

Experimentelle Untersuchungen und Berechnungen zur Erwärmung erdverlegter Kabel in Unterquerungen

Von Ralf-Dieter Rogler und Carsten Loth

1 Untersuchungsgegenstand

In bisherigen Untersuchungen wurde die thermische Bemessung von erdverlegten Kabelanlagen untersucht. In einem ersten Schritt wurden die thermischen Eigenschaften des Bettungsmaterials und des umgebenden Erdreiches gemessen [1]. Danach wurden die Erkenntnisse auf reale Regelgrabenprofile (s. Abbildung 1) angewendet [2]. Es konnte gezeigt werden, dass den geometrischen und thermischen Eigenschaften der Bettung durchgreifende Bedeutung zukommt. Je tiefer die Kabel liegen und umso kleiner die Wärmeleitfähigkeiten der Bettung sind, umso höher werden die Leitertemperaturen bei gleichem Leiterabstand und umso kleiner ist die Stromtragfähigkeit bei gleicher Temperatur.

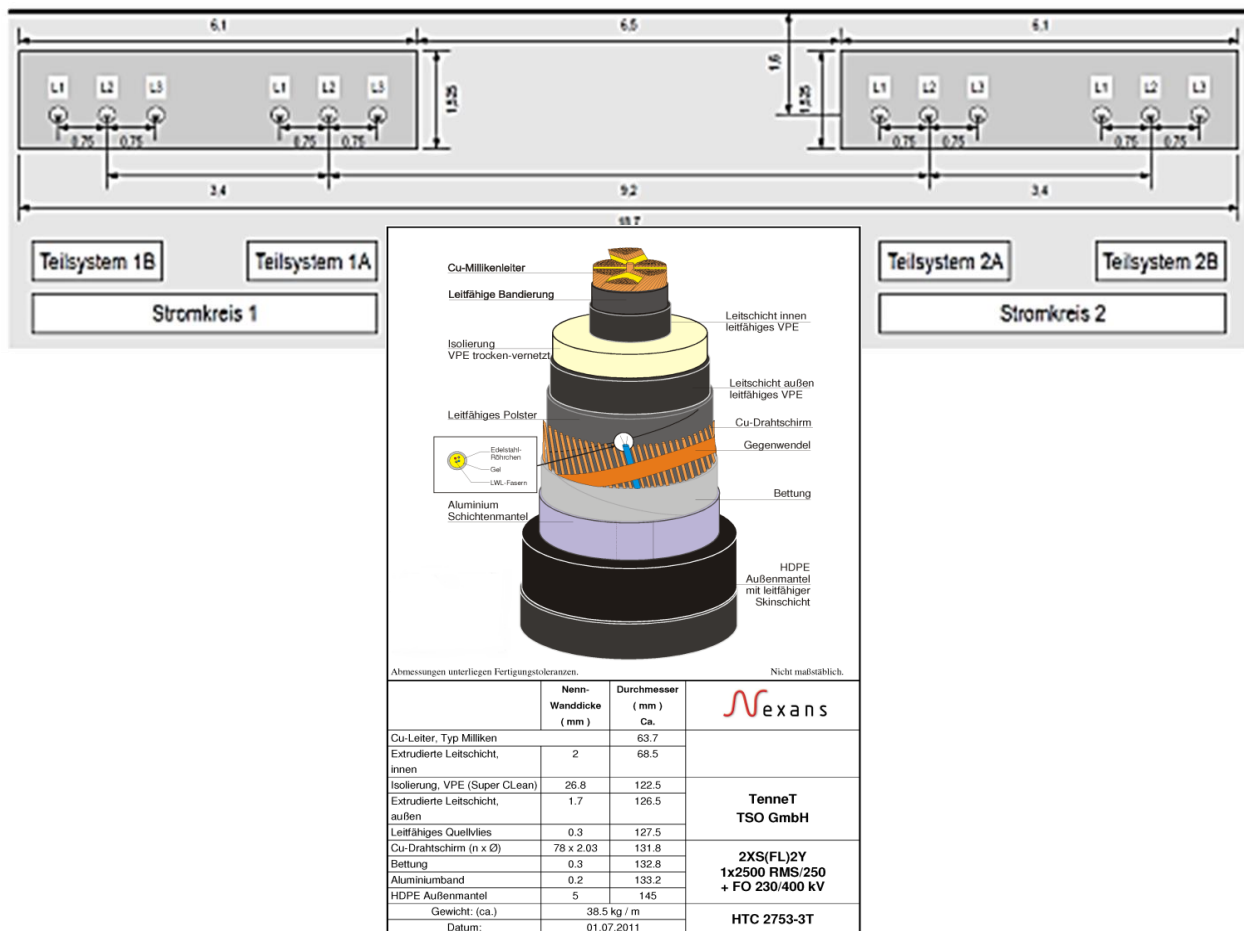


Abbildung 1: Regelgrabenprofil und Kabel

In dieser Publikation werden zwei wichtige Randbedingungen erdverlegter Kabel untersucht:

- Tiefliegende Kabel können ihre Wärme nicht nur an die Oberfläche, sondern auch, wenn vorhanden, an wasserführende Schichten abgeben. Sind diese dauerhaft vorhanden, kann diese Entlastung bei der Bemessung berücksichtigt werden.
- Unterquert man bauliche Strukturen (z. B. Bahn, Straße, Fluss, Versorgungsleitungen) werden die Kabel i.d.R. auf deutlich höhere Abstände gebracht (s. Abbildung 2). Um diese thermisch zu entlasten, können die Schutzrohre um die Kabel mit Wasser gefüllt werden. Es kommt zu einer deutlichen Zirkulation in axialer Richtung, und die Kabeltrasse kann schmaler konzipiert werden.

