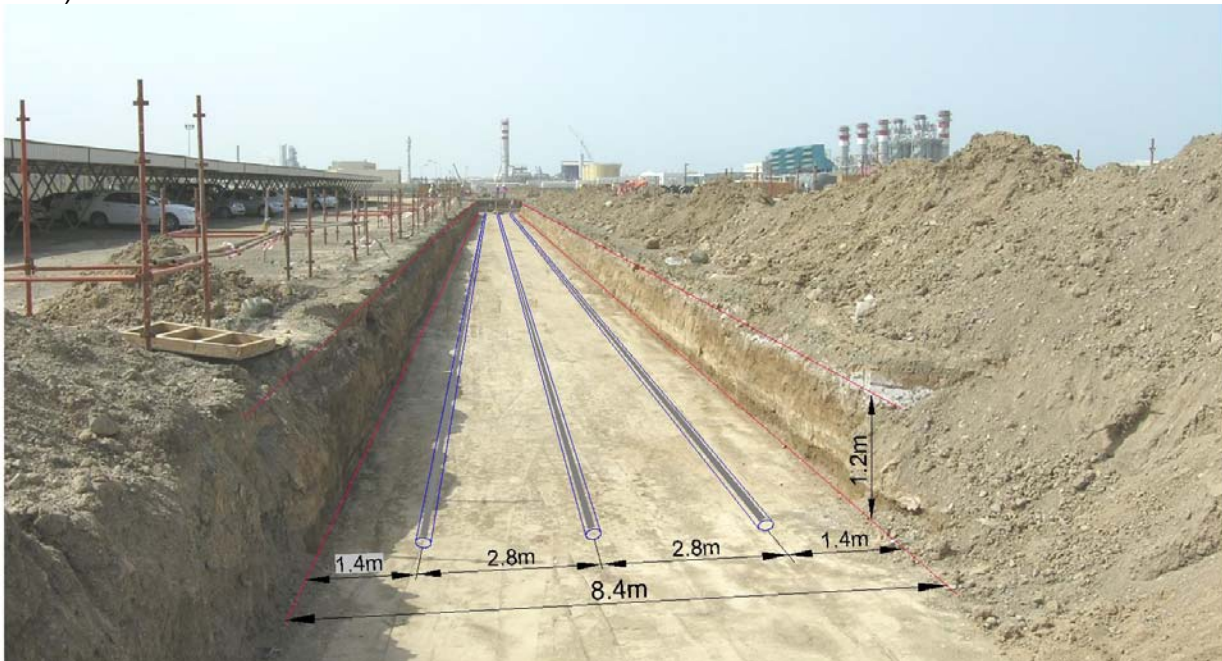


Bild 8: Kabelgraben mit aussergewöhnlichen Dimensionen (Seitenverhältnis Breite/Höhe=7)

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 T_4 . In 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 in den bereits eingangs erwähnten Formelsystem von J.H. Neher and M.H. McGrath [4]. Ihre Untersuchungen wurden durchgeführt an den – in der USA gneuso wie in der Schweiz üblichen – Rohrblöcken. Basierend auf der Annahme, alle vier Seiten des Rohrblockes seien eine Isotherme definierten sie einen Kreis mit dem Radius x , der die Innenseiten des Rohrblockes 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 oben dargestellten Beispiels ($y/x=7$), so ist offensichtlich, dass hierbei die vier Seiten keine Isotherme mehr bilden (siehe Bild 9) und folglich die bekannten Formeln nicht mehr angewendet werden dürfen. Abhilfe schafft ein IEEE-Paper aus dem Jahre 1988 [14], in dem für bestimmte Konfigurationen mit $y/x > 3$ die modifizierten Geometriefaktoren auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet wurden.

