

Wärmeleitfähigkeit verschiedener Bettungsmaterialien erdverlegter Stromtrassen und ihre Wirkung auf den Nennstrom

Von Ralf-Dieter Rogler

1 Ziel der Untersuchung

In Übertragungsleitungen verursacht der Stromfluss eine Verlustleistung, die zur Erwärmung der Leitung führt. Gemäß DIN VDE 0276 Teil 1000 darf diese Leistung nur so groß sein, dass sich das Betriebsmittel im Nennbetrieb zu keinem Zeitpunkt und an keiner Stelle über die zulässige Betriebstemperatur erwärmt [1]. Bei erdverlegten Leitungen bildet sich im Bettungsmaterial und Erdboden entlang des negativen Temperaturgradienten ein zweidimensionaler Wärmestrom zur Erdoberfläche hin aus. Die Dimensionierung erfolgt i.d.R. mit einem Zweischichtenmodell. Entsprechend der Modellvorstellung führt das Erreichen einer spezifischen Grenzüber Temperatur zum Austrocknen des Bodens [2]. Da trockenes Erdreich eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit als feuchtes Erdreich aufweist, resultiert daraus ein Anstieg der Über Temperatur der Leitung. Nach DIN VDE 0298 werden folgende Standardwerte angesetzt:

- Wärmeleitfähigkeit feucht: 1,0 W/mK
- Wärmeleitfähigkeit trocken: 0,4 W/mK
- Grenzüber Temperatur: 15,0 K

Der Boden wird im Weiteren als VDE-Sand bezeichnet.

Die thermischen Eigenschaften von Bettungsmaterialien sind von vielen Einflussfaktoren abhängig, daher ist es notwendig, die Eigenschaften des Bodens zu kennen und da wo unbekannt, im Labor zu messen. Es wurde ein Versuchsstand gefertigt, mit dem es möglich war, die thermischen Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit feucht, Wärmeleitfähigkeit trocken und Grenzüber Temperatur zu messen.

Der zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften angefertigte kubische Versuchsstand hatte eine Kantenlänge von ca. 1,0 m und war mit den zu untersuchenden Böden befüllt. Die Außenflächen des Würfels wurden versiegelt, so dass sich darin die absolute Wassermenge nicht ändern konnte. Im Zentrum des Würfels befand sich eine Wärmequelle. Während des Versuchs wurden der Verlauf der Feuchte- und Temperaturverteilung in horizontaler und vertikaler Richtung erfasst. Im stationären Zustand des Versuchsstandes stellte sich eine ausgetrocknete Zone um die Wärmequelle ein. Mit Hilfe der Messtechnik konnten die gesuchten thermischen Eigenschaften ermittelt werden.

Derzeit werden unterschiedliche Konzepte zur Bettung von Energiekabeln untersucht:

- Sand
- Magerbeton
- Perlkieskörper vergossen mit Tonmineral-Zement
- Betonmischung mit hoher Wärmeleitfähigkeit
- Flüssigboden
- korngestuffer Sand

In 7 Versuchsständen wurden die thermischen Eigenschaften im Langzeitversuch über jeweils ca. 100 Tage ermittelt. Die untersuchten Bettungsmaterialien sollen ein möglichst breites Spektrum an Grundmaterialien widerspiegeln, um daraus Rückschlüsse auf Böden mit ähnlichen Zusammensetzungen ziehen zu können.

Als Sand ohne Zusätze wurden ein reiner Sand (in Anlehnung an VDE-Sand) und ein korngrößengestuffer Sand untersucht.

Für die Flüssigböden wurden folgende Ausgangsböden gewählt:

- Sand
- Lößlehm
- Rotlagenkies (GT)
- Mergel
- Ton

2 Versuchsaufbau

2.1 Konzept

Zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Materialien, werden i.d.R. Plattengeräte bzw. Zylinderverfahren (für Isolationswerkstoffe) eingesetzt. Bei den Messverfahren wird eine definierte Heizleistung in das zu untersuchende Material eingespeist und der Temperaturanstieg festgestellt. In Zylinder- und Plattenmesssystemen entsteht dabei ein teils schwer zu quantifizierender Messfehler durch den Wärmestrom, der nicht durch das zu untersuchende Material führt. Zur Vermeidung dieses Messfehlers, wurde bei dem Versuch eine annähernd kugelsymmetrische Anordnung gewählt.

Im Zentrum eines Intermediate Bulk Containers (IBC) ist eine Wärmequelle eingebracht, die den Wärmestrom in jede Richtung abführt (vgl. Abbildung 1). Durch Temperatursensoren in horizontaler und vertikaler Richtung wird die Temperaturverteilung innerhalb des Versuchsstandes erfasst. Orthogonal zur Temperaturmessung wird die Feuchteverteilung im Versuchsstand gemessen.