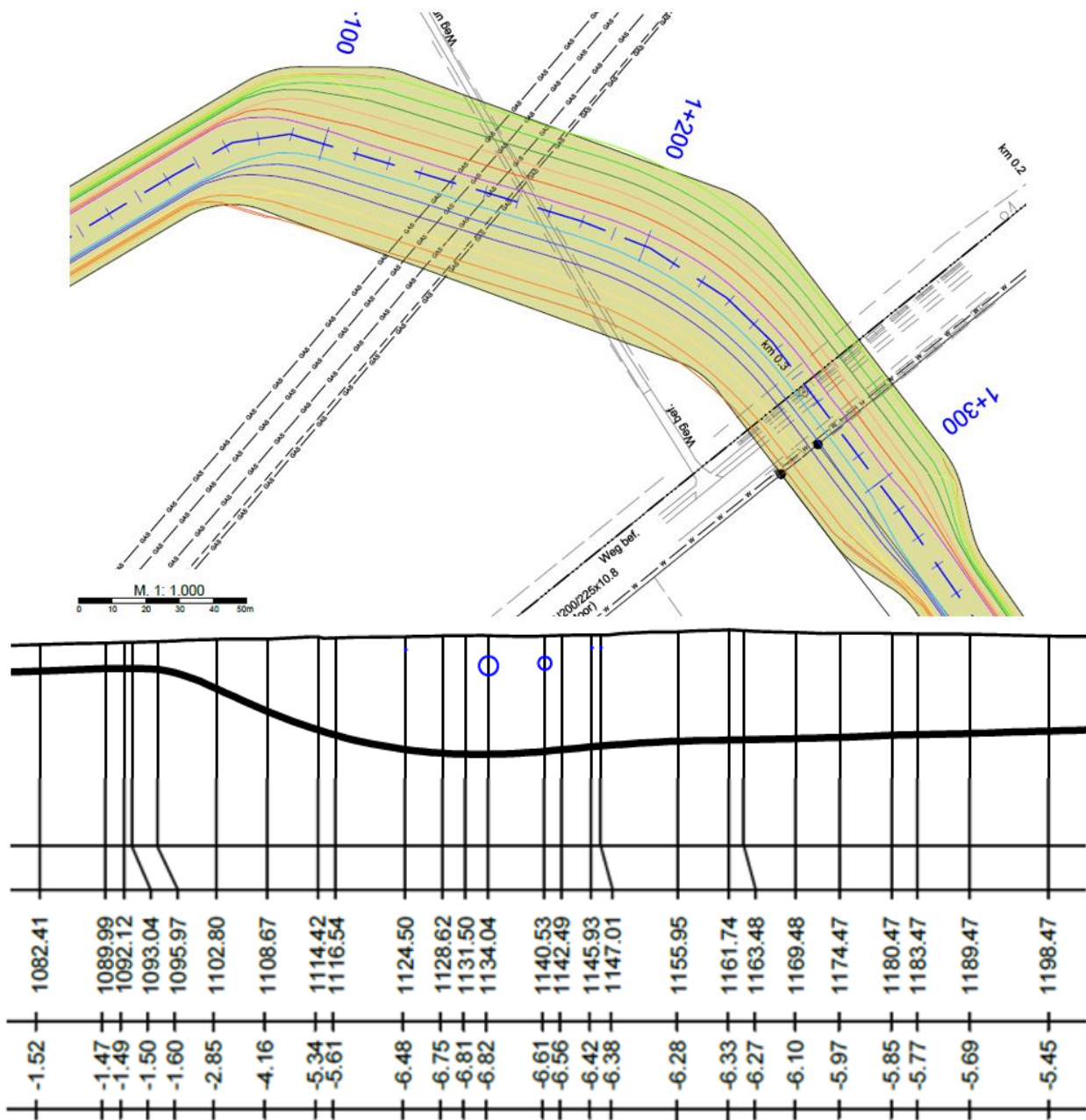


Abbildung 2: Beispiel für die Unterquerung zweier Versorgungsleitungen

2 Einfluss von Grundwasser

Unterstellt man die Verlegung eines typischen 400 kV-Kabels (2XS(F)2Y 1x2500 RMS 250 + FO 230/400 kV) im Regelgrabenprofil (s. Abbildung 1) kann die maximale Stromtragfähigkeit mithilfe der Software *Kabelverlegung* unter Berücksichtigung von VDE-Sand:

- Wärmeleitfähigkeit feucht: 1,0 W/(m K)
- Wärmeleitfähigkeit trocken: 0,4 W/(m K)
- Grenzübertemperatur: 15,0 K

bei einer maximalen Leitertemperatur von 90 °C bestimmt werden:

- Nennstrom $I_N = 1351$ A
- Scheinleistung $S_N = 3557$ MVA.

Führt man z. B. in 10 m Tiefe eine wasserführende Schicht mit 8 °C ein, sieht man klar den positiven Einfluss. Die berechnete Stromtragfähigkeit steigt gegenüber der Ausgangslage und sinkt nicht mehr mit wachsender Tiefe (s. Abbildung 3). Gut ist die Anpassung bei ca. 5 m zu sehen.

Werden wasserführende Schichten berücksichtigt, kann damit deutlich die Stromtragfähigkeit gesteigert werden und tiefere Verlegungen realisiert werden. Es ist jedoch sicherzustellen, dass die unterstellten Wasserschichten jahreszeitlich über Jahrzehnte hinweg stabil existieren.