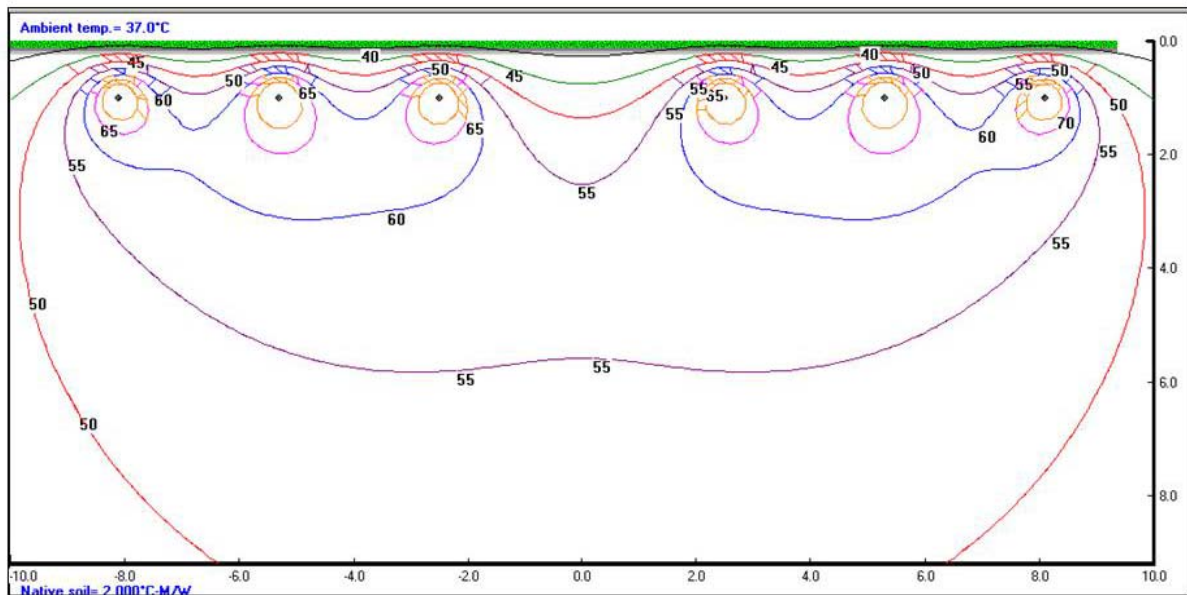


Bild 9: Zugehörige Temperaturverteilung zum obigen Beispiel (erstellt mit Cymcap)

In der jüngeren Vergangenheit erschien eine weitere Untersuchung zu diesem Thema, die am Beispiel eines rechteckigen Rohrblocks die Gültigkeit sowohl der Neher-McGrath- als auch der IEC-Formeln, ebenfalls mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM), überprüfte [15]. Danach kann bei genauerer Nachbildung der Kabelumgebung und der Rückfüllung eine um 30% höhere Kabelbelastbarkeit nachgewiesen werden.

2. Kabelumgebungen aus Materialien verschiedener Resitivität

In der Realität findet man praktisch nie Umgebungsbedingungen vor wie jene, wie sie in den gängigen Normen (IEC 60287 und IEC 60853) zugrundegelegt werden. IEC 60287 verlangt einerseits lediglich komplett homogene Rückfüllungen mit einheitlicher thermischer Resitivität oder alternativ geometrisch klar definierte Rohrböcke in homogener Umgebung. Obwohl die entsprechenden Formeln der Berechnung der Kabelbelastbarkeit für im Boden verlegte Kabel nach IEC 60287 bereits einige Reserven beinhaltet, kann es vorteilhaft sein, die unmittelbare Kabelumgebung thermisch genauer zu beschreiben. Das gilt jedoch nicht für teilweise oder gänzlich ausgetrocknete Bereiche. Hierfür behalten die entsprechenden Formeln in IEC 60287 auch weiterhin ihre Gültigkeit. Gemeint sind Verhältnisse, wie sie in Bild 10 dargestellt sind.