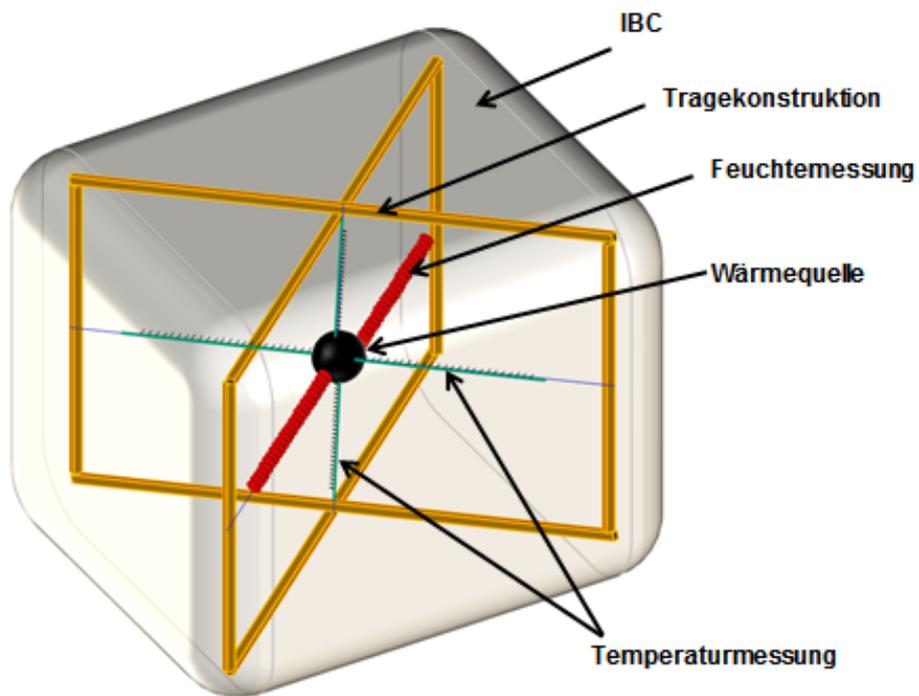


Abbildung 1: Übersicht Komponenten im Versuchsstand

2.2 Komponenten im Detail

Als Grundkonstruktion zur Anbringung der Sensorik sowie der Wärmequelle wurde ein Holzgerüst gefertigt (vgl. Abbildung 2). Die Tragekonstruktion wurde in den IBC hineingestellt und blieb während des Versuchs in der Anordnung.



Abbildung 2: IBC geöffnet (links); Tragekonstruktion (rechts)

Für die Sonden zur Messung der Temperaturverteilung wurden Thermoleitungen des Typs K (NiCrNi) nach DIN EN 60584-3 verwendet. Es wurden pro Container vier Sonden gefertigt, bei denen zwei eine Länge von 44,75 cm aufweisen und jeweils eine 42,0 cm, sowie 20,0 cm. Am Ende der Thermoleitungen wurden die Drähte mit Aderendhülsen verbunden und diese am Rohr verklebt. Die Messpunkte haben auf den ersten 20,0 cm der Sonde einen Abstand von 2,0 cm und auf der restlichen Strecke 2,75 cm.

Zur Erfassung der Feuchteverteilung wurden zwei Messsonden angefertigt, mit deren Hilfe es möglich ist, den elektrischen Widerstand des Bodens aus angelegter Spannung und gemessenem Strom zu berechnen.

Die Widerstandsmesssonden bestehen aus einem dünnen Plastikröhrchen mit einem Außendurchmesser von etwa 1,0 cm und einer Länge von 44,75 cm. Auf die Röhrchen wurden runde Kupferscheiben aufgeschoben, welche auf den ersten 20,0 cm einen Abstand von 2,0 cm und auf der restlichen Strecke einen Abstand von 2,75 cm zueinander haben. Der Außendurchmesser der Kupferscheiben beträgt 3,0 cm.

Eine weitere wichtige Vorbetrachtung ist die Überlegung, wie die kugelförmige Wärmequelle zu realisieren ist. Es wurde eine Vollkugel aus Eisen mit 10,0 cm Durchmesser verwendet. Um diese nun gleichmäßig zu erhitzen, wurde eine zylindrische Heizpatrone eingebaut.

Folgende Ausgangsmaterialien waren das Grundmaterial für die Flüssigbodenmischungen

Lößlehm

Rotlagenkies

Mergel

Sand



Abbildung 3: Grundmaterialien für den Flüssigboden

Entsprechend der Rezeptur, die vom Forschungsinstitut für Flüssigboden GmbH erstellt wurde, wurden die Grundmaterialien mit Flüssigboden-Compound (RSS FCB) und Wasser in einem Horizontalmischer vermengt.

Nach einer definierten Mischdauer entstand eine größtenteils homogene fließfähige Masse, die in die Versuchsstände eingebracht werden konnte.

2.3 Versuchsdurchführung

Nach der Befüllung der Container wurden die IBCs mit einer Kunststoffolie abgedeckt und ca. einen Monat ruhen gelassen, so dass sich die sog. kristalline Wasseranlagerung vollständig ausbilden konnte.

Nach der o.g. Standzeit wurde der Deckel des IBCs aufgesetzt und mit Silikon versiegelt um einen Wasseraustausch mit der Umgebung während des Versuchszeitraumes zu unterbinden. Um den Deckel bündig aufsetzen zu können mussten teilweise wenige Zentimeter Boden von der Oberfläche abgetragen werden. Anschließend wurden die Messstellen für die Temperatur- und Feuchtemessung am IBC installiert.

Nach dem Zuschalten dauerte es ca. einen Monat bis sich ein stationärer Zustand im IBC bildete. Um sicherzustellen, dass es sich nach einem Monat um einen langzeitstabilen Zustand handelt, wurden die Versuchsstände weitere ca. 2 Monate betrieben (s. Abbildung 4).