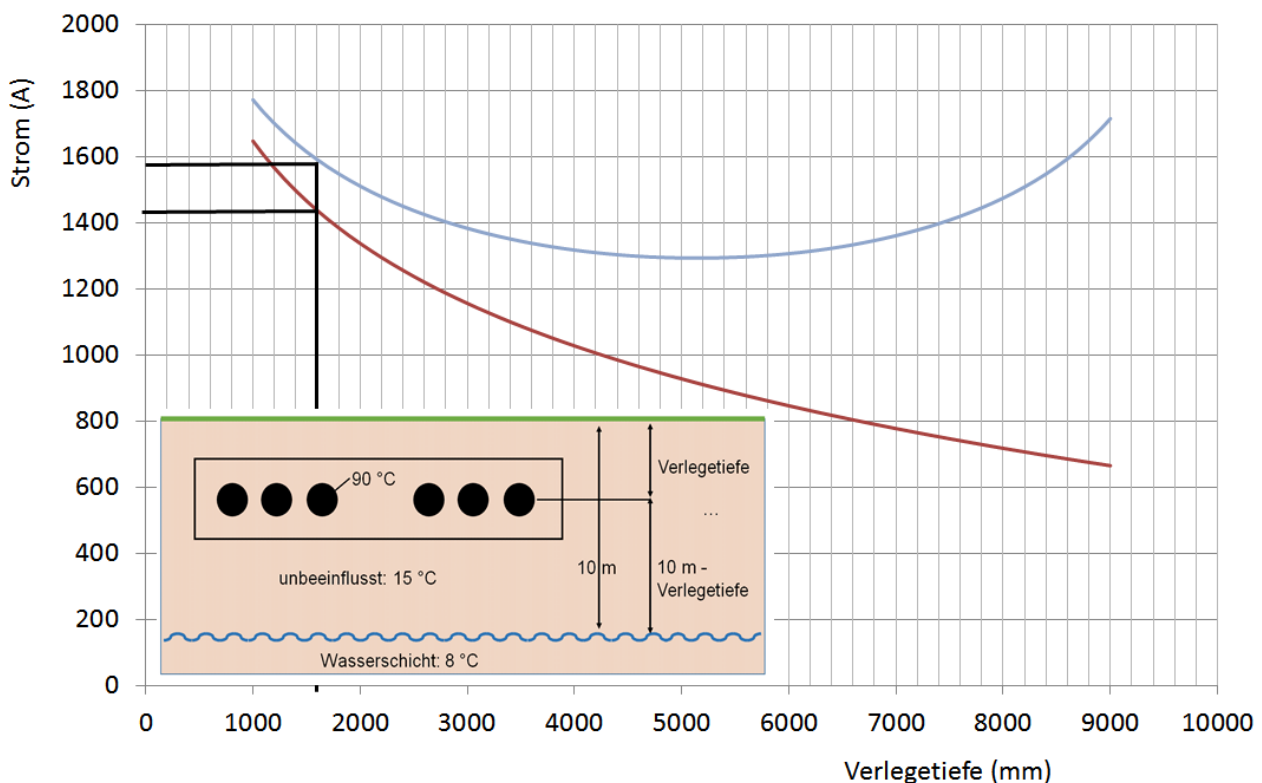


Abbildung 3: Einfluss wasserführender Schichten auf die Stromtragfähigkeit

3 Unterquerungen mit erdverlegten Kabeln

3.1 Experiment und Simulation eines Modells

An der HTW Dresden wurde ein Versuchsaufbau realisiert, in dem der Leistungstransport in wasser- und luftgefüllten Schutzrohren experimentell bestimmt werden kann. Dafür dienten handelsübliche KG-Rohre mit einem Außendurchmesser von 160 mm und einer Wandstärke von 4 mm, die sich aus den typischen Gegebenheiten eines konstanten freien Querschnittes (Rohrfläche – Kabelfläche) einer Kabelanlage in einem Schutzrohr ergeben. Insgesamt wurden fünf 2 m lange KG-Rohre miteinander verbunden, sodass die gesamte Rohrlänge ca. 10 m betrug. Am vorderen Ende ist eine Heizquelle (Sieder) mit einer Nennleistung von bis zu 2000 W in ein Muffenstück eingebracht. Über einen Stelltransformator konnte die Verlustleistung der Heizquelle eingestellt werden. Mittels Thermoelemente, welche alle 0,5 m entlang des Rohres angeordnet sind, konnte die Oberflächentemperatur des Rohres axial erfasst werden. Über eine Stützkonstruktion wurde das Schutzrohr in einem Bereich von $\alpha = 0^\circ \dots 10^\circ$ angekippt (s. Abbildung 4).



Anstellwinkel 0°



Anstellwinkel: 10°

Abbildung 4: Versuchsaufbau des wassergefüllten Schutzrohres

Bei Unterquerungen von baulichen Strukturen werden elektrische Kabel bei größer werdender Tiefe mit der Untertunnelung im Vergleich zur gestreckten Verlegung immer wärmer. Deshalb werden die Leiterabstände deutlich vergrößert. Gelänge es die Verlustleistung axial zu transportieren, könnte man auf die Trassenvergrößerung verzichten. Dies könnte man durch Befüllung der Rohre mit Wasser erreichen. In wassergefüllten Rohren kann vermutet werden, dass es zu einer Zirkulation des Wassers kommt und damit zu einer Verteilung der punktuellen Verlustleistung. Mit dem Versuchsaufbau soll die Stärke der Zirkulation (s. Abbildung 5) für gefüllte Rohre experimentell untersucht und anschließend berechnet werden.

Wird die Heizquelle mit einer konstanten Leistung betrieben, stellt sich nach ca. 2 Tagen eine axiale Übertemperaturverteilung $\Delta\vartheta(x)$ ein. Die Übertemperatur entspricht dabei der Temperatur an der jeweiligen Messstelle abzüglich der Umgebungstemperatur. Der Versuchsaufbau wurde mit einer Strömungssimulation (CFD) nachgerechnet (s. Abbildung 6). Es zeigt sich eine gute

Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Damit kann nachgewiesen werden, dass mittels CFD-Berechnungen die Wärmeübertragungsprozesse in axialer Richtung gefüllter Rohre berechnet werden können.

