

Studie:

**Transiente Überspannungen bei der
Zwischenverkabelung der 380-kV-
Leistungsverbindung Chippis-Ulrichen**

Prof. Dr.-Ing.habil. Heinrich Brakelmann
Dr.-Ing Tao Dong
BCC Cable Consulting

Auftraggeber:

**Swissgrid AG
Frick, Schweiz**

Rheinberg, Aschaffenburg, Juli 2014

Inhaltverzeichnis

1.	Einleitung	3
2.	Nachbildung der Gommerleitung in ATP-EMTP	4
2.1	Umfang des modellierten elektrischen Netzes	4
2.1.1	380-kV-Netzeinspeisung UW Chippis, Innertkirchen und Larvogo.....	6
2.1.2	65-kV-Netzeinspeisung UW Mörel und Ulrichen	6
2.1.3	Modellierung des Freileitungssystems	7
2.1.4	Modellierung des Kabelsystems.....	8
3.	Schaltvorgänge	10
3.1	Spannungserhöhung der leerlaufenden Freileitungs- und Kabelstrecke.....	10
3.2	Einschalten der leerlaufenden Freileitungs- und Kabelstrecke.....	11
3.2.1	Einschalten des leerlaufenden Einfachsystems	11
3.2.2	Einschalten bei parallel in Betrieb befindlicher Freileitungs- und Kabelstrecke	18
3.3	Synchrones Schalten	20
3.4	Ausschalten von leer laufenden Freileitungs- und Kabelstrecken.....	21
3.5	Wiedereinschalten der bereits geladenen Leitungen.....	21
3.6	Transienter Erdkurzschluss	26
4.	Blitzüberspannungen	30
4.1	Ausbreitung von Wanderwellen bei Zwischenverkabelungen.....	30
4.2	Direkte Blitzeinwirkungen auf der Kabelanlage.....	32
4.3	Blitzeinwirkungen auf Kabelschirme beim Einschläge in geerdete Anlagen.....	35
5.	Zusammenfassung	41
6.	Literatur	42

Transiente Überspannungen bei der Zwischenverkabelung der 380-kV-Leitungsverbindung Chippis-Ulrichen

1. Einleitung

Wegen der deutlich unterschiedlichen der elektrischen Parameter sollten bei der Zwischenverkabelung von Freileitungen Überprüfungen des elektrischen Verhaltens vorgenommen werden. Je nach der geplanten Kabellänge werden unterschiedliche Systemstudien bezüglich der stationären, dynamischen und transienten Gesichtspunkte von der Planungsphase bis zur Betriebsphase erforderlich. Eine umfassende Zusammenfassung erforderlicher Systemuntersuchungen bei der Planung von Kabelverbindungen findet man in [1].

In der vorliegenden Studie sollen die elektromagnetischen transienten Ausgleichsvorgänge bei der geplanten Teilverkabelung der Gommerleitung zwischen UW Chippis und UW Ulrichen untersucht werden. In [2] werden drei Varianten realisierbarer Zwischenverkabelungen im Hinblick auf die bautechnischen, wirtschaftlichen und thermischen Aspekte sowie die Umweltbeeinträchtigungen ausführlich untersucht. Als Ausgangspunkt zur Prüfung des transienten Betriebsverhaltens dieser Teilverkabelung wird die im Tunnel verlegte Variante in dieser Studie betrachtet, derer Anordnung aus [2] hier in Abb.1 schematisch dargestellt wird.