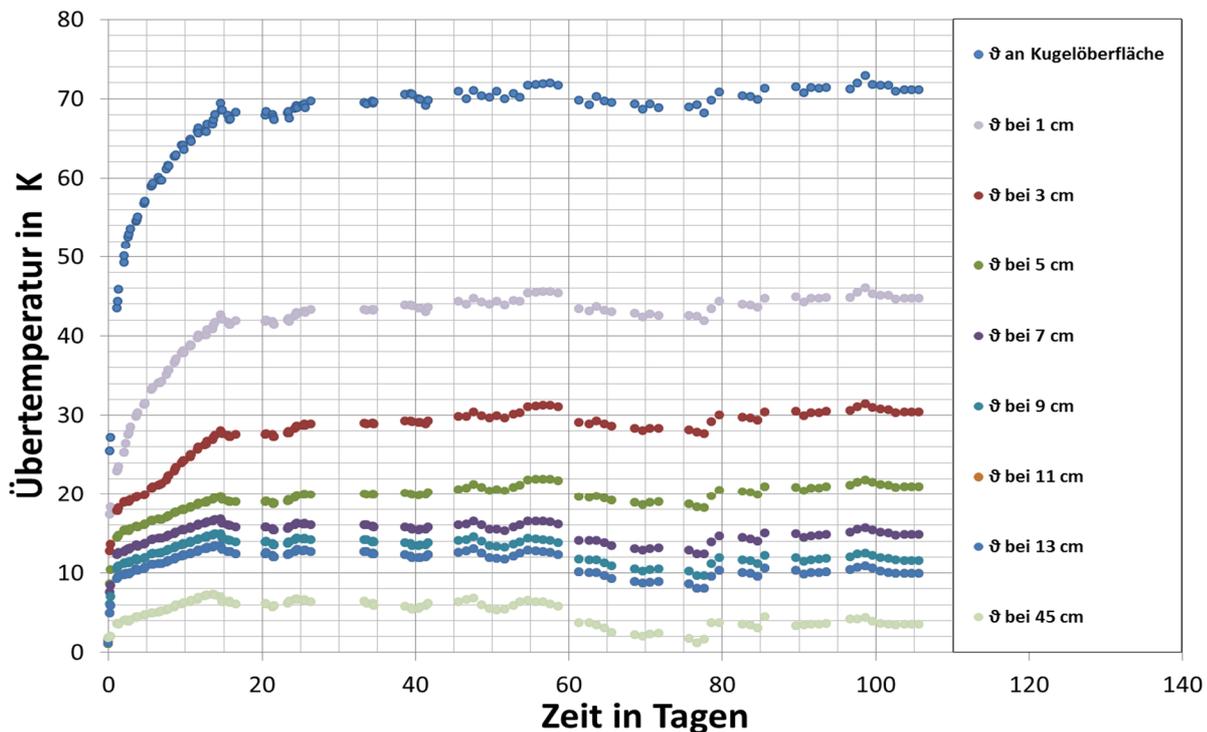


Abbildung 4: Verlauf der Übertemperatur (sandiger Boden)

3 Versuchsauswertung

3.1 Berechnungsmodell

Um die Funktionsfähigkeit des Versuchstandes und des Berechnungsmodells zu verifizieren, wurde ein erster Versuchsstand mit Sand bzw. sandigem Boden befüllt. In Abbildung 5 ist das verwendete Material dargestellt.



Abbildung 5: Material des ersten Versuchsstandes

Die mathematisch-physikalische Beschreibung des thermischen Verhaltens im Versuchsstand basiert auf der Analogie zwischen dem elektrostatischen Feld und dem Wärmeströmungsfeld. Sowohl in der Wärmetechnik als auch in der Elektrotechnik können die Übertragungsmechanismen über Material- und Feldgrößen beschrieben werden. In Tabelle 1 sind die entsprechenden Größen aufgelistet.

Größen	Elektrotechnisch	Wärmetechnisch
Strom	I	P
Potential	φ	ϑ
Potentialdifferenz	U	$\Delta\vartheta$
Widerstand	R	R_{Th}
Leitwert	κ	λ
Kapazität	C	C_{Th}

Tabelle 1: Analogie zwischen elektrischen und thermischen Größen

Der Versuchsstand kann unter Berücksichtigung der o.g. Kenngrößen in ein Modell überführt werden, in dem die Stahlkugel als (Wärme-)Stromquelle P_V beschrieben werden kann. Diese ist über mehrere ineinander geschichtete Kugelschalen, die jeweils einen (thermischen) Widerstand R_{th} aufweisen mit der Umgebungstemperatur ϑ_0 verbunden.