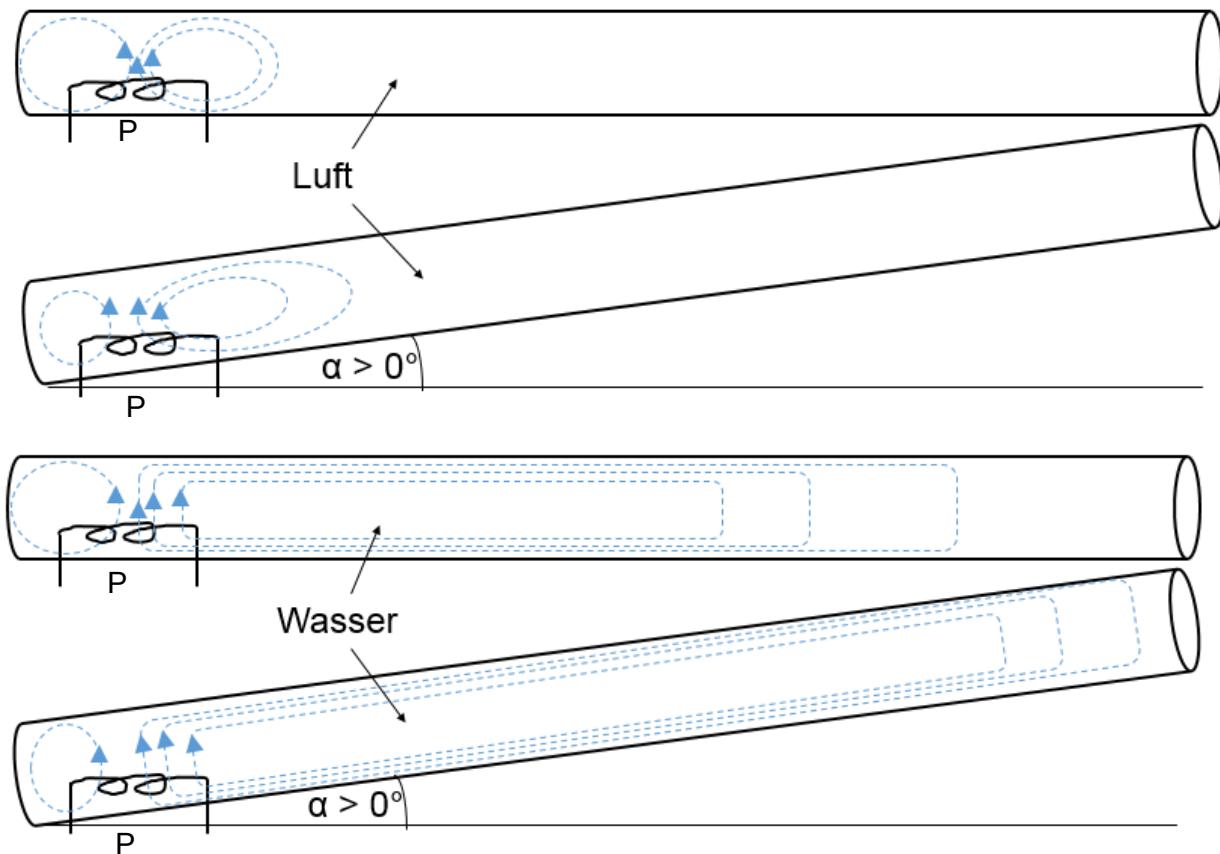


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Zirkulation für luft- und wassergefüllte Rohre

Wird das Wasser im Schutzrohr durch Luft ersetzt, muss die Heizleistung drastisch reduziert werden, damit die Heizquelle nicht zu warm wird (s. Abbildung 7).

