

FKH - / VSE – Fachtagung

9. November 2011

Berechnungsmethoden für Auslegung, Betrieb und Sicherheit von elektrischen Energieversorgungssystemen

Thermische Berechnung von Kabelanlagen

Dr. Thomas Heizmann

Dipl. El.-Ing. ETH

Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich

1987	Abschluss als El.-Ing. ETHZ
1994	Promotion als Dr. sc. techn. an der ETHZ
1995-1997	Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich, Versuchsingenieur
1998-2002	Nexans Suisse SA, Cortaillod, Leiter Engineering Energiekabel
seit 2003	FKH, Zürich, Versuchsingenieur und Vertreter Westschweiz

Thermische Berechnung von Kabelanlagen

Thomas Heizmann

Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich

Zusammenfassung

Für einen sicheren Betrieb ist es unerlässlich, die maximal zulässige Belastung von Kabelsystemen zu berechnen. Dies geschieht nach den IEC-Normen 60287 (Dauerlast) und 60853 (zyklische Last). Die in diesen Normen enthaltenen Berechnungsmethoden liefern vergleichbare und auch experimentell überprüfte Resultate.

Die Berechnung beruht auf einem thermischen Ersatzschaltbild mit Wärmequellen (z.B. den Leiter- und Schirmverlusten) und thermischen Widerständen (z.B. der Isolierung und der Umgebung). Das verwendete Formelsystem basiert auf Untersuchungen von J.H. Neher und M.H. McGrath aus dem Jahre 1957. Es handelt sich dabei um analytische Näherungsformeln, die oft konservativ sind. Neuere Untersuchungen verwenden numerische Methoden (z.B. die Finite-Elemente-Methode, FEM), die z.B. bei der Berechnung der Wirbelstromverluste in dünnen Schirmen zu wesentlich tieferen Verlusten führten.

Die grösste Unsicherheit bei der thermischen Dimensionierung von Kabelanlagen stammt aber vom externen thermischen Widerstand her (thermischer Widerstand der Umgebung). Neben methodischen Unsicherheiten bei der Berechnung (auch hier liegen Vorschläge für eine genauere Berechnung mit numerischen Methoden vor) spielt aber vor allem die natürliche Abhängigkeit des spezifischen thermischen Bodenwiderstands von Parametern wie Feuchtigkeit oder Temperatur eine wichtige Rolle. Dieser kann zwar lokal gemessen werden, kann sich aber örtlich und zeitlich verändern (z.B. durch Bodenaustrocknung).

Für die risikolose Auslotung der Belastungsgrenzen eines Kabelsystems ist eine verteilte On-Line-Messung der Temperatur daher sehr hilfreich, wenn nicht notwendig.

Thermische Berechnung von Kabelanlagen

Thomas Heizmann

Fachkommission für Hochspannungsfragen
Commission d'étude des questions relatives à la haute tension

1

Inhalt

- Normen
- Berechnung nach IEC 60287
- Grenzen der Berechnung nach IEC
- Beispiele

2

Normen

IEC 60287: Zulässiger Strom bei Dauerlast

IEC 60853: Zulässiger Strom bei zyklischer Last

IEC 60949: Zulässige Kurzschlussströme

IEC 60288: Leiter für isolierte Kabel

3

IEC 60287 Electric cables - Calculation of the current rating

Part 1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses

- 1: General
- 2: Sheath eddy current loss factors for two circuits in flat formation
- 3: Current sharing between parallel single-core cables and calculation of circulating current losses

Part 2: Thermal resistance

- 1: Calculation of thermal resistance
- 2: A method for calculating reduction factors for groups of cables in free air, protected from solar radiation

Part 3: Sections on operating conditions

- 1: Reference operating conditions and selection of cable type
- 2: Economic optimization of power cable size
- 3: Cables crossing external heat sources

4



IEC 60853 Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables.