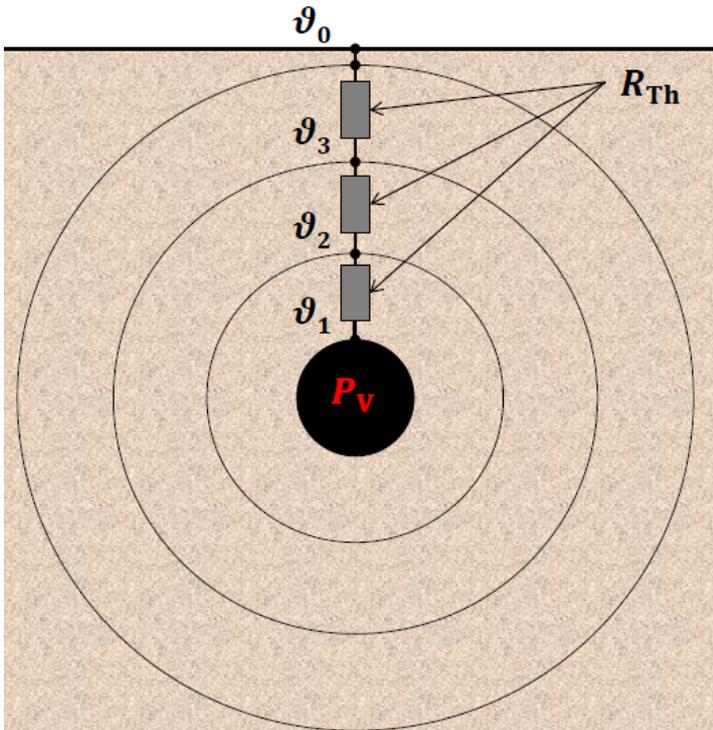


Abbildung 6: Thermisches Modell des Versuchsstandes

Das gewonnene Modell lässt sich in eine in der Elektrotechnik übliche Form überführen und mit bekannten Lösungsverfahren berechnen (vgl. Abbildung 6 und Abbildung 7). Die Anzahl der Kugelschalen wurde so gewählt, dass die Temperaturen ϑ_1 bis ϑ_n den gemessenen Temperaturen entsprechen.

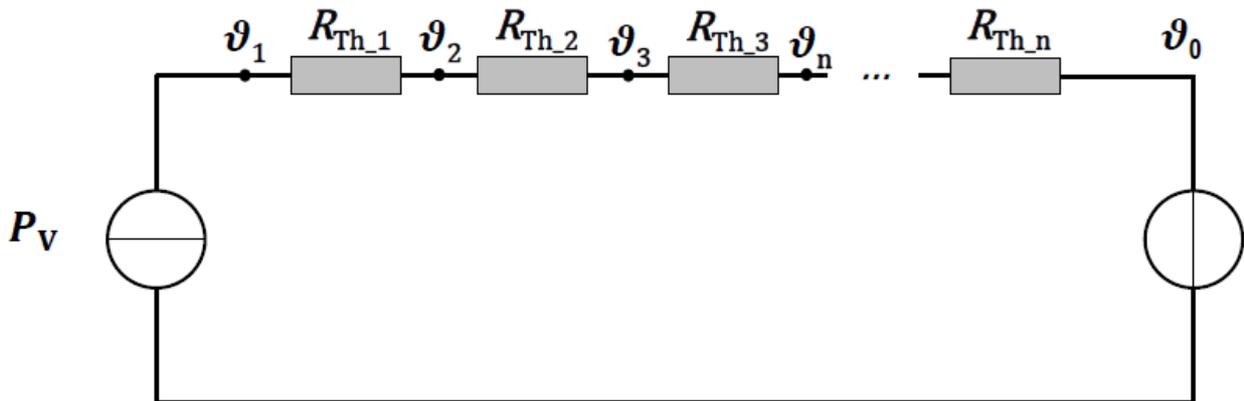


Abbildung 7: Abstrahiertes Netzwerk

Bei dem untersuchten Sand wurde die in Abbildung 8 dargestellte Übertemperaturverteilung im stationären Zustand gemessen.

