

# Versuch HS1: Belastung von Einleiterkabeln

01/2024

Prof. Dr.-Ing. Ralf-Dieter Rogler  
Dipl.-Ing. K. Schellenberger

## 1 Einleitung

Die Höhe der übertragbaren Leistung von Einleiterkabeln hängt unter anderem von der in den Kabeln erzeugten elektrischen Verlustleistung und von der Wärmeübertragung innerhalb (Isolierung und Kabelmantel) und außerhalb (Erdboden oder Freiluft) des Kabels ab.

Verlustleistungen werden im Leiter des Kabels durch den Betriebsstrom und durch den Strom im konzentrischen Außenleiter (abhängig von der Erdung und der elektrischen Verbindung der konzentrischen Außenleiter untereinander) erzeugt.

Diese Verlustleistungen werden durch Wärmeleitung von den *Quellen* (Leiter und konzentrischer Außenleiter) in die *Senke* (Erdreich oder Umgebungsluft) transportiert. Abhängig von der Umgebungstemperatur, der zulässigen Leiter- und Kabeloberflächentemperatur, den Leitungswiderständen, den Wärmeübertragungsgrößen und der Verlegeart ergibt sich der zulässige Belastungsstrom des Kabels.

Für eine 10 m lange luftverlegte Dreiphasen-20-kV-Kabeltrasse (NA 2X S(F)2Y 1X240/25 12/20 kV RM) ist die Temperaturverteilungen bei einer Strombelastung von  $I_L = 581$  A bei verschiedenen Anschluss- und Verlege-Varianten vorab zu berechnen und im praktischen Versuch zu messen.

## 2 Versuchsziel

Das Ziel des Versuches besteht darin, grundlegende Kenntnisse zur Höhe des übertragbaren Stromes und damit der übertragbaren Leistung über Einleiterkabel zu vermitteln und damit das Verständnis für die thermischen Einflüsse auf die Belastbarkeit eines Kabels zu vertiefen.

Im Besonderen wird der Einfluss der Schirmbehandlung auf die Stromtragfähigkeit untersucht.

Zur Berechnung soll die Methode der Wärmenetztheorie und eine spezielle Software (P-Spice) genutzt werden. Die berechneten Ergebnisse sollen mit den Messergebnissen verglichen werden.

### 3 Versuchsaufbau

#### 3.1 Parameter des Kabels

Bezeichnung:	NA 2X S(F)2Y 1x240/25 12/20 kV RM
Leiter (Al):	$A = 240 \text{ mm}^2$ ; $d_L = 17,8 \text{ mm}$
Außenleiter: (Cu):	$A = 25 \text{ mm}^2$
Leiterwiderstand bei 20°C:	0,125 Ohm /km
Wanddicke der inneren Leitschicht:	0,3 mm
Wanddicke der Isolierhülle:	5,5 mm
Durchmesser über Isolierhülle:	30 mm
Wanddicke der äußeren Leitschicht:	0,4 mm
Wanddicke des Außenmantels:	2,5 mm
Außendurchmesser:	40 mm
Betriebskapazität:	0,31 $\mu\text{F}/\text{km}$
Betriebsinduktivität:	0,36 mH/km
Kurzschlussstrom im Leiter $I_k$ :	22,6 kA
Kurzschlussstrom im Schirm $I_k$ :	5,1 kA
Strombelastbarkeit in Erde:	Dreierbündel 417 A parallel horizontal 455 A
Strombelastbarkeit in Luft $I_L$ :	Dreierbündel 496 A parallel horizontal 581 A

#### 3.2 Versuchsschaltung

Verwendet werden drei Einleiter-Kabel mit einer Länge von je 10 m. Sie werden horizontal nebeneinander frei in der Luft auf Lagerhölzern verlegt.