Part 1: Cyclic rating factor for cables up to and including 18/30(36) kV

Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV and emergency ratings for cables of all voltages

Part 3: Cyclic rating factor for cables of all voltages, with partial drying of the soil

5



IEC 60949 Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects

IEC 60288 Conductors of insulated cables

6

Berechnungsprinzip (IEC 60287)

Thermisches Ersatzschaltbild mit Wärmequellen
und thermischen Widerständen

Wärmeabgabe

→ über die Erdoberfläche bei Bodenverlegung
oder

→ direkt an die Luft bei freier Verlegung

7

Wärmequellen

Leiterverluste $W_c = I^2 \cdot R_{DC} \cdot (1 + y_{skin} + y_{proximity}) = f(T_{Leiter})$

Dielektrische Verluste $W_d = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta$

Schirmverluste W_s (ohmsch und durch Wirbelströme)

($\lambda_1 = W_s / W_c$)

Magnetische Verluste W_A in der Armierung

($\lambda_2 = W_A / W_c$)

8

Thermische Widerstände

T_1 : therm. Widerstand der Isolierung ($T_1 = \rho/2\pi \cdot \ln(r_2/r_1)$)

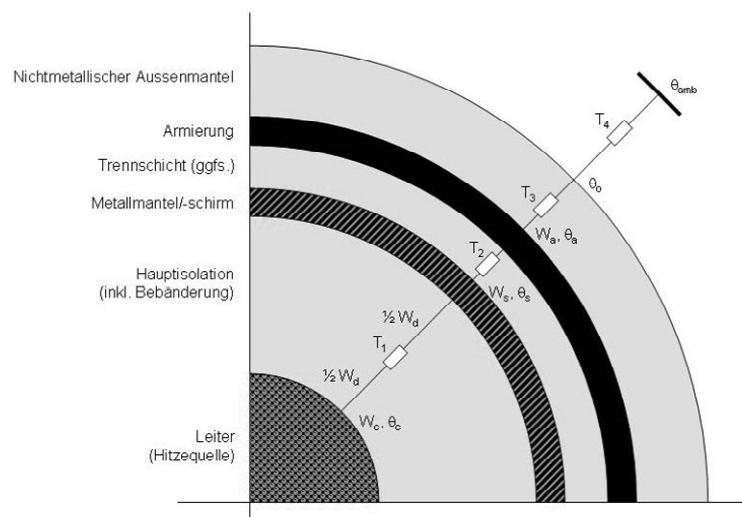
T_2 : therm. Widerstand des Mantels

T_3 : therm. Widerstand des Korrosionsschutzes der Bewehrung

T_4 : therm. Widerstand der Umgebung

9

Thermisches Modell eines Kabels

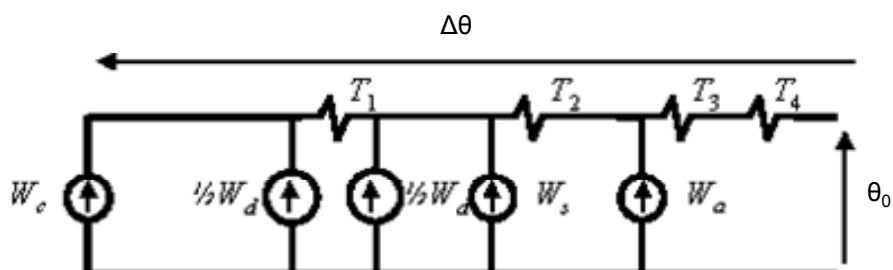


Figur aus Schell, F.: Thermische Grenzkapazität von Kabelsystemen berechnen. Bulletin SEV/VSE 1/2009, pp. 17-21.

10

Elektrisches Ersatzschaltbild

U	→	$\Delta\theta$
R	→	T
I	→	W



11

Temperaturerhöhung über Umgebungstemperatur:

$$\Delta\theta = (I^2 R + \frac{1}{2} W_d) T_1 + [I^2 R (1 + \lambda_1) + W_d] n T_2 + [I^2 R (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4)$$

Maximal zulässiger Strom:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4)]}{R T_1 + n R (1 + \lambda_1) T_2 + n R (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4)} \right]^{0,5}$$

- Gilt für Erdverlegung ohne Bodenaustrocknung und für in Luft verlegte Kabel ohne direkte Sonneneinstrahlung
- Bodenaustrocknung und Sonneneinstrahlung
→ Zusatzterm und Modifikation von T_4
- Zyklische Last → Modifikation von T_4 (Neher-Mc-Grath [2])
- Die Geometrie und der Einfluss der anderen Kabel ist in T_4 enthalten