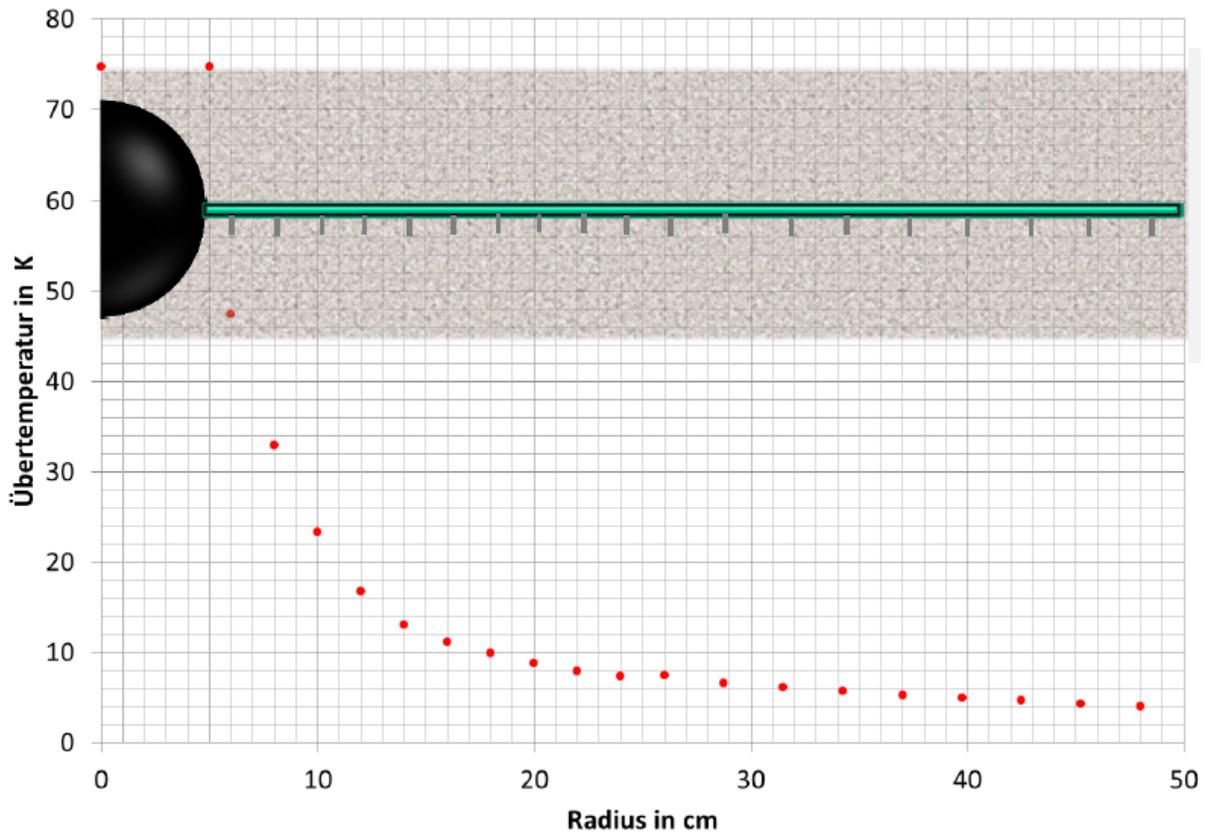


Abbildung 8: Übertemperaturverteilung im IBC

Zur besseren Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Versuchsstände wurde anschließend die Ordinatenachse mit der eingespeisten Heizleistung normiert.

Der thermische Widerstand einer Kugelschale kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$R_{Th} = \frac{\Delta\vartheta}{P} = \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_a} \right)$$

Aus der Gleichung ist die direkt proportionale Beziehung zwischen dem thermischen Widerstand und der Differenz der reziproken Radien r_i und r_a erkennbar. Um Bereiche homogener Wärmeleitfähigkeiten grafisch feststellen zu können, wurden in Abbildung 9 der Abszissenachse der reziproke Wert des Radius aufgetragen.

Anhand der Steigungen, die sich entlang der Messwerte ergeben, lassen sich die Wärmeleitfähigkeiten ablesen (vgl. Abbildung 9). Bei dem untersuchten Sand ergibt sich eine Wärmeleitfähigkeit von $0,98 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ in den ersten 5 Kugelschalenschichten. In den Kugelschalen, die außerhalb dieses Bereichs liegen, stellt sich eine größere Wärmeleitfähigkeit von $1,92 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ein. Der innere Bereich mit der niedrigeren Wärmeleitfähigkeit kann als ausgetrocknet angenommen werden.

Zwischen der Kugeloberfläche und der Geraden, die die Messpunkte der inneren Kugelschalen verbindet, ist eine Unstetigkeit bzw. ein Sprung der bezogenen Übertemperatur erkennbar. Der Sprung von $0,3 \text{ K W}^{-1}$ beschreibt einen Übergangswiderstand zwischen der Kugeloberfläche und der daran angrenzenden Kugelschale des untersuchten Sandes. Eine detaillierte Beschreibung des Übergangswiderstandes befindet sich in Abschnitt 3.3.