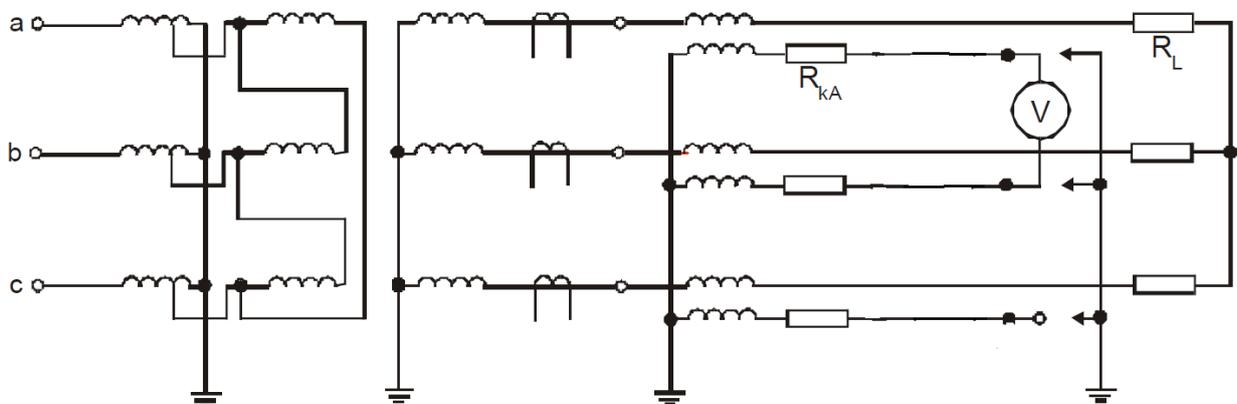
Die Abstände sind variabel (60 / 120 / 240 mm).

Die Spannungsversorgung erfolgt aus dem Netz. Ein großer 3-Phasen Stelltransformator speist einen Hochstrom-Transformator. Dort sind die Die Kabel-Anfänge angeschlossen.

Die Kabelenden sind miteinander verbunden ("Sternpunkt").

Die Kabel-Schirme (konzentrische Außenleiter) sind am Kabelanfang verbunden und geerdet. Am Kabelenden sind sie wahlweise offen oder verbunden (Sternpunkt).

In jedem Kabel befindet sich je ein Temperatursensor im Kabelmantel und im Leiter.



Stell-  
Transform.

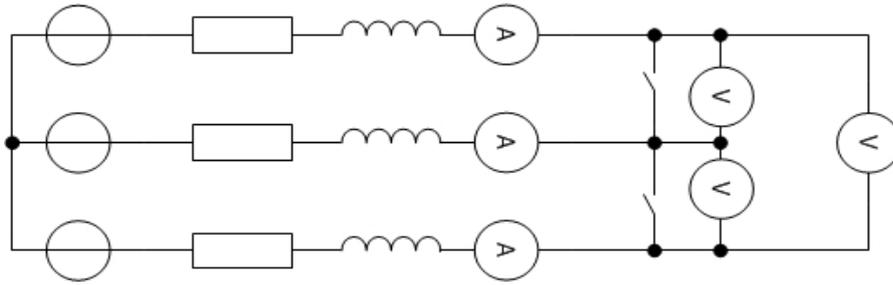
Hochstrom-  
Transform.

Strom-  
Messung

Erdung  
Schirm-  
Anfang

Spannungs-  
Messungen

Schirm-  
Erdung Ende  
variabel



Messaufbau für die Mantelspannungen und -ströme

### 3.3 Umgebungsbedingungen

Der Versuch findet im Freien im Hof vor dem Hochstromlabor statt.

Je nach Praktikumstermin kann es dabei auch einmal kalt, windig und regnerisch sein.

In Abhängigkeit davon können die Umgebungstemperaturen und die erreichten Kabeltemperaturen von denen der Vorjahre abweichen.

## 4 Vorbereitungsaufgaben

1. Von welchen Bedingungen und Parametern des Kabels und der Kabeltrasse sind die Ströme in den konzentrischen Außenleitern der Einleiterkabel abhängig?
2. Berechnen Sie die Ströme in allen konzentrischen Außenleitern ( $I_M$ ) für den Fall, dass diese beidseitig kurzgeschlossen sind, für den im Versuch verwendeten Nennstrom und für die in diesem Versuch verwendeten Leiter, Abstände und erwartete Umgebungsbedingungen. Übertragen Sie Ihre Ergebnisse bereits in eine Kopie der Messwerttabelle 3.

Hinweis: Alle notwendigen Formeln und Werte finden Sie in dieser Anleitung bzw. in den Vorlesungs-Mitschriften oder den angegebenen Literaturquellen, z.B. [5]. Bei Messbeginn haben sich die Kabelmäntel etwa auf 24 °C erwärmt.