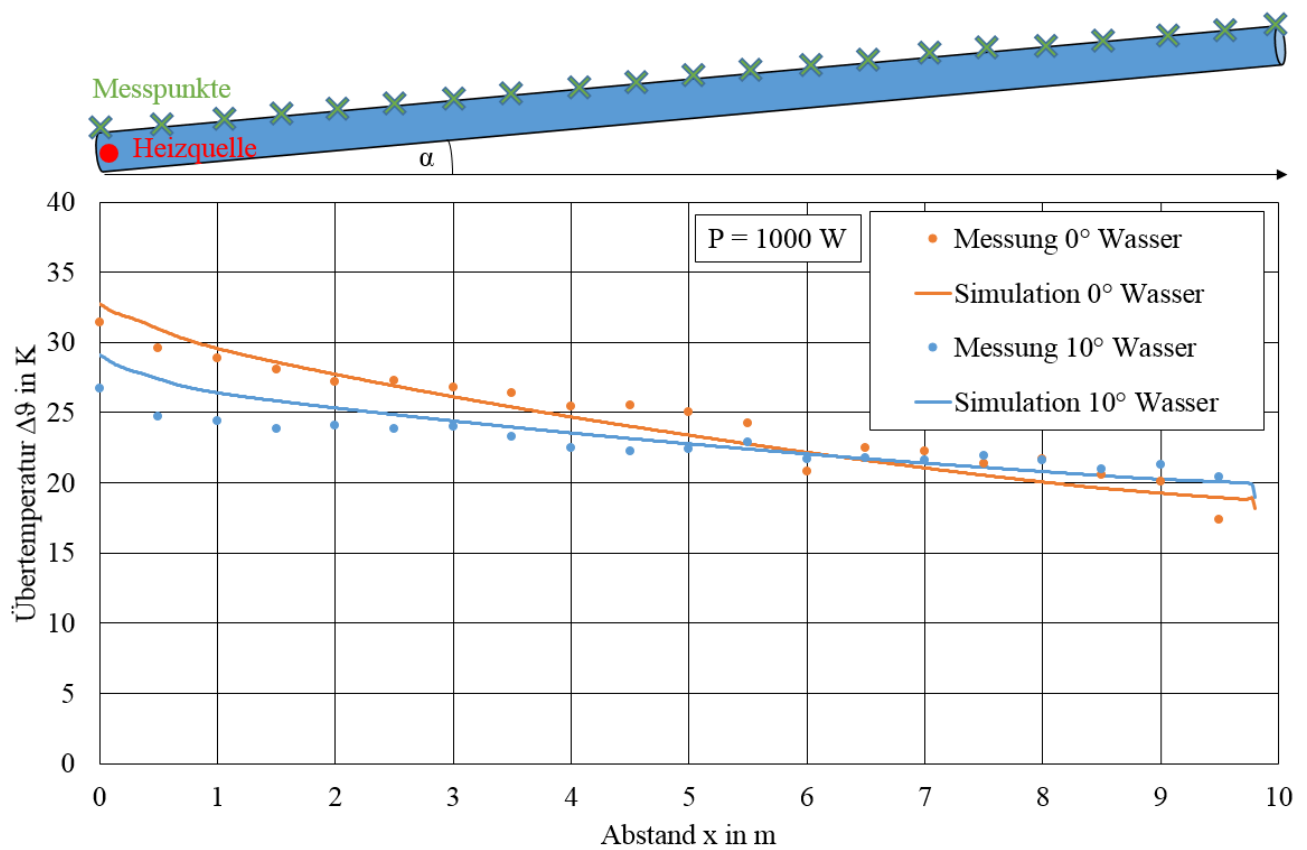


Abbildung 7: Messung und Rechnung für wassergefüllte Schutzrohre

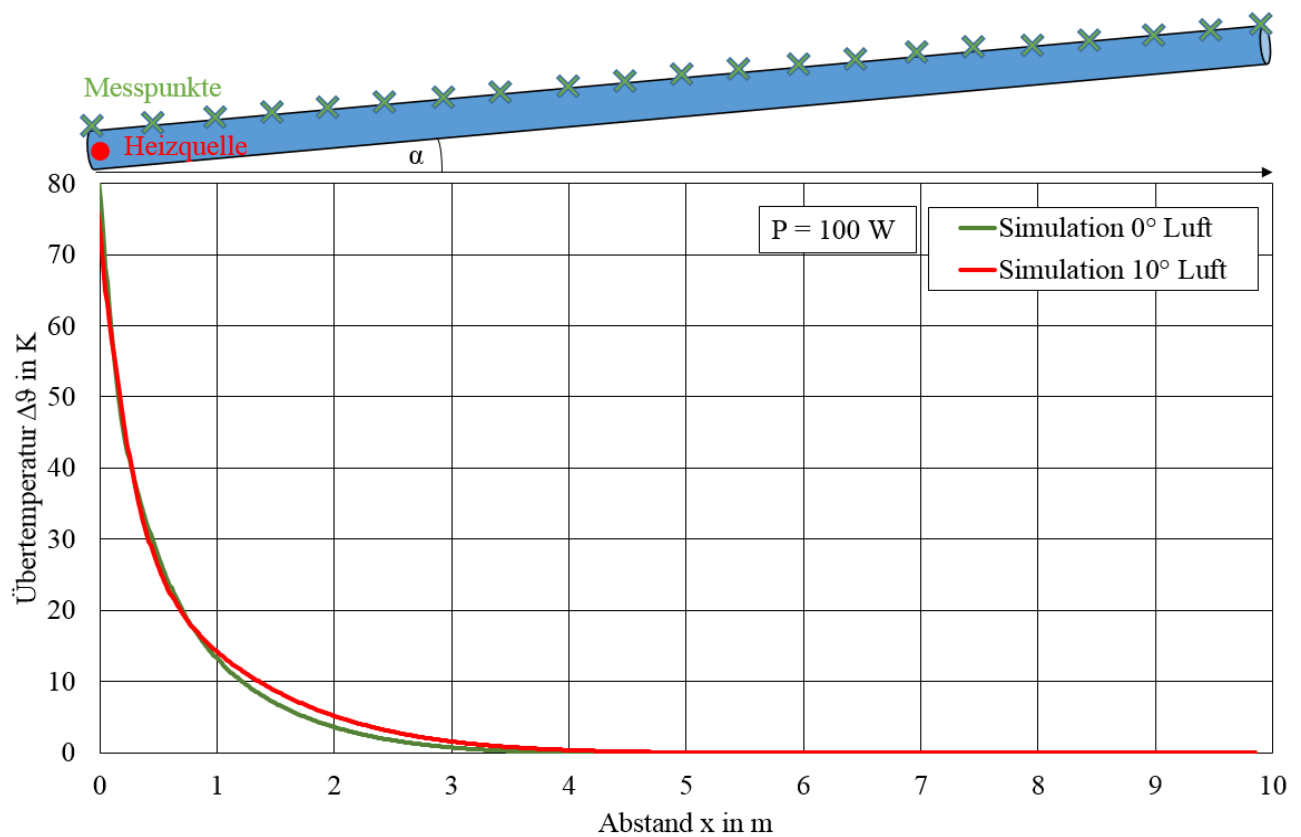


Abbildung 6: Berechnung für luftgefüllte Schutzrohre

Damit die Fälle

- Schutzrohr mit Wasserfüllung und
- Schutzrohr mit Luftfüllung

miteinander verglichen werden können, wird die Übertemperaturverteilung $\Delta\vartheta(x)$ der jeweiligen Messstelle auf die maximale Übertemperatur $\Delta\vartheta_{\max}$ an der Heizquelle $x \approx 0$ bezogen (s. Abbildung 8). Es kann die Ortskonstante bzw. die Leistungstransporttiefe b der Konvektion für die jeweiligen Fälle ermittelt werden. Folgende Leistungstransporttiefen stellen sich für die Fälle ein:

- Luftgefüllte Schutzrohre:
 - 0° Neigung: $b = 0,5$ m
 - 10° Neigung: $b = 0,7$ m
- Wassergefüllte Schutzrohre:
 - 0° Neigung: $b = 15$ m
 - 10° Neigung: $b = 22$ m

Es zeigt sich, dass sich in einem wassergefülltem Rohr eine lokale zusätzliche Verlustleistung bzw. verminderte Wärmeabfuhr wesentlich besser axial verteilen kann als ein luftgefülltes Rohr. Dies geschieht befriedigend bei vergleichsweise kleinen Neigungswinkeln ($\alpha \leq 10^\circ$).