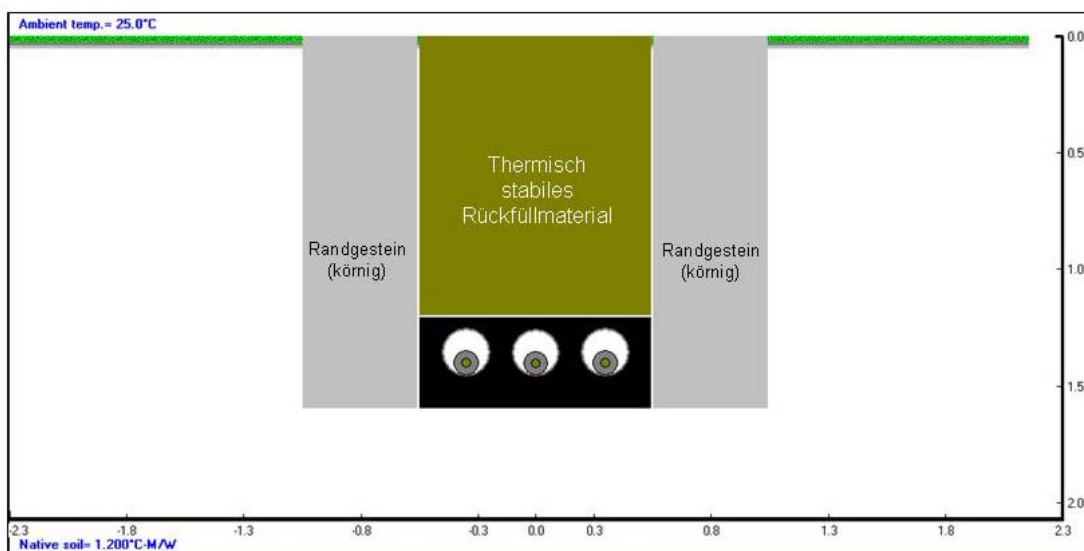


Bild 10: Beispiel für eine Verlegung

Eher der Vollständigkeit halber sie erwähnt, dass in Electra Nr. 98 [16] ein analytischer Ansatz beschrieben wird, wie derartige Geometrien angegangen werden können. Aufgrund der Komplexität des Algorithmus soll jedoch an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen werden. Moderne Methoden basieren auf der Finite-Elemente-Methode (FEM), die wie bereits oben erwähnt, in [13] detailliert beschrieben ist. Das obige Beispiel wurde z.B. mit einem FEM-basierten Software-Modul der professionellen Kabelbelastbarkeits-Software *Cymcap* erstellt (www.cyme.com). Dieses erlaubt es, beliebige Umgebungsgeometrien aus einer grossen Anzahl an rechteckförmigen Bereichen zu definieren. Für den Praxis Einsatz kann dies sehr hilfreich sein, wenn man zum Beispiel Deckschichten einer signifikanten Dicke an der Oberfläche (Asphalt o.ä.) oder Anordnungen aus mehreren Rohrböcken mit einem gewissen Abstand und spezifischen Rückfüllmaterial dazwischen simulieren muss.

3. Einsatz von Kühlmitteln, forcierte Kühlung bei im Boden verlegten Kabeln

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


Grundsätzlich wird zwischen drei Kühlarten unterschieden:

1. *Interne Kühlung:*
 - Nur bei Ölkabeln möglich.
 - Kühlmittel (Kabel-/Isolieröl) wird durch Hohlkanal des Leiters gepumpt.
2. *Externe Kühlung (direkt):*
 - Auch direkte Oberflächenkühlung genannt.
 - Nur bei Kabeln in Rohren (oder Trögen) möglich.
 - Übertragung der Wärme direkt an das die Kabeloberfläche umgebende Kühlmedium.
3. *Externe Kühlung (indirekt):*
 - Auch indirekte Oberflächenkühlung genannt.
 - Bei im Boden verlegten Kabeln möglich.
 - Kühlmittel wird durch separate parallel zu den Kabeln verlegte Kühlrohre gepumpt.

Unter der Annahme dass die gesamte im Kabel erzeugte Verlustleistung erzeugte Wärmeleistung unmittelbar an ein Kühlmedium abgegeben wird, lässt sich das gekühlte Kabelsystem nach [17] vereinfacht wie folgt beschreiben:

$$W'_{ab} = c_k \cdot Q_k \cdot \Delta\theta \cdot \frac{1}{l_k}$$

- mit
- W'_{ab} = vom Kabel erzeugte Verlustleistung (in W/m)
 - c_k = spezifische Wärmekapazität des Kühlmediums (in Ws/Km³)
 - Q_k = Volumenstrom des Kühlmediums (in m³/s)
 - $\Delta\theta = \theta_a - \theta_e$ = Temperaturdifferenz zwischen Aus- und Eintritt (in K)
 - l_k = Länge des Kühlabschnitts zwischen Ein- und Austritt (in m)

Wie man der folgenden Tabelle mit verschiedenen möglichen Kühlmedien entnehmen kann, eignet sich Wasser besonders gut aufgrund seiner  hohen spezifischen Wärmekapazität, aber auch aufgrund seiner ökologischen **Bedenklichkeit.**