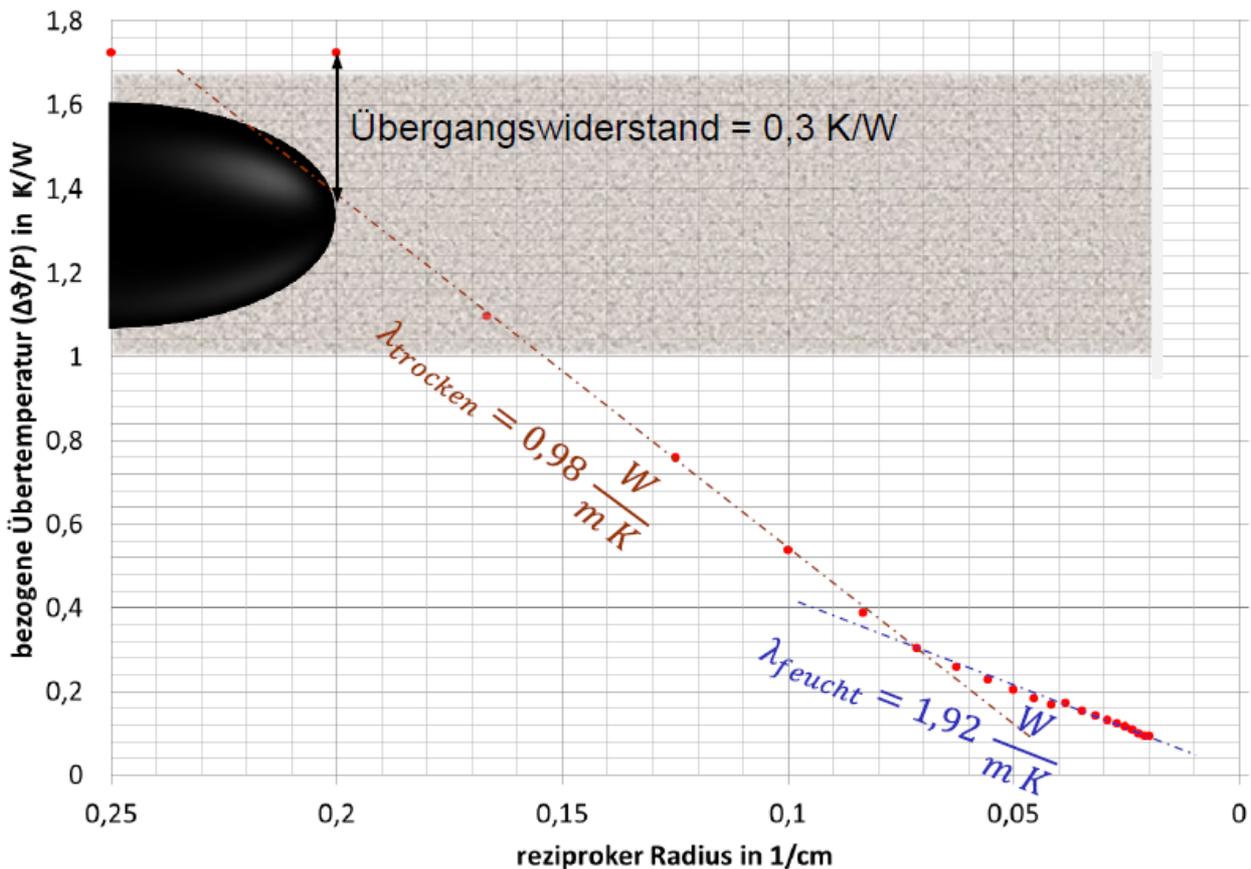


Abbildung 9: Wärmeleitfähigkeiten und Übergangswiderstand

Am Schnittpunkt der Wärmeleitfähigkeitsgeraden des ausgetrockneten Bereichs und des feuchten Bereichs kann die bezogene Grenzüber Temperatur sowie der reziproke Radius des ausgetrockneten Bereichs abgelesen werden. Die bezogene Grenzüber Temperatur beträgt ca. $0,3 \text{ K W}^{-1}$ bei einem reziproken Radius von ca. $0,71 \text{ cm}^{-1}$.

Die Grenzüber Temperatur beträgt ca. 12 K und liegt damit nahe an dem in der Norm DIN VDE 0276 Teil 1000 angegebenen Wert von 15 K . Die Kugelüber Temperatur betrug im stationären Zustand des Versuchs ca. 74 K . Mit dem Versuch konnte gezeigt werden, dass es mit dem Versuchsstand möglich ist, sowohl die Wärmeleitfähigkeiten als auch die Grenzüber Temperatur zu bestimmen.

3.2 Thermische Eigenschaften der untersuchten Böden

Analog zum beschriebenen Vorgehen wurden die Eigenschaften der unterschiedlichen Bettungsmaterialien ausgewertet.

Aus den Versuchen konnten folgende Kenntnisse gewonnen werden (vgl. Tabelle 2):

- Bei keinem der untersuchten Flüssigböden konnte eine Bodenaustrocknung festgestellt werden.
- Die Wärmeleitfähigkeiten der Flüssigböden streuen je nach Grundmaterial.
- Die Wärmeleitfähigkeiten sind höher als die in der DIN 0276 Teil 1000 angegebenen Werte.
- Korngrößenoptimierter Sand (DuoFill) stellt bzgl. der thermischen Eigenschaften eine echte Alternative zum Flüssigboden dar.
- Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen der wärmeemittierenden Oberfläche und dem Bettungsmaterial ist bei großen Leitungsdurchmessern vernachlässigbar.

Boden	Wärmeleitfähigkeit feucht (W/mK)	Wärmeleitfähigkeit trocken (W/mK)	Grenzüber- temperatur (K)	Wärme- übergangs- koeffizient (W/m ² K)
VDE-Sand	1,00	0,40	15,0	-
Sandiger Boden (s. 3.1)	1,92	0,98	12,0	106
Flüssigboden (Lößlehm) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	1,33		-	318
Flüssigboden (Rotlagenkies) mit Bentonit	2,61		-	159
Flüssigboden (Rotlagenkies) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	2,30		-	318
Flüssigboden (Mergel) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	1,57		-	-
Flüssigboden (Sand) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	2,02		-	318
DuoFill	2,62		-	80

Tabelle 2: Versuchsergebnisse

3.3 Übergangswiderstand zwischen Wärmequelle und Bettungsmaterial

Als vereinfachtes Modell zur Beschreibung des Übergangswiderstandes kann der Boden mit kugelförmigen Partikeln beschrieben werden. Zwischen der Stahlkugel und den Bodenparti-

keln bilden sich an der Grenze Hohlräume, aus denen ein erhöhter thermischer Widerstand resultiert.

Aus der Oberfläche der Stahlkugel und dem Temperatursprung, der sich an der Grenzfläche ergibt, kann ein Wärmeübergangskoeffizient berechnet werden. Dieser gibt an, welcher Temperatursprung bei einem vorgegebenem Wärmestrom und Fläche zu erwarten ist. Bei sehr geringen Leitungsdurchmessern, wie diese z.B. bei Niederspannungskabeln auftreten, können sich daraus Temperaturdifferenzen von mehreren Kelvin (bis 10) ergeben (vgl. Abbildung 10). Bei größeren Leitungsdurchmessern, wie z.B. bei Hoch- und Höchstspannungskabeln oder gasisolierten Rohrleitern beträgt die Temperaturdifferenz nur wenige Kelvin (< 2 K) und ist damit im Verhältnis zu äußeren Umgebungseinflüssen wie z.B. die Streuung der Wärmeleitfähigkeiten des Bettungs- und Umgebungsmaterials als relativ gering einzuschätzen.