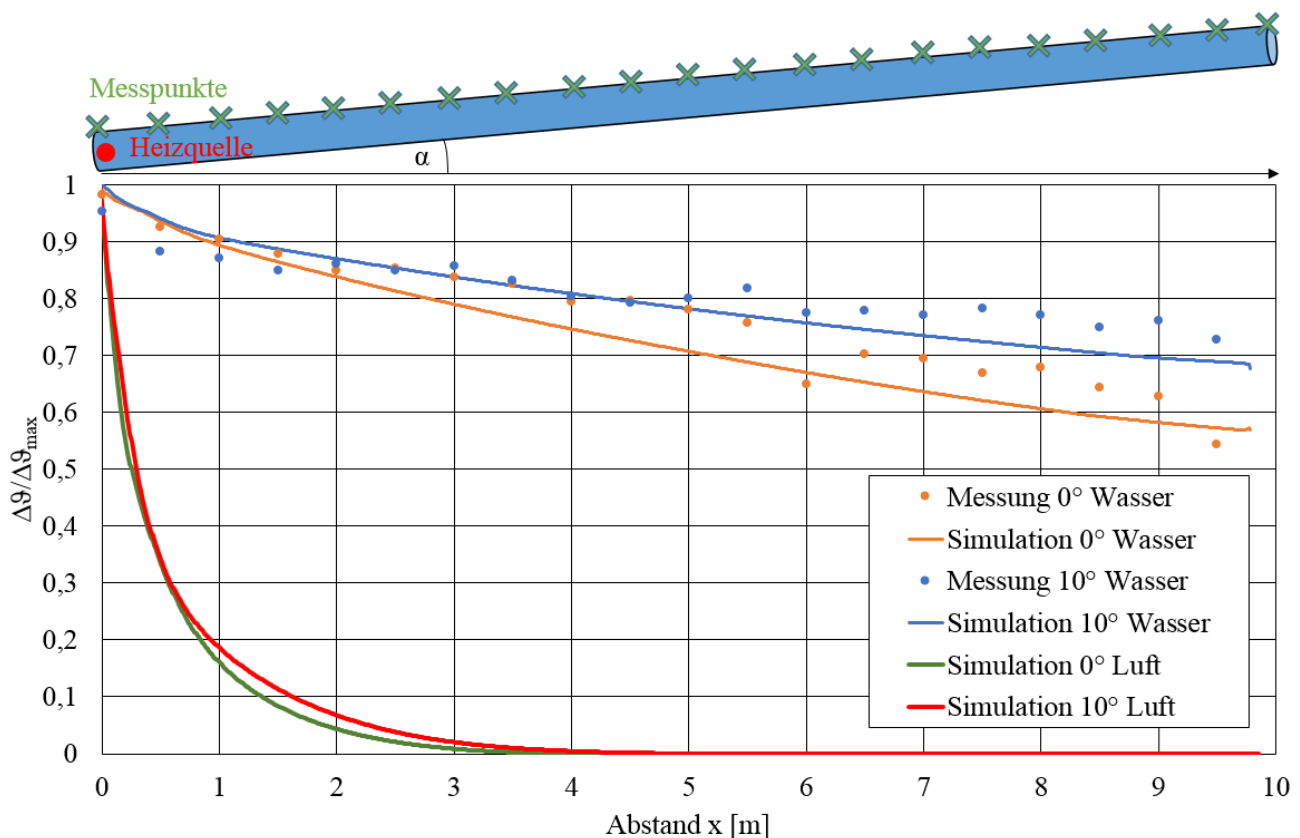


Abbildung 8: Normierte Übertemperatur für Schutzrohre mit Wasser oder Luft

3.2 Berechnung erdverlegter Kabel in luftgefüllten Schutzrohren

In diesem Schritt sollen die experimentell gewonnenen Erkenntnisse auf reale Kabelanordnungen übertragen werden. Für die Unterquerung an einer Versorgungsleitung anhand der Trasse (s. Abbildung 2) soll dafür eine thermische Berechnung für 2 Fälle durchgeführt werden:

- Fall A: Die Kabeltrasse läuft in ihrem Regelgrabenprofil mit einem Phasenabstand von 0,6 m in einer Verlegetiefe von 1,6 m. In der Unterquerung behalten die Kabel ihren Phasenabstand von 0,6 m bei. Innerhalb von 40 m wird die Verlegetiefe von 1,6 m auf 6,6 m erhöht. Die Kabelschutzrohre sind mit Luft gefüllt (s. Abbildung 9)

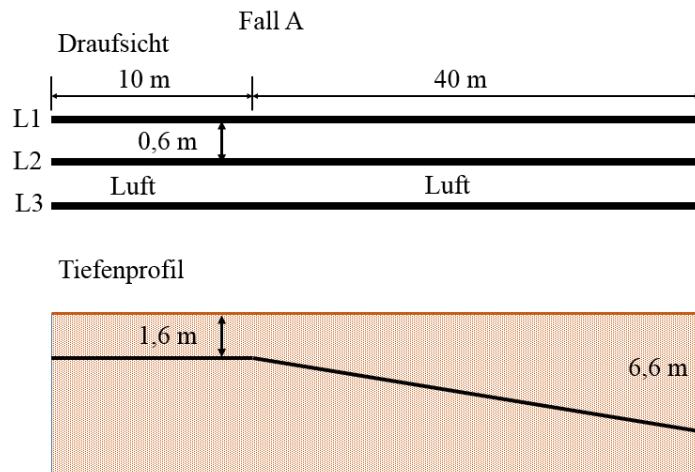


Abbildung 9: Schematische Darstellung Fall A

- Fall B: Die Kabeltrasse läuft in ihrem Regelgrabenprofil mit einem Phasenabstand von 0,6 m in einer Verlegetiefe von 1,6 m. In der Unterquerung erhöht sich innerhalb von 40 m der Kabelabstand linear von 0,6 m auf 4,5 m und die Verlegetiefe von 1,6 m auf 6,6 m. Die Kabelschutzrohre sind mit Luft gefüllt (s. Abbildung 10)

Werden die Fälle A und B für einen Strom von 1351 A berechnet, ergibt sich eine axiale Leitertemperaturverteilung des am stärksten belasteten Leiters nach Abbildung 11. Die Verringerung der Wärmeabfuhr in größeren Verlegetiefen führt dazu, dass sich die Leitertemperatur stark erhöht und im Fall A eine Temperatur von bis zu 200 °C erreicht.

Damit die Wärmeabfuhr bei größeren Verlegetiefen im Vergleich zum Regelgrabenprofil konstant gehalten werden kann, muss der Phasenabstand, wie in Fall B mit größerer Verlegetiefe, ebenfalls vergrößert werden. Eine Aufweitung der Kabel führt im Fall B dazu, dass die maximale Leitertemperatur ca. 100 °C im Bereich des Bohranfangs beträgt. Bei einer maximal zulässigen Leitertemperatur von 90 °C würde es auch im Fall B zu einer Überschreitung der Maximaltemperatur kommen. Eine Kompensation dieser Temperaturerhöhung wird in der Realität durch eine Aufweitung der Phasenabstände vor dem Anfangs- und Endpunkt der Bohrung erreicht. Für das Beispiel würde sich im Falle der Verlegevariante Fall B eine notwendige Gesamttrassenbreite von 54 m in der Tiefe von 6,6 m ergeben.