Kühlmedium	spezifische Wärmekapazität c_k (Ws/K)
Luft bei 1 bar	1.3
Stickstoff (N ₂) bei 15 bar	12.5
Kabelöl	1750
Wasser	4180

Die obige Berechnungsformel erlaubt zumindest eine Abschätzung des Kühlmittelbedarfs und der Temperaturverhältnisse an Anfang und Ende. Viel detailliertere analytische Berechnungsmethoden zur Berechnung der Kabelbelastbarkeit bei forcierter Kühlung für o.g. Konfigurationen findet man für den eingeschwungenen Zustand in Electra Nr. 66 [18] und für transiente bzw. zyklische Belastung in Electra Nr. 104 [19]. Danach lässt sich für alle beteiligten Elemente i , also die

Wärmequellen im Kabel (also Leiter und ggfs. Schirm) und die Kühlelemente, das exakte Temperaturprofil $T_i(x)$ entlang eines Kühlabschnittes berechnen. Hierzu werden zunächst die thermischen Widerstände zwischen allen beteiligten Elementen berechnet. Bei externer indirekter Kühlung und mehreren parallel geführten Kühlrohren kann diese Berechnung sehr aufwendig und kompliziert werden, da die entsprechenden aufgestellten Matrizen sehr gross sind. Grundidee dieser Berechnungsmethode ist jedoch immer, dass man ausgehend von der Umgebungstemperatur T_a einerseits die (positive) längenabhängige Temperaturdifferenz $\Delta T_1(x)$, die sich aus der Erwärmung durch die beteiligten Wärmequellen ergibt, und andererseits die (negative) längenabhängige Temperaturdifferenz $\Delta T_2(x)$, die sich aus der Kühlung durch die beteiligten Kühlelemente ergibt, berechnet.

$$T_i(x) = T_a + \Delta T_1(x) + \Delta T_2(x) \text{ wobei } \Delta T_1(x) > 0 \text{ und } \Delta T_2(x) < 0$$

Der Differenzanteil ΔT_2 enthält den exponentiellen Verlauf der abgeführten Wärme entlang x . Über R_{ij} könnten auch vorübergehend entlang des Kühlabschnittes sich ändernde Abstände von Kabel (Wärmequelle) und Kühlelement berücksichtigt werden.

Als Längenintervall Δx empfiehlt sich nach [18] – auch zur Überprüfung der Druckverhältnisse im Kühlrohr bei langen Trassen bzw. Kühlabschnitten ein Wert von 500m. Bei kürzeren genügen, um den Rechenaufwand zu begrenzen, entsprechend weniger, also etwa 100m.

Effektivität der verschiedenen Kühlmethoden

Zur Veranschaulichung der Effektivität der oben erwähnten Methoden, dienen die im Appendix von [18] beschriebenen Beispiele. In Bild 11 sind die entsprechenden Grabenquerschnitte, die Kühlkreislaufschemata und die Temperaturverläufe entlang der Kühlstrecke für die einzelnen Intervalle dargestellt.