3. Warum werden die konzentrischen Außenleiter von Einleiterkabeln bei manchen Kabeln beidseitig geerdet und bei anderen nur einseitig geerdet?
4. Berechnen Sie die Spannung  $U_M$  zwischen den einseitig offenen konzentrischen Außenleitern (= Kabelmänteln) für alle Kabel und alle Abstände. Fügen Sie ihre Ergebnisse bereits in eine Kopie der Messwerttabelle 2 ein.
5. Mit welchen Maßnahmen können die Ströme in den konzentrischen Außenleitern verringert werden?
6. Warum haben die Ströme in den konzentrischen Außenleitern einen Einfluss auf die maximal übertragbare Leistung des Kabelsystems?
7. Welche Temperaturen im Einleiterkabel bestimmen die maximal zulässige Belastbarkeit der Kabel mit Betriebsströmen? Begründen Sie Ihre Aussage!
8. Wovon ist die Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens abhängig?
9. Wie und warum verändert sich die Wärmeleitfähigkeit des Bettungsmaterials *Sand*, wenn der *gewachsene* Erdboden lehm- bzw. tonhaltig ist?

## 5 Versuchsdurchführung

### 5.1. Messung von Temperatur und Spannung bei einseitig offenen

#### Außenleitern

Nutzen Sie die bereits eingeschaltete und thermisch eingeschwungene Messanordnung (Leiternabstand 240 mm, die Außenleiter einseitig kurzgeschlossen).

Notieren Sie die Messwerte der Temperatursensoren in Kabelmänteln und Kabeln sowie in der Umgebungsluft.

Temperaturen	im Leiter			im Mantel			in Luft
	$\vartheta_{LL1}$	$\vartheta_{LL12}$	$\vartheta_{LL3}$	$\vartheta_{ML1}$	$\vartheta_{ML2}$	$\vartheta_{ML3}$	$\vartheta_0$
$\vartheta$ [°C]							

Tabelle 1: Temperaturen bei 240 mm Abstand und offenen Außenleitern, eingeschwungener Zustand

Messen Sie die in der Tabelle angegebenen Außenleiter-Spannungen ( $U_{Mx-My}$  bei Abstand 240 mm). Bei nassem Wetter achten Sie bitte darauf, die Messgeräte und Messstellen trocken zu halten.

Verändern Sie die Abstände der Kabel auf 120 mm bzw. 60 mm. **Korrigieren Sie den Kabelstrom nach jeder Änderung!** Messen Sie erneut die Spannungen.

Abstand	Außenleiter-Außenleiter-Spannung			Außenleiter-Sternpunkt-Spannung		
	$U_{M1-M2}$	$U_{M1-M3}$	$U_{M2-M3}$	$U_{M1-SP}$	$U_{M2-SP}$	$U_{M3-SP}$
240 mm	V	V	V	V	V	V
120 mm	V	V	V	V	V	V
60 mm	V	V	V	V	V	V

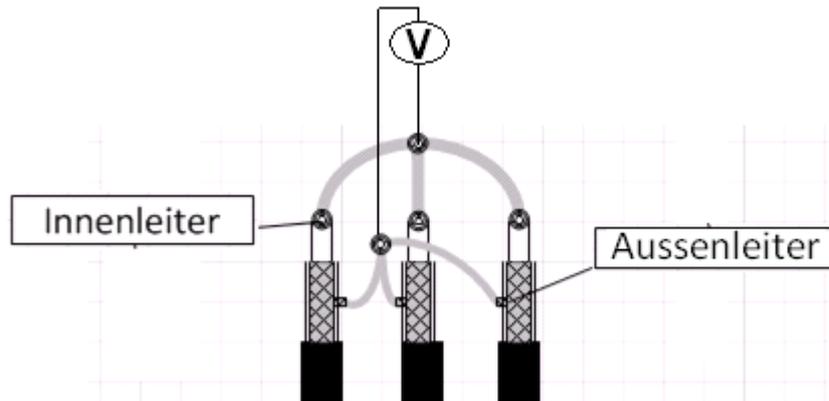
Tabelle 2: Spannungen bei offenen Außenleitern bei verschiedenen Leiterabständen

- Vergleichen Sie die Spannungswerte mit den von Ihnen vorab berechneten Werten. Übernehmen Sie alle Tabellen in Ihr Protokoll.
- Erklären Sie die auftretenden Änderungen der Spannungen bei Veränderung des Abstandes!
- Bewerten Sie die praktischen Konsequenzen der ermittelten Spannungen, vor allem hinsichtlich der üblicherweise größeren Kabellängen!

## 5.2 Messungen von Strömen bei beidseitig kurzgeschlossenen Außenleitern

Schließen Sie nun die Außenleiter der drei Kabel an den freien Enden zusammen.