Die in Abbildung 10 dargestellte Wirkung des Übergangswiderstandes beruht auf den Messungen der Grenzfläche zwischen Stahl und dem Bettungsmaterial. Nicht berücksichtigt ist bei dieser Betrachtung das sich verändernde Verhalten bei unterschiedlichen ggf. vorhandener weicher Mantelmaterialien, die jedoch diesen Effekt verringern werden.

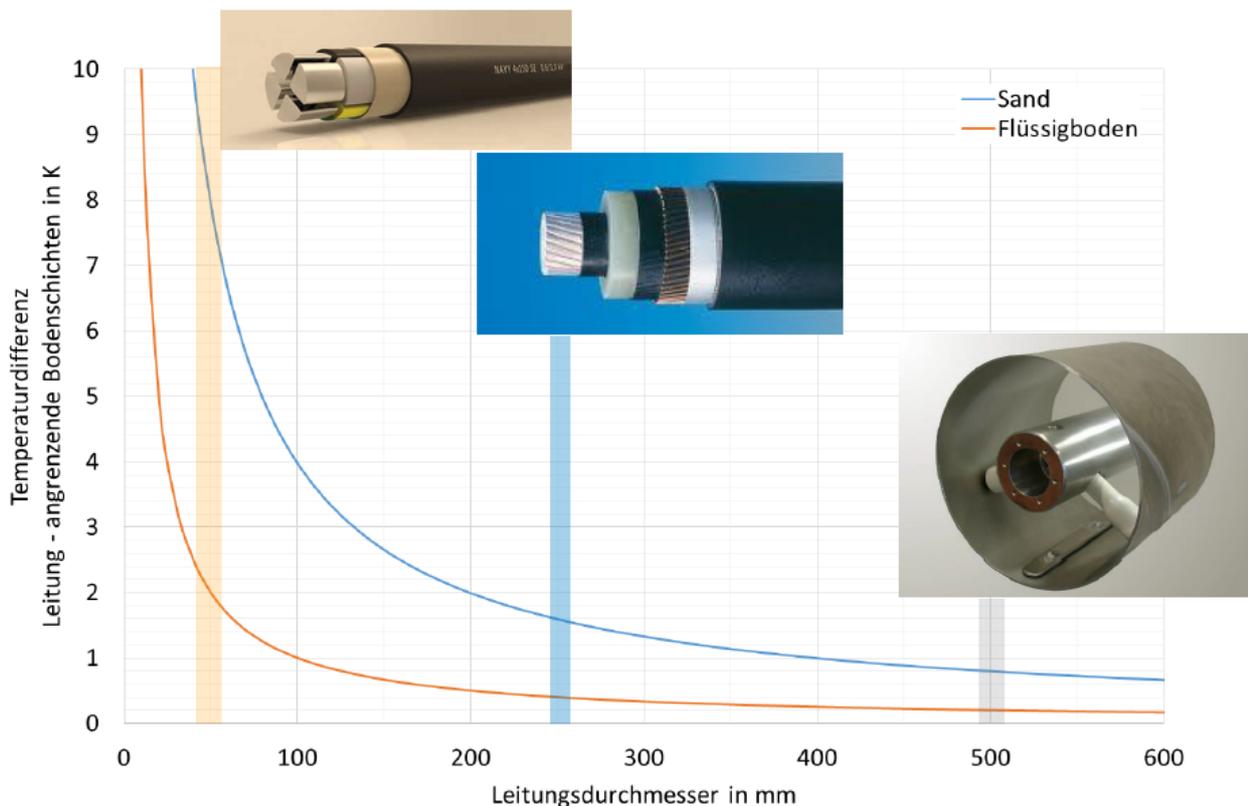


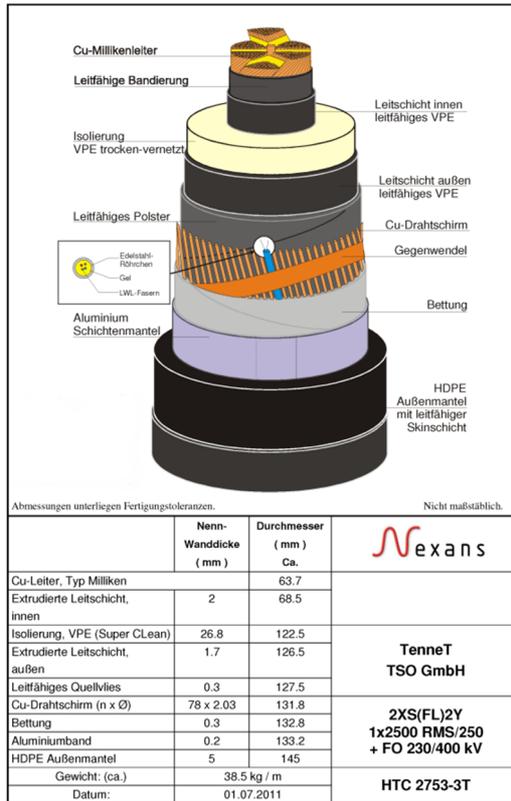
Abbildung 10: Praktische Wirkung des Übergangswiderstandes bei typischen Leistungen und Geometrien