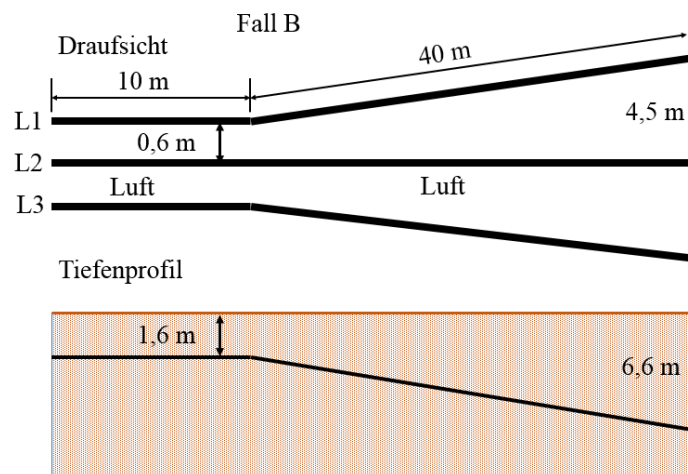
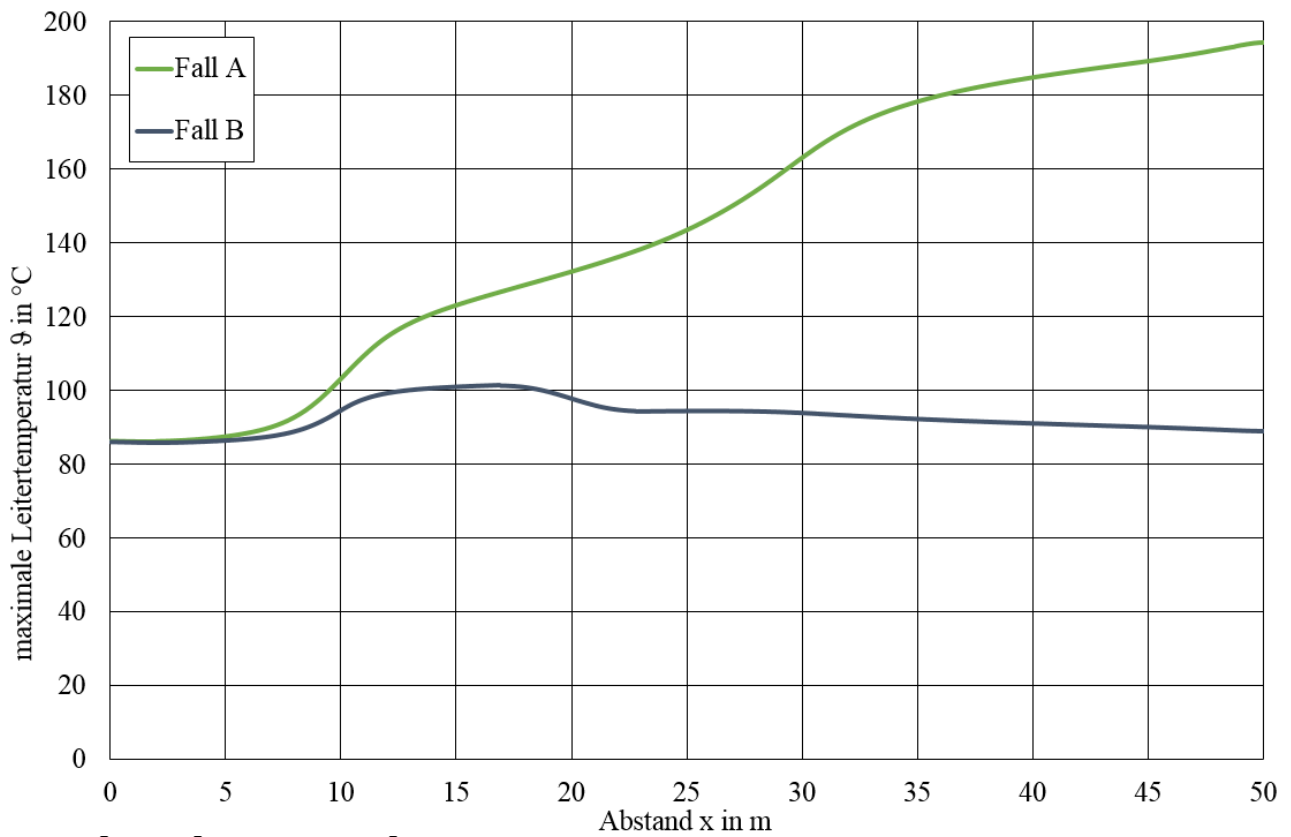


Abbildung 11: Schematische Darstellung Fall B



3.3 Berechnung erdverlegter Kabel in wassergefüllten Schutzrohren

Damit der benötigte Platzbedarf für Unterquerungen reduziert werden kann, muss die in den tieferen Schichten umgesetzte Verlustleistung in höher liegende Schichten transportiert werden. Dafür bietet sich der Einsatz von wassergefüllten Rohren an, welche im Vergleich zu luftgefüllten eine wesentlich gleichmäßigere axiale Leistungsverteilung hervorrufen.

Dazu soll das Beispiel Fall A im 1. Schritt in Fall A' folgendermaßen modifiziert werden:

- Fall A': Verlegeprofil analog Fall A. Die Schutzrohre in der Unterquerung sind mit Wasser gefüllt (s. Abbildung 12).

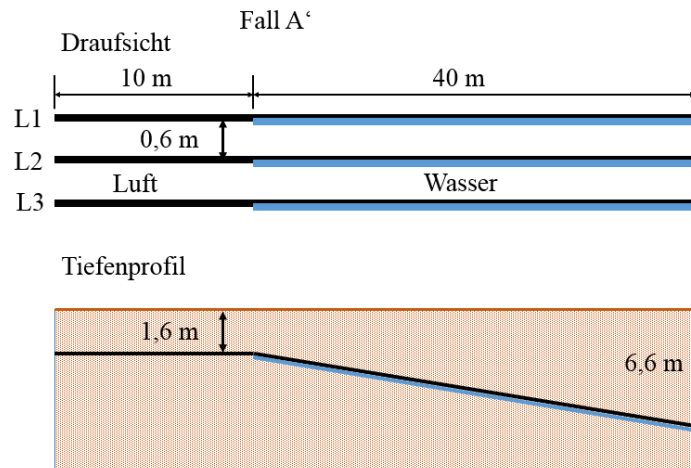


Abbildung 12: Schematische Darstellung Fall A'

Wird die Berechnung analog zu den Fällen A und B für den Fall A' durchgeführt, beträgt die maximale Leitertemperatur 120 °C (s. Abbildung 14). Es zeigt sich, dass die Leitertemperatur im Bereich der Unterquerung nahezu konstant ist und nicht wie im Fall A stark ansteigt. Da die Verlustleistung aus den tieferen Schichten in die höheren Schichten transportiert wird, erhöht sich die Temperatur im Regelgrabenprofil ($x = 0 \dots 10$ m) um wenige Kelvin.

In einem 2. Schritt wird der Phasenabstand derart verändert, bis die maximale Leitertemperatur 90 °C nicht überschreitet.

- Fall A'': Der Phasenabstand wird 5 m vor Unterquerungsbeginn auf 1,6 m erhöht (s. Abbildung 13). Die Schutzrohre sind mit Wasser gefüllt.