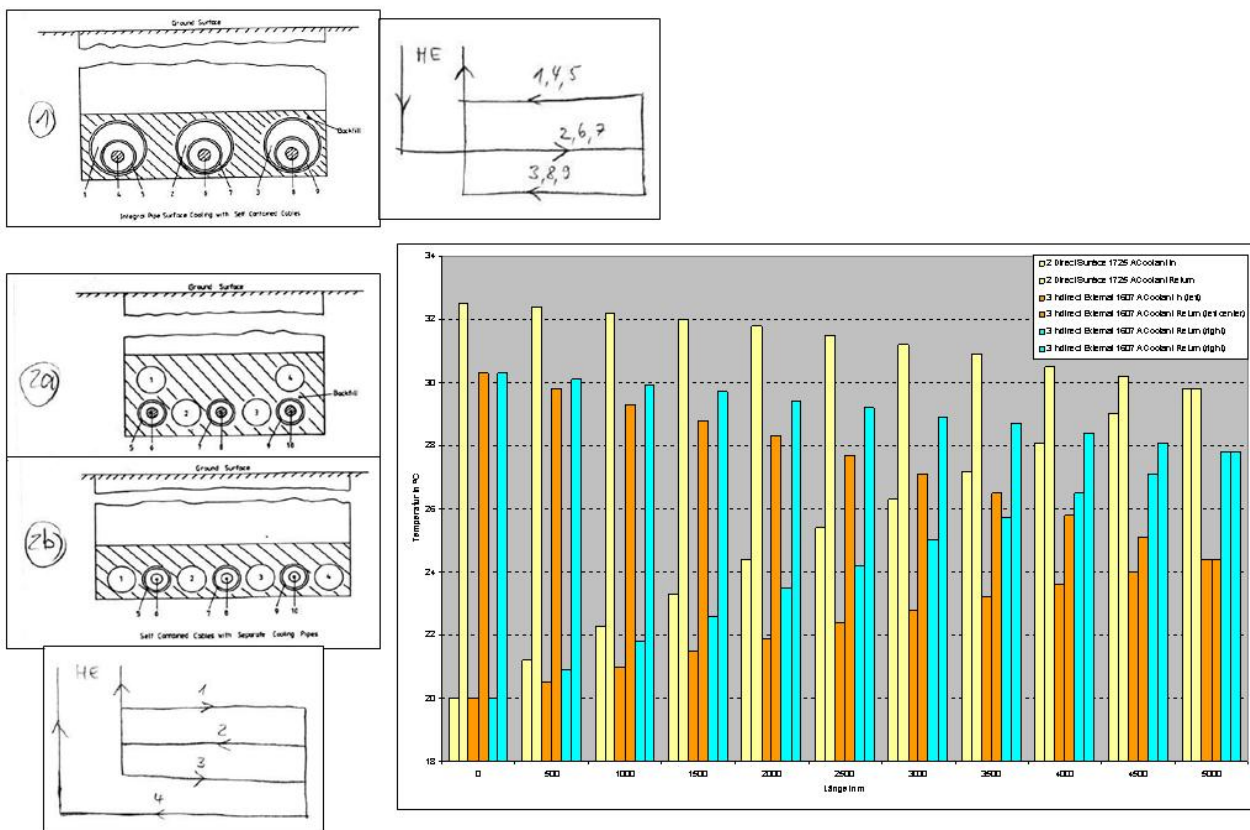


Bild 11: Temperaturverläufe bei externer forcierter Kühlung

Wie bereits erwähnt, sind nur die beiden externen Methoden (Methoden 2 und 3) für alle Kabelisolationstypen anwendbar. Wie man Tabelle 2 entnehmen kann, sind abhängig von der gewählten Konfiguration Erhöhungen der Kabelbelastbarkeit um 50 bis 100% möglich.

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

Tabelle 2: Effektivität der verschiedenen Kühlmethoden

Gegenüberzustellen ist dem jedoch der Mehraufwand für die Kühlanlage und allen dazugehörigen Systemen. Auch der Bau einer Bypass-Lösung an Muffenorten im Falle der direkten Oberflächenkühlung (Methode 2) ist hierbei zu berücksichtigen.

4. Verlegung von Kabeln in Kabeltunneln mit und ohne Einsatz von Ventilation

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 sind also dreidimensionale Effekte berücksichtigen.

Ausgehend jedoch vom einfachsten Fall, ebenerdig verlegten Kabelkanälen mit thermisch stabiler Rückfüllung, über luftgefüllte ebenerdig verlegte Kabelkanäle und Kabelkanäle mit vollständiger Überdeckung bis hin zu sehr tiefen speziellen Kabeltunneln sind heutzutage alle Verlegearten anzutreffen. Die zugehörige Berechnung der Kabelbelastbarkeit für diese Varianten ist jedoch teilweise relativ komplex und hat bisher noch keinen Eingang in die gängigen Normen gefunden.

Ebenerdige rückgefüllte Kanäle

Für ebenerdige rückgefüllte Kanäle gibt 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 überhaupt nicht berücksichtigt.

Alternativ könnte aber auch mit den weiter oben beschriebenen Methoden zu „Kabelumgebungen aus Materialien verschiedener Resistivität“ gerechnet werden.