4 Wirkung auf den Nennstrom

Unterstellt man eine typisches 380 kV-Kabel (2XS(F)2Y 1x2500 RMS 250 + FO 230/400 kV) in einer Kabeltrasse (vgl. Abbildung 11) mit 4 Systemen und typischen Materialeigenschaften können die Stromtragfähigkeiten mit Hilfe der Software *Kabelverlegung.exe* der HTW Dresden derart bestimmt werden, dass die Leitertemperatur des Kabels 90°C warm wird. Ausgehend vom VDE-Sand (100 %) zeigt sich, dass abhängig vom Bettungsmaterial die Nennströme und Scheinleistungen erheblich größer wählbar sind (15... 25 %). Für jeden potentiellen Betreiber einer derartigen Anlage kann nun unter Kenntnis der Installations- und Betriebskosten eine Variante gewählt werden, bei der es sich um minimale Kosten pro installierter Scheinleistung handelt (vgl. Tabelle 3).

Boden	Stromtragfähigkeit (A)	Scheinleistung (MVA)	Verhältnis (%)
VDE-Sand	1.381	3.636	100
Sandiger Boden	1.586	4.175	115
Flüssigboden (Lößlehm) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	1.616	4.254	117
Flüssigboden (Rotlagenkies) mit Bentonit	1.708	4.497	124
Flüssigboden (Rotlagenkies) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	1.688	4.444	122
Flüssigboden (Mergel) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	1.636	4.307	118
Flüssigboden (Sand) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	1.670	4.397	121
DuoFill	1.710	4.502	125

Tabelle 3: Nennstrom und Scheinleistung der Kabeltrasse



Leiterdaten

Leiterquerschnitt: mm²

Leiterdurchmesser: mm

Widerstandsbelag des Kabels bekannt? ja nein

Widerstandsbelag bei 20 °C: µΩ/m

spez. elektr. Widerstand bei 20 °C: Ω·mm²/m

Skineffektfaktor:

vollständiger Millikenleiter unvollständiger Millikenleiter

kein Millikenleiter freier Faktor

Isolations- und Manteldaten

Außendurchmesser Isolierung: mm

Wärmeleitfähigkeit Isolierung: W/(m·K)

Betriebsspannung: kV

Kapazitätsbelag des Kabels: pF/m

Außendurchmesser Mantel: mm

Wärmeleitfähigkeit Mantel: W/(m·K)

Schirmbehandlung

Schirmquerschnitt: mm²

Schirm ausgekreuzt / offen Schirm durchverbunden

Verlegungsart

direkte Erdverlegung Verlegung in Schutzrohr

Innendurchmesser Schutzrohr: mm

Außendurchmesser Schutzrohr: mm

Wärmeleitfähigkeit Schutzrohr: W/(m·K)

Befüllung der Schutzrohre: mit Luft mit Wasser

Emissionszahl Kabelmantel:

Emissionszahl Schutzrohr:

Betriebsparameter

Frequenz: Hz

Stromstärke: A

gleichmäßige Stromaufteilung ungleichmäßige Stromaufteilung

Grenzparameter

Maximale Leitertemperatur: °C

Maximale Manteltemperatur: °C

Verlegegeometrie

Verlegetiefe t: mm

Phasenabstand a: mm

Systemabstand b: mm

Bettungsrücklage c: mm

Bettungsaufschüttung h: mm

Stromkreisabstand s: mm

Erdreich- und Bettungsmaterial

unbeeinflusste Erdbodentemperatur: °C

Wärmeleitfähigkeit Erdreich feucht: W/(m·K)

Wärmeleitfähigkeit Erdreich trocken: W/(m·K)

Grenzober Temperatur Erdreich: K

Wärmeleitfähigkeit Bettung feucht: W/(m·K)

Wärmeleitfähigkeit Bettung trocken: W/(m·K)

Grenzober Temperatur Bettung: K

Stromkreis 1 System B			Stromkreis 1 System A			Stromkreis 2 System A			Stromkreis 2 System B		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1381	1381	1381	1381	1381	1381	1381	1381	1381	1381	1381	1381
76,1	87,5	86,4	87,8	89,9	79,1	79,1	89,9	87,7	86,4	87,5	76,1
70,1	81,3	80,2	81,6	83,7	73,0	73,1	83,7	81,5	80,2	81,3	70,1
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22,69	23,39	23,32	23,41	23,54	22,87	22,88	23,54	23,41	23,32	23,39	22,69

Abbildung 11: Betrachtete Kabeltrasse und Programmoberfläche der Software

5 Literaturverzeichnis

- [1] D. V. O. T. 1000
Starkstromkabel: Strombelastbarkeit, Allgemeines, Umrechnungsfaktoren, 1995
- [2] Brakelmann, H.:
Belastbarkeit von Energiekabeln, Berlin: VDE-Verlag, 1985

Autor:

Prof. Dr.-Ing. Ralf-Dieter Rogler
Hochschule für Technik und Wirtschaft
Dresden, Fakultät Elektrotechnik,
Schaltanlagentechnik,
Dresden

Tel.: 0351 / 462-2544

E-Mail:

ralf-dieter.rogler@htw-dresden.de

Internet: www.htw-dresden.de