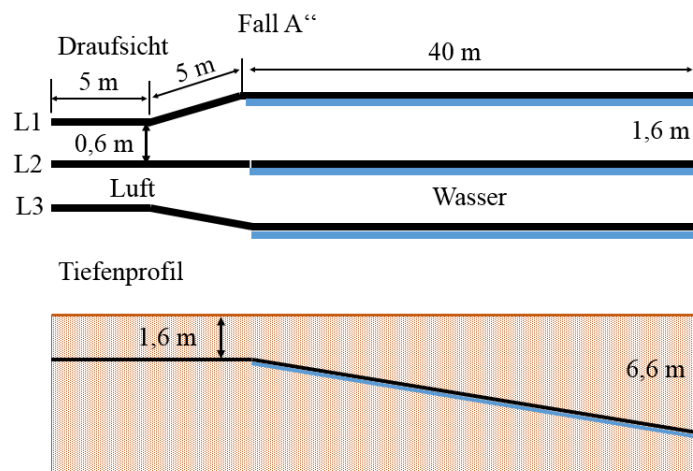


Abbildung 13: Schematische Darstellung Fall A''

Damit die maximale Grenztemperatur von 90 °C nicht überschritten wird, muss der Phasenabstand aus Fall A' auf einem Phasenabstand von 1,6 m (Fall A'') aufgeweitet werden. In diesem Fall würde die maximale Trassenbreite in einer Tiefe anstatt 54 m nur noch 21 m betragen.

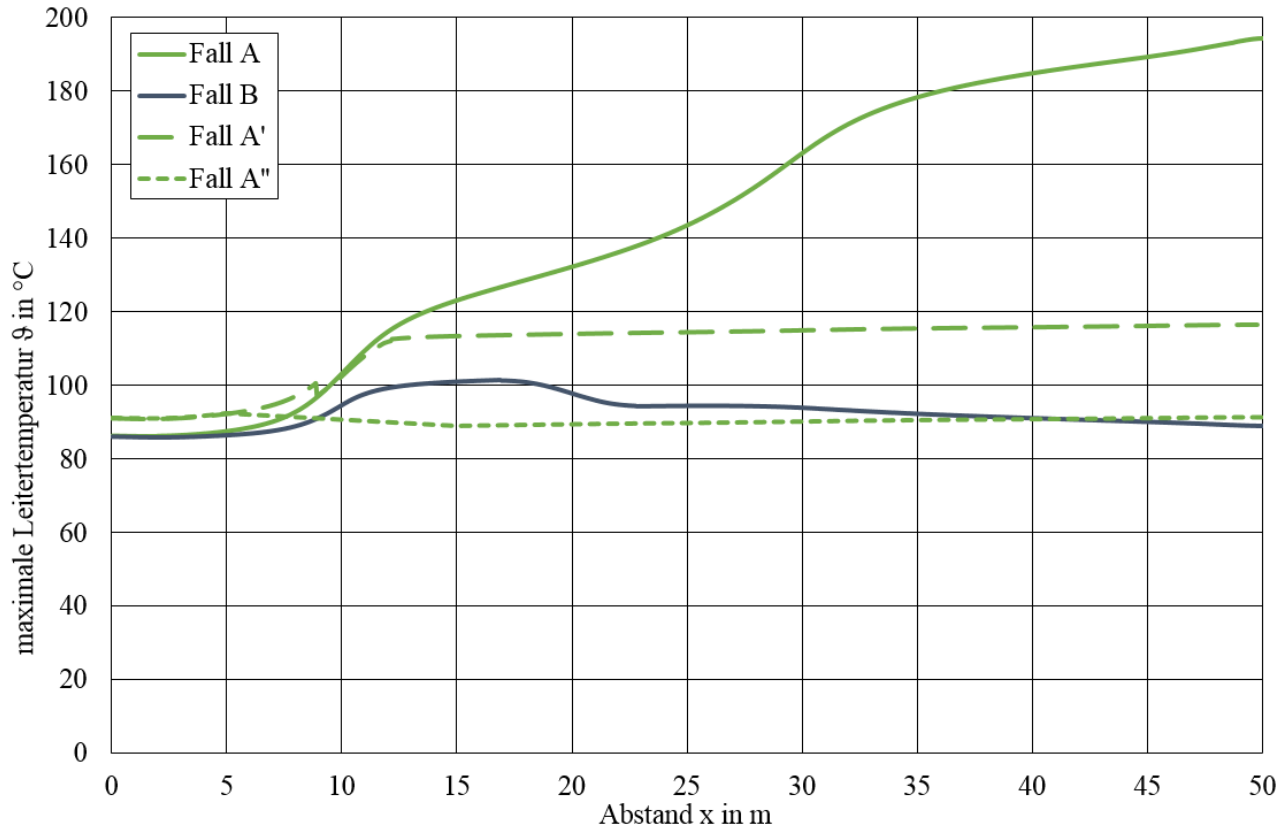


Abbildung 14: Vergleich der Ergebnisse Fälle A, B, A' und A''

4 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass tiefliegende Kabel nicht zwingend auf sehr große Abstände gebracht werden müssen, da:

- dauerhaft wasserführende Schichten die Kabel zusätzlich entwärmen und
- Unterquerungen durch das Befüllen der Schutzrohre mit Wasser deutlich schmaler konzipiert werden.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Rogler, R.-D.:
32. Oldenburger Rohrleitungsforum 2018, Band 45
Rohrleitungen – innovative Bau- und Sanierungstechniken
Wärmeleitfähigkeit verschiedener Bettungsmaterialien erdverlegter Stromtrassen und
ihre Wirkung auf den Nennstrom
S. 699-712
- [2] Rogler, R.-D., Loth, C.:
33. Oldenburger Rohrleitungsforum 2019, Band 46
Rohrleitungen – Transportmedium für Trinkwasser und Abwasser
Parameterstudie zur Erwärmung erdverlegter Kabelanlagen unter Berücksichtigung
von Geometrie- und Materialeigenschaften der Bettung
S. 712-724

Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Carsten Loth

Hochschule für Technik und Wirtschaft
Dresden
Fakultät Elektrotechnik, Schaltan-
lagentechnik, Dresden

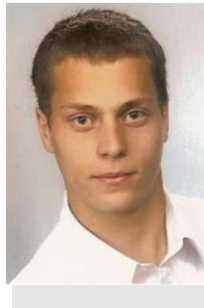
Tel.: 0351 / 462 3242

E-Mail:

carsten.loth@htw-dresden.de

Internet:

www.htw-dresden.de



Prof. Dr.-Ing. Ralf-Dieter Rogler

Hochschule für Technik und Wirt-
schaft Dresden,
Fakultät Elektrotechnik, Schaltan-
lagentechnik, Dresden

Tel.: 0351 / 462 2544

E-Mail:

ralf-dieter.rogler@htw-dresden.de

Internet:

www.htw-dresden.de