Ebenerdige luftgefüllte Kanäle

Die einzige in IEC beschriebene Methode für die Berechnung der Kabelbelastbarkeit von Kabeln in Kanälen betrifft Anordnungen von *ebenerdigen* luftgefüllten Kanälen, wie man sie z.B. häufig in niedrigeren Spannungsebenen und bei Bahnstromanwendungen findet. Danach wird mit der im Kanal erzeugten gesamten Verlustleistung für einen bestimmten Strom und mit Hilfe des thermisch wirksamen Umfangs des Kanals (also Boden und Wände, nicht Deckel) eine Temperaturerhöhung $\Delta\theta_{tr}$ definiert. Mit ihr berechnet man dann den externen thermischen Widerstand T_4 gemäss der „normalen“ Berechnung von Kabeln in freier Luft nach IEC 60287-2-1 und damit den Strom. Dieser Methode kann lediglich als grobe Abschätzung dienen, da hierin bereits alle Formen der Wärmeabgabe an die Umgebung pauschal berücksichtigt sind.

Etwas genauer ist die Methode zur Berechnung von luftgefüllten Kabelkanälen nach [20]. Ihr liegt ein Modell zugrunde, welches die folgenden 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 hierzu. Man schreibt also:

$$T_4 = \frac{1}{\frac{1}{T_K} + \frac{1}{T_{St}}} + T_L \text{ mit}$$

T_K Wärmewiderstand der Konvektion,

T_{St} Wärmewiderstand der Strahlung,
 T_L Wärmewiderstand der Wärmeleitung.

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, Einsatz von Ventilation

In den vergangenen etwa zehn Jahren wurden in einigen europäischen Großstädten sogenannte *Bulk Power Transmission*-Systeme realisiert, bei denen grosse Leistungen auch in der Höchstspannungsebene bis in die Lastzentren von Ballungsgebieten übertragen werden [21] [22]. Oft bieten sich hierfür in Ballungsräumen als einzige technische Lösung relativ lange unterirdische Kabeltrassen in speziellen, teilweise sehr tief liegenden Kabeltunneln an. Bekannte Beispiele hierfür sind z.B. die 400kV-Systeme in Berlin, London und Madrid. Ähnliche Systeme findet man aber auch z.B. in Tokio, Singapur, Chicago und Auckland.

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

Eingehende Untersuchungen und Hinweise zur Berechnung der Strombarkeit von Kabeln in Kabeltunneln liegen bereits seit einigen Jahrzehnten vor. Electra Nr. 143 [23] und 144 [24] aus dem Jahr 1992 beschreiben jedoch zum ersten Mal umfassend die bis dahin gesammelten Erkenntnisse in einem einheitlichen numerischen Formelsystem. Berücksichtigt werden hierbei auch forcierte Luftkühlung mittels Ventilation, Besonderheiten von grossen Verlegetiefen und zyklische bzw. transiente Belastung der Kabel. Das zugrundeliegende Modell ist bezüglich der Wärmeabgabemechanismen viel detaillierter als das oben erwähnte nach [20]. Danach müssen zusätzlich zu bzw. abweichend von den oben genannten die folgenden Übertragungsarten berücksichtigt werden (siehe Bild 12):

- Konvektion von der Kabeloberfläche über die umgebende Tunnelluft,
- Konvektion von der umgebenden Tunnelluft an die Tunnelwand,
- Wärmeleitung in Längsrichtung aufgrund von natürlichem Zugwind oder Ventilation.

Grundvoraussetzungen für dieses Modell sind jedoch, dass alle Kabel identisch und gleich belastet, also dieselbe Leitertemperatur. Ausserdem wird sich auf rein axiale und radiale Effekte beschränkt.