12

Eingabedaten

Geometriegrößen:

Aufbau des Kabels (inkl. Anzahl (n) und Art der Leiter)
Schirmbehandlung (einseitig, beidseitig, cross-bonding)
Verlegeanordnung (Abstand der Kabel, Verlegetiefe)

Materialkonstanten:

- El. Widerstand des Leiters R_{DC}
Spezifische el. Widerstände und Temperaturkonstanten:
 $\rho_{Cu} = 1.7241e-08 \Omega \cdot m$; $\alpha_{Cu} = 3.93e-03 \text{ 1/K}$
 $\rho_{Al} = 2.8264e-08 \Omega \cdot m$; $\alpha_{Al} = 4.03e-03 \text{ 1/K}$
- Spezifische thermische Widerstände ρ :
(für die Berechnung von T_1)
Masse: 6 K·m/W
Öl/Papier: 5 K·m/W
EPR: 5 K·m/W
PE: 3.5 K·m/W
- Relative Permittivität ϵ_r und Verlustfaktor $\tan \delta$
der Isolation

- Elektrischer Widerstand des Schirms
 - Spezifischer thermischer Widerstand der Trennschicht
zwischen Schirm und Armierung (für Berechnung von T_2)
 - Elektrische und magnetische Eigenschaften der Armierung
 - Spezifischer thermischer Widerstand des Mantels
(für die Berechnung von T_3)
 - Thermischer Widerstand der Umgebung (T_4)
Enthält spezifischen thermischen Bodenwiderstand,
Geometrie und Einfluss der anderen Kabel
- $\rho_{Boden} = f(\text{Material, Dichte, Feuchtigkeit, Temperatur})$

13

Dimensionierungsgrundlagen CH

Max. Leitertemperatur 90 °C (XLPE/EPR)

{ Notbetrieb 110 °C (max. 8 h / Tag und 100 h / Jahr) }

Typische Werte für max. Bodentemperaturen:

10 °C im Winter, 20 °C im Sommer

Typische Werte für spez. thermischen Bodenwiderstand ρ :

1.0 K·m/W für Sand / normaler Boden

0.7 K·m/W für Beton

0.85 K·m/W für Betonrohrblock

14

Methodische Grenzen der Berechnung nach IEC 60287

Die IEC 60287 basiert auf Untersuchungen von J.H. Neher und M.H. McGrath aus dem Jahre 1957 [1]. Es handelt sich dabei um analytische Näherungsformeln, die oft konservativ sind.

Neuere Untersuchungen verwenden numerische Methoden (z.B. die Finite-Elemente-Methode, FEM), die bei der Berechnung von Wirbelstromverlusten in dünnen Schirmen zu wesentlich tieferen Verlusten führten (in IEC 60287-1-1 Ed. 2.0 von 2006 berücksichtigt).

Der Einsatz der FEM zur Berechnung von T_4 wird in einem IEC-Papier beschrieben [4].

Viele, von der Norm abweichende Fälle verlangen nach numerischen Methoden, die heute auch in Berechnungsprogrammen implementiert sind (siehe z.B. [6]).

15

„Natürliche“ Grenzen der Berechnung nach IEC 60287

$T_1 - T_3$ relativ genau berechenbar aus Kabelkonstruktion

Grösster Temperaturabfall ist aber über T_4 (ca. 70%)

T_4 bei Erdverlegung ist von physikalischen Parametern des Bodens abhängig

- Material und Dichte
- Feuchtigkeit (Bodenaustrocknung ab 50 °C)
- Bodentemperatur
- Verlegebedingungen (Tiefe ...)