**Hinweis: Vorsicht, Funkenbildung ist möglich! Freie Schirme an der Isolation anfassen!**



**Hinweis: Stellen Sie den Kabelstrom nach jeder Änderung erneut auf 581 A ein!**

Messen Sie alle Ströme in den Außenleitern und die Sternpunkt-Sternpunkt-Spannung zuerst bei 60 mm Abstand. Verändern Sie danach die Abstände der Kabel auf 120 mm bzw. 240 mm Leiter-Leiter Abstand. Messen Sie erneut alle Spannungen.

Abstand	Ströme in den Außenleitern (Mantelströme)			Sternpunktspannung
	$I_{M1}$	$I_{M2}$	$I_{M3}$	$U_{SP1-SP2}$
60 mm	A	A	A	V
120 mm	A	A	A	V
240 mm	A	A	A	V

Tabelle 3: Mantelströme und Sternpunktspannung bei beidseitig kurzgeschlossenen Außenleitern

Was sagt die gemessene Spannung aus? Vergleichen Sie die gemessenen Werte mit den berechneten. Übertragen Sie die Tabellen in Ihr Protokoll.

### Abschätzung der auftretenden Leiter-Mantel-Spannungen

Die Leiter-Mantel-Spannungen sind an diesem Modell bei verbundenen Schirmenden nicht messbar. Wie groß sind diese im Vergleich zu einseitig offenen Leitern? Fertigen Sie eine Skizze des Verlaufs der Spannungshöhe in Abhängigkeit von der Position über der Länge eines einzelnen Kabels an.

Absolvieren Sie während der Wartezeit bis zum Erreichen der neuen Endtemperatur das **Kolloquium** und beginnen Sie ggf. mit den "Aufgaben zur Wärmeberechnung". Messen Sie abschließend nochmals alle Temperaturen.

### Messung der Temperaturen

Temperaturen	im Leiter			im Mantel			in Luft
	$\vartheta_{LL1}$	$\vartheta_{LL2}$	$\vartheta_{LL3}$	$\vartheta_{ML1}$	$\vartheta_{ML2}$	$\vartheta_{ML3}$	$\vartheta_0$
$\vartheta$ [°C]							

Tabelle 4: Temperaturen bei 240 mm Abstand, beidseitig kurzgeschlossenen Schirm, eingeschwungen

Erklären Sie, warum sich hier andere Endtemperaturen einstellen als in Versuch 6.1!

### 5.3 Aufgaben zur Wärmeberechnung

- 1 Stellen Sie das thermische Ersatzschaltbild (Wärmenetz) zur Berechnung der Temperaturverteilung bzw. zur Berechnung der zulässigen Strombelastbarkeit auf.
- 2 Berechnen Sie die Verlustleistungen, Wärmewiderstände und Wärmekapazitäten der Isolierung, des Kabelmantels und der Umgebung (Strahlung und Konvektion).
- 3 Berechnen Sie den Temperaturverlauf nach dem Einschalten. Welcher Endwert wird erreicht?
- 4 Berechnen Sie die radiale Temperaturverteilung des Leiters und der Kabeloberfläche im eingeschwungenen Zustand und stellen Sie diese grafisch dar.
- 5 Vergleichen Sie gemessene und berechnete Temperatur-Werte. Benennen Sie mögliche Ursachen für Abweichungen!

## 6 Formelzeichen

Formelzeichen	physikalische Größe
A	Querschnittsfläche
$d_L$	Durchmesser des Leiters
a	Leitermittenabstand
$I_L$	Strombelastbarkeit in Luft
$I_{M1}$	Strom im Außenleiter 1 (Mantelstrom)
l	Länge des Kabels
R	elektrischer / thermischer Widerstand
$R'_{Ka}$	bezogener Wärmewiderstand der Kapselung
$U_{M1-M2}$	Spannung zwischen den Außenleitern 1 / 2
$U_{M1-SP}$	Spannung zwischen Außenleiter 1 und dem Sternpunkt der Leiter
$U_{SP1-SP2}$	Spannung zwischen Verbindung der Außenleiter und Leitersternpunkt
$\vartheta_0$	Temperatur der Umgebungsluft
$\vartheta_L$	Temperatur im Leiter
$\vartheta_M$	Temperatur im Kabelmantel
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\rho$	spezifischer Widerstand
$\tau$	Zeitkonstante

*Hinweis: Außenleiter = Kabelmantel = Kapsel = Schirm*



## Anhang 2: Aufbau der Kabeltrasse