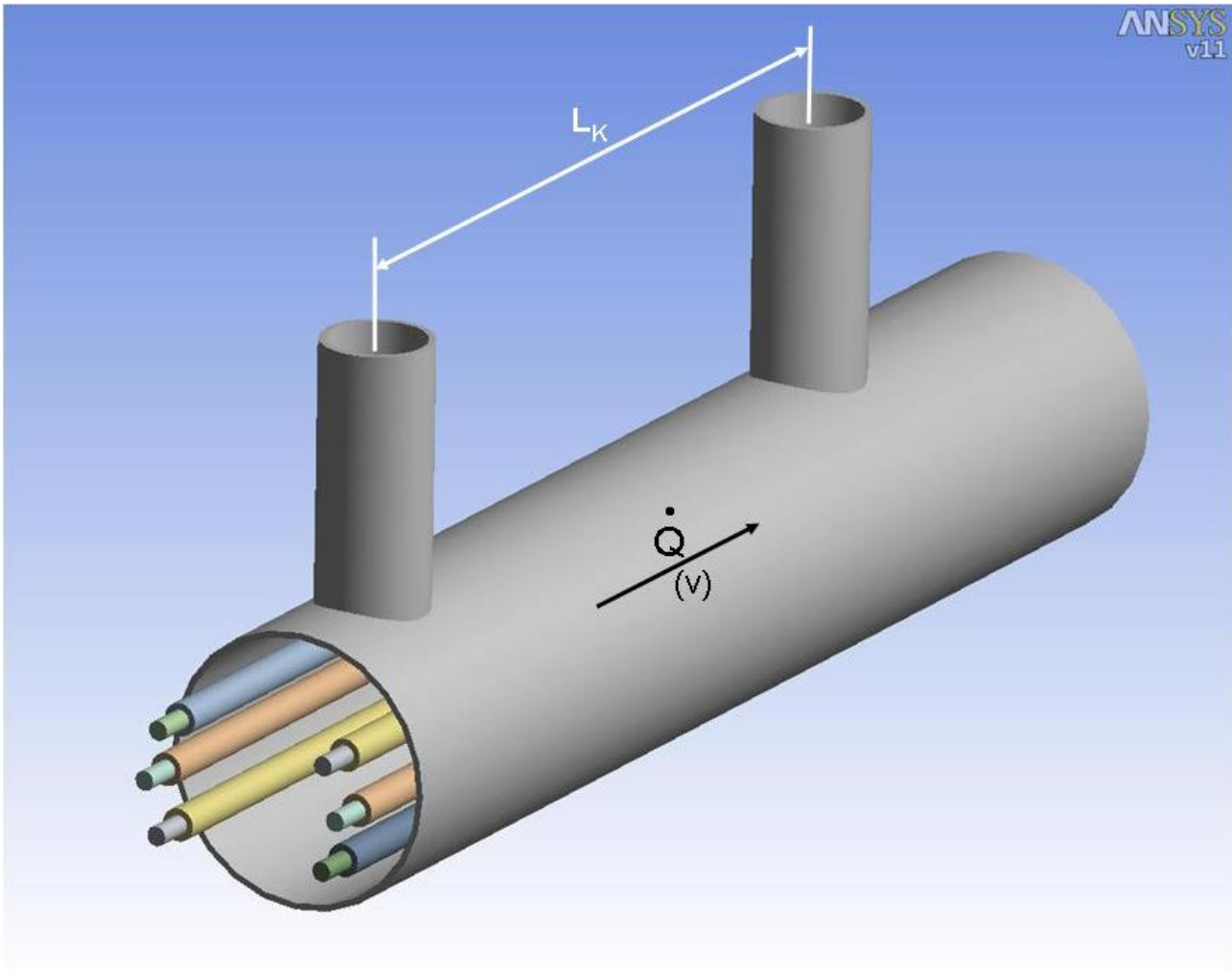


Bild 12: Tunnel mit FEM-Raster (3D-Ansicht)

Über die Definition eines Kühlaschnittes als Länge L_k zwischen Lufteintritt und Luftaustritt und seine Zerlegung in N integrale Abschnitte kann dann anhand der bekannten Lufteintrittstemperatur und der Windgeschwindigkeit die Temperaturverteilung aller im Tunnel vorhandenen Elemente für alle N Positionen detailliert berechnet werden. Grundlage hierzu bildet das Gleichgewicht aus der sich linear aufbauenden Wärmeabgabe der Kabel und Wärmeabfuhr über das bewegte Luftvolumen an jeder der N Tunnelquerschnitte, wobei die Kabelverluste auf Basis eines angenommenen Stroms berechnet werden. Am Ende eines jeden Kühlabchnittes darf die Kabel-Leitertemperatur das jeweilige Maximum (z.B. 90°C für VPE) nicht überschreiten. Über die Anpassung des angenommenen Stroms oder die Änderung der Windgeschwindigkeit lässt sich dieses Gleichgewicht anpassen und somit die Strombelastbarkeit ermitteln bzw. optimieren und die Ventilationsleistung bestimmen.

Schlussbemerkung

Nach mehreren Jahren geringer Aktivität hat das Thema *Kabelbelastbarkeitsrechnung* auch in den nationalen und internationalen Normungsgremien wieder an Bedeutung gewonnen. Wie eingangs bereits erwähnt, steht sie inzwischen sowohl wegen Aspekten zur Steigerung der Versorgungssicherheit bei immer stärker ausgelasteten Leitungskapazitäten als auch wegen geänderter gesetzlicher Bestimmungen für die Beeinträchtigung durch elektromagnetische Strahlung im Zentrum des Interesses.