ρ_{Boden} kann von 0.4 bis 4 K·m/W variieren (typisch 0.8 bis 1.3 K·m/W)

16

Beispiel: Auckland, Neuseeland

Ausfall von vier 110-kV-Kabel führte zu einem 5wöchigen Stromausfall im Stadtzentrum

Dimensionierungsgrundlagen:

Bodentemperatur 15 °C, therm. Bodenwiderstand 1.2 °C·m/W

Tatsächliche Werte:

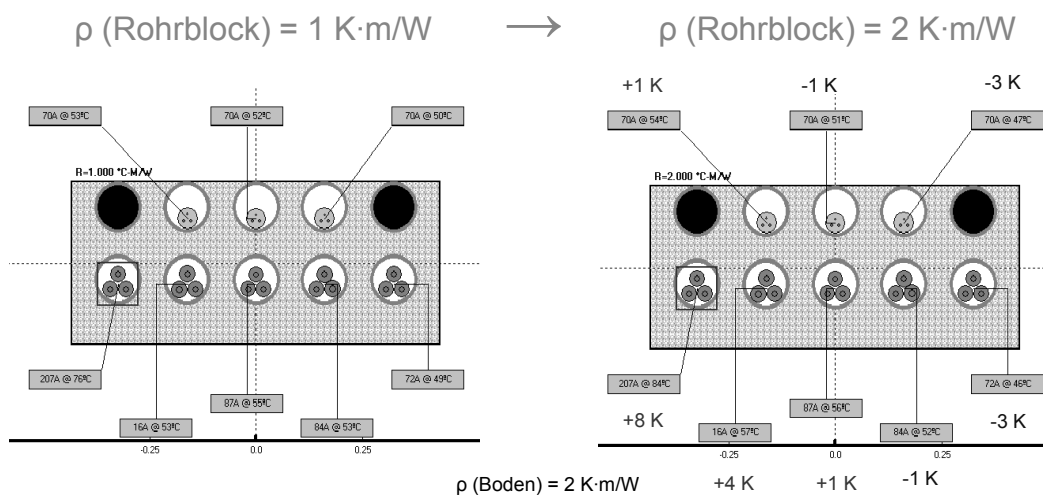
Bodentemperatur 22 °C, spez. Bodenwiderstand 0.56 - 6 °C·m/W

Folgen:

Kabel 100% überlastet, Leitertemperaturen bis 300 °C

17

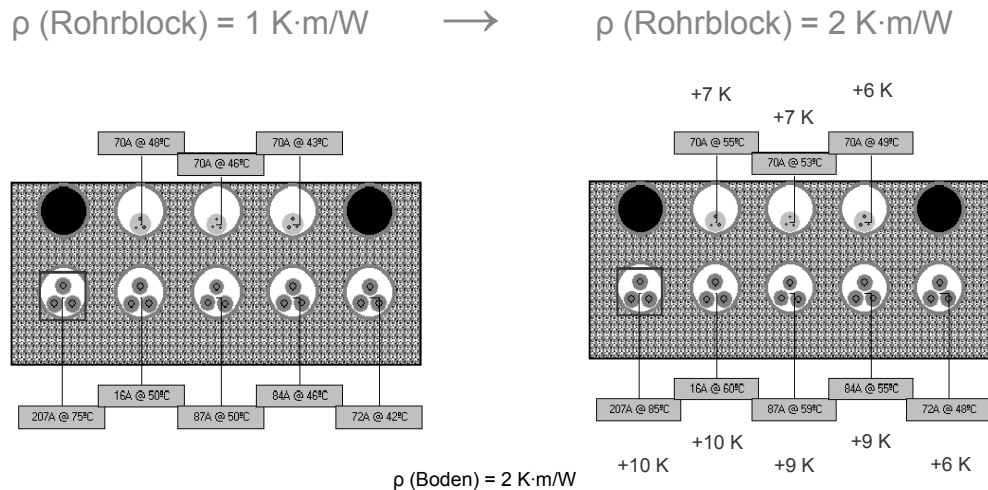
Beispiel einer ungenauen Berechnung nach IEC 60287



Berechnung mit Cymcap [6]