Die in diesem Artikel erläuterten Methoden zur Berechnung der Kabelbelastbarkeit sollen dabei 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 eingreifen

zu können. Andererseits gibt der Artikel dem Planer Hinweise auf eine Vielzahl von verfügbaren Methoden an die Hand, um Neuanlagen bereits im Planungsstadium zu optimieren, gegebenenfalls Zusatzmaßnahmen zur Leistungssteigerung auszulegen und deren Aufwand abzuschätzen.

Angesichts veränderter Umweltbedürfnisse, wie sie insbesondere 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, sind auch in Zukunft für alle Beteiligte die notwendigen Kenntnisse für eine sorgfältige und rationelle Planung von Nutzen.

Referenzen

- [1] TenneT TSO B.V. (Übertragungsnetzbetreiber der Niederlande): Responsible and innovative underground cable installation. Positionspapier 27.05.2008 (www.tennet.org)
- [2] M. Márquez, G. Alvarez: Active and reactive operation area of insulated cables. Cigré 2008, Paper B1-310
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/1998_Auckland_power_crisis
- [4] 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.
- [5] IEC 60287: Electric cables Calculation of the current rating.
- [6] IEC 60853: Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables. Part 1: ≤ 36 kV, Part 2: > 36 kV.
- [7] Cigré: Guide to the protection of specially bonded cable systems against overvoltages. Electra Nr. 128 (1/1990)
- [8] Cigré: Special bonding of high voltage cable systems. TB 283 (10/2005)
- [9] P.M. Dejean, E. Zaccone et al.: The additional losses in the metallic screens of HV cables. Jicable '99.
- [10] Cigré: Large cross-sections and composite screen designs. TB 272 (6/2005)
- [11] IEC 60287-3-3: Electric cables - Calculation of the current rating, Part 3-3: Sections on operating conditions - Cables crossing external heat sources. (bzw. Vorgängerdokument IEC 20/807/CDV).
- [12] H. Brakelmann: Kühlung von Kabelkreuzungen durch Belüftungsrohre. SEV-Bulletin 15/2000
- [13] IEC TR 62095: Electric cables – Calculations for current ratings – Finite element method.
- [14] 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.
- [15] J. Karlstrand, G. Henning: Modern FEM-tools – an example of cables installed in duct-banks. Jicable 2007, Paper C.521
- [16] Cigré: The calculation of the effective external thermal resistance of cables laid in materials having different thermal resistivities. Electra Nr. 98 (1/1985)

- [17] E. Peschke, R. v. Olshausen: Kabelanlagen für Hoch- und Höchstspannung. Siemens, Publicis-MCD-Verlag, 1998
- [18] Cigré: The calculation of continuous ratings for forced cooled cables. Electra Nr. 66 (10/1979)
- [19] Cigré: Forced cooled cables – Calculation of thermal transients and cyclic loads. Electra Nr. 104 (1/1986)
- [20] L. Heinhold, R. Stubbe: Kabel und Leitungen für Starkstrom – Power Cables. 2003
- [21] Argaut, Schell et. al.: Large projects of EHV underground cable systems. Jicable 2007, Paper A.2.1
- [22] Granadino, Schell et al.: Undergrounding the first 400kV Transmission Line in Spain, Jicable 2003
- [23] Cigré: Calculation of temperatures in ventilated cable tunnels (Part I). Electra Nr. 143 (09/1992)
- [24] Cigré: Calculation of temperatures in ventilated cable tunnels (Part II). Electra Nr. 144 (10/1992)
- [25] F. Schell: Grenzen der etablierten Kabelbelastbarkeitsberechnung nach IEC 60287 und ihre Bedeutung für die Netzqualität. www.technik-forum.ch -> Download -> Suche nach «Schell».

Angaben zum Autor

Dipl.-Ing. (TU) Fabian Schell ist Senior Engineer bei Pöyry Energy, ehemals Elektrowatt, in Zürich. Seit 2006 ist er Vorsitzender des Expertengremiums TK20_4 „Cable Rating“ im Technischen Komitee TK20 des CES (Electrosuisse).
Pöyry Energy AG, Hardturmstrasse 161, 8037 Zürich, fabian.schell@poyry.com