18

Berechnung von T_4 mit FEM → Konsistente Resultate

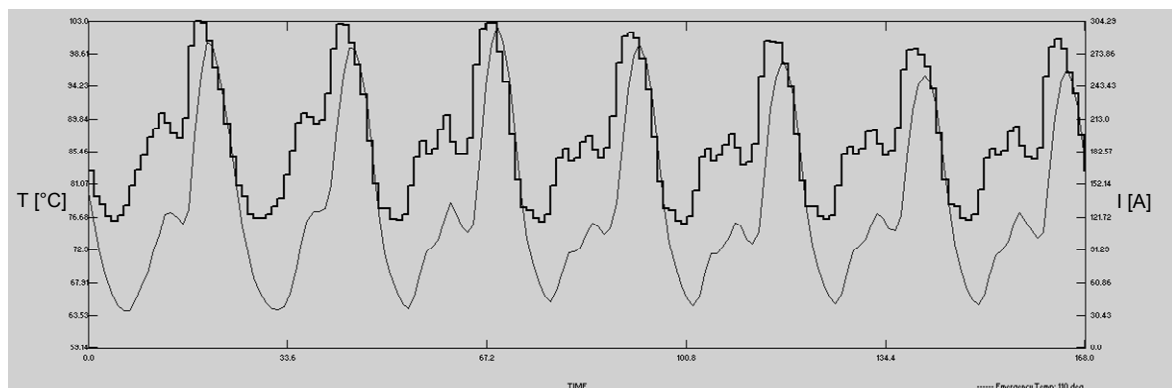


Berechnung mit Cymcap [6]

Beispiel: Berechnung mit realen Lastkurven

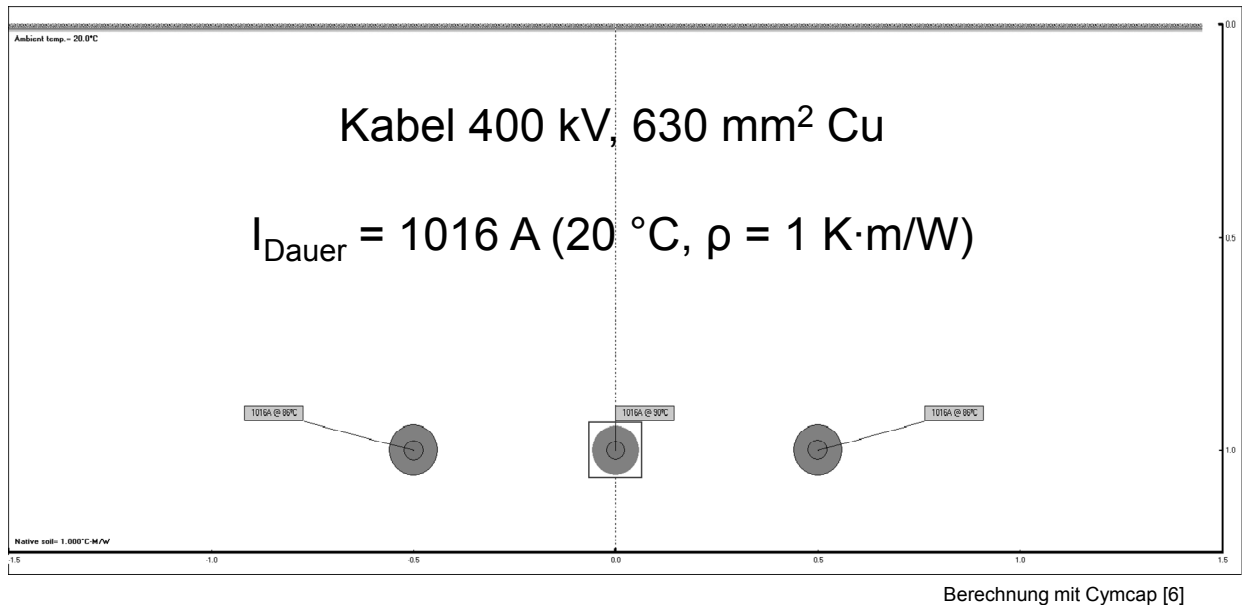
Reale Lastkurven (Intervall 15 min, Dauer bis zu 7 Tagen) können eingegeben werden

Berechnung des Temperaturverlaufs für jedes Kabel



Berechnung mit Cymcap [6]

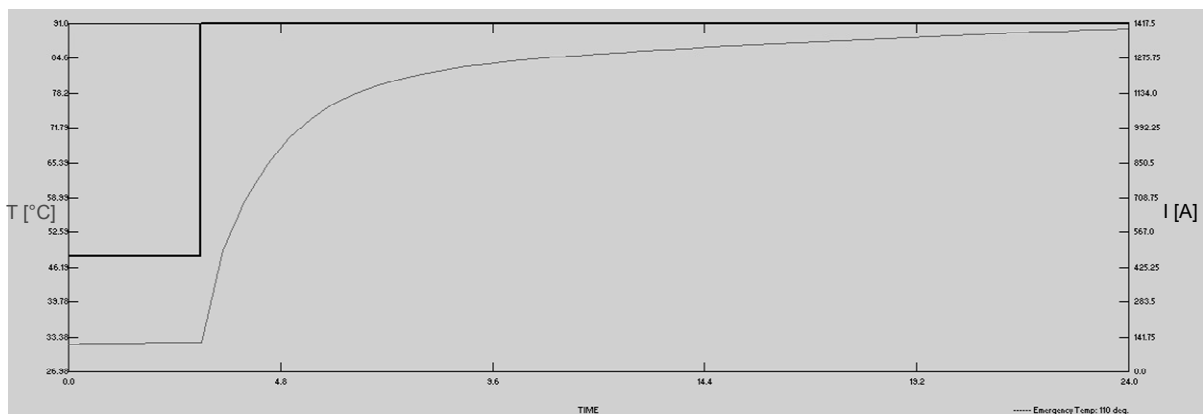
Beispiel: Sprungantwort



21

Vorbelastung 470 A → Sprung auf 1417.5 A ($1.4 \times I_{\text{Dauer}}$)

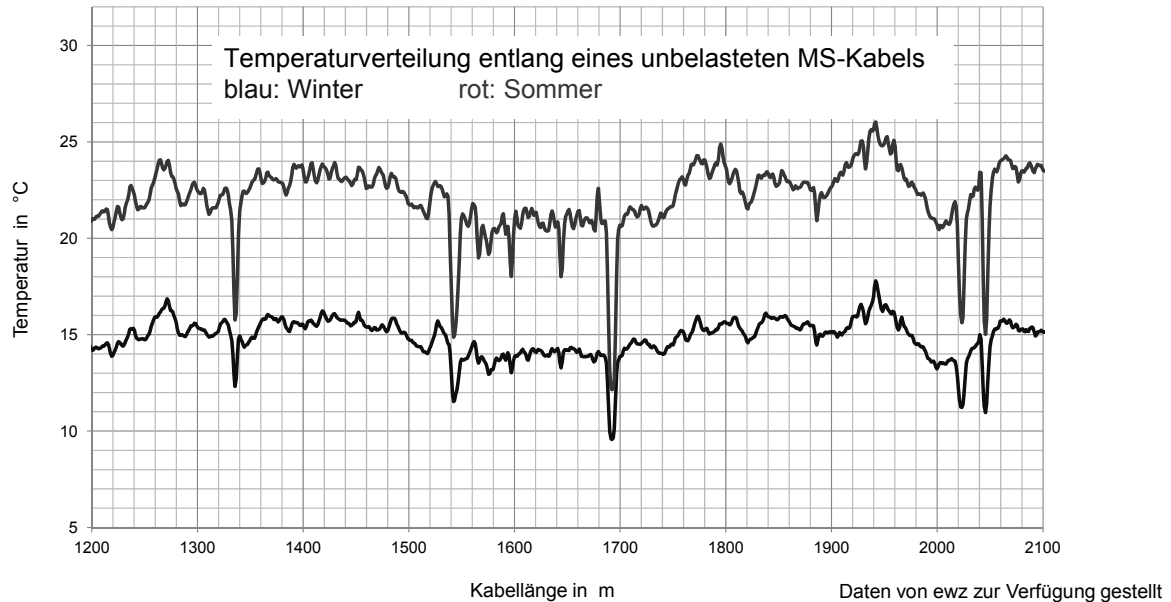
$T_{\text{start}} = 32 \text{ °C} \rightarrow$ steigt in 21 h auf 90°C



Berechnung mit Cymcap [6]

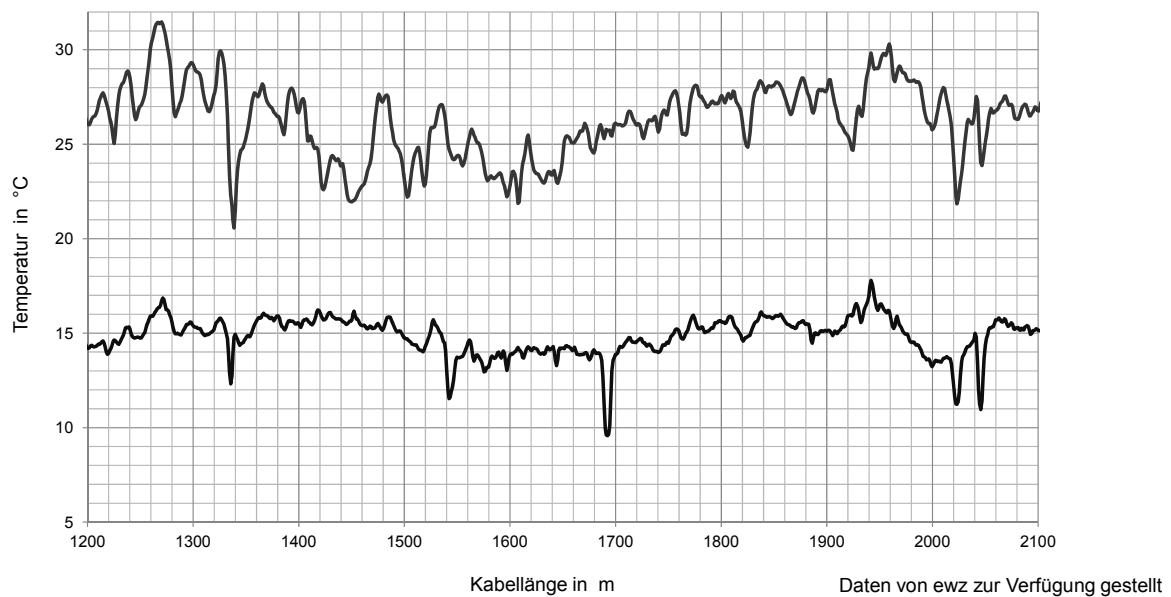
22

Beispiel: Verteilte Temperaturmessung



23

Temperaturverteilung entlang eines MS-Kabels mit und ohne Last
blau: ohne Last rot: mit Last



24

Schlussfolgerungen

- Die IEC-Normen erlauben die vergleichbare (und durch Messungen überprüfte) Berechnung der Belastbarkeit von Kabelsystemen
- Aufgrund des Alters der zu Grunde liegenden Formelsysteme gibt es heute genauere numerische Verfahren, die in Berechnungsprogrammen ebenfalls integriert sind
- Die grösste Unsicherheit liegt im spezifischen thermischen Widerstand des Bodens. Dieser kann zwar lokal gemessen werden, ist aber abhängig von Feuchte, Temperatur etc.
- Externe Wärmequellen (bekannte und unbekannte) können einen grossen Einfluss auf die Kabeltemperatur haben
- Für die risikolose Auslotung der Belastungsgrenzen eines Kabelsystems ist eine verteilte On-Line-Messung der Temperatur sehr hilfreich, wenn nicht notwendig

25

Referenzen

1. Neher, J.H., McGrath, M.H.: The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems. AIEE Transactions, vol. 76, part 3, October 1957, pp. 752-772.
2. Neher, J.H.: The transient temperature rise of buried systems. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-83, February 1964, pp. 102-114.
3. IEC TR 62095: Electric cables – Calculations for current ratings – Finite element method. 2003.
4. Anders, J.G.: Rating of electric power cables. IEEE Press, 1997.
5. Schell, F.: Thermische Grenzkapazität von Kabelsystemen berechnen. Bulletin SEV/VSE 1/2009, pp. 17-21.
6. Cymcap 5.1 Rev. 4. CYME International T&D Inc., Burlington, MA, USA.

26