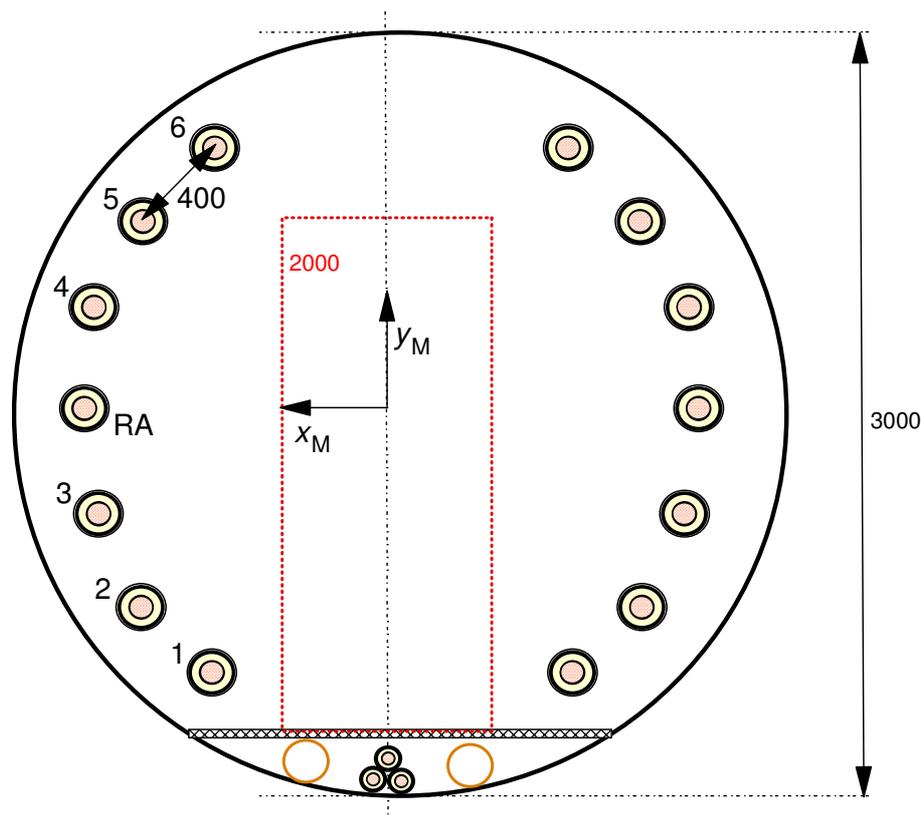


Abbildung 1 Variante der Kabelanordnung für elektromagnetisch transiente Analyse

Die zu untersuchende Anordnung besteht aus vierzehn 380 kV-Kabeln (zwei Doppelsysteme mit jeweils einem Reservekabel) und drei 65 kV-Kabeln. Da bei der kürzesten Variante die höchsten Überspannungen auf den Kabeln zu erwarten sind, wurde hier eine Kabellänge von 3,3 km gewählt. Aufgrund des relativ komplizierten Mehrleitersystems mit einer engen elektromagnetischen Kopplung von 34 „Phasen“ (= Leiter + Schirm für jedes Kabel) sind

digitale Simulationen der transienten Ausgleichvorgänge erforderlich, die kritische Überspannungen sowie Überströme in Kabelleitern- und Schirmen hervorrufen können.

Die Berechnungen werden mithilfe des universellen Simulationsprogramms *ATP-EMTP* (ElectroMagnetic Transients Program, Version Alternative Transients Programm) durchgeführt [3].

2. Nachbildung der Gommerleitung in ATP-EMTP

2.1 Umfang des modellierten elektrischen Netzes

Der Umfang des modellierten elektrischen Netzes wird von den zu untersuchenden elektrischen Phänomenen bestimmt. Zum Simulieren der elektromagnetischen transienten Vorgänge wird die Modellierung des Netzes von der Kabelverbindung aus bis zu den nächsten Unterstationen (2-bus model) in IEC 60071-4 als ausreichend genau angesehen. Weiterhin werden einige Vereinfachungen bei der Modellierung der anderen Betriebsmittel außer Kabeln angenommen aufgrund der Tatsachen:

- die meisten in Frage kommenden Trassen befinden sich noch in der Planungsphase, und es liegen somit noch nicht alle konkreten Netzdaten vor,
- die Untersuchung konzentriert sich auf transiente Vorgänge bei der Kabelanlage, weil die Isolierungssysteme von Kabelanlagen nach Beschädigungen nicht, wie bei Freileitungen, selbst heilen können, so dass Ausfälle wegen der notwendigen Fehlerortung und der anschließenden Reparatur aufwändig, langwierig und teuer sein können.

Da es nicht um eine konkrete Studie der Isolationskoordination sondern vielmehr darum geht, die möglichen Probleme sowie das transiente Betriebsverhalten während der Ausgleichvorgänge in der Zwischenverkabelung zu identifizieren bzw. zu verdeutlichen, ist eine ganz genaue Modellierung des Netzes weder möglich noch nötig. Im Fall der fehlenden elektrischen Daten werden Referenzdaten aus Erfahrungswerten verwendet, die im Folgenden noch einzelnen beschrieben werden.

Auf Basis der vorhandenen Daten werden die folgenden Netzkomponenten im Simulationsmodell nachgebildet:

- 380-kV-Netzeinspeisung: UW Chippis, Innertkirchen und Larvogo,
- 65-kV-Netzeinspeisung: UW Mörel und UW Ulrichen,
- 2x380-kV Freileitung: UW Chippes - UW Mörels (44 km),
- 2x380-kV + 1x65-kV Freileitung: UW Mörel - Kabelübergang 1 (ca. 7 km)
- 4x380-kV + 1x65-kV Kabel: Kabelübergang 1 - Kabelübergang 2 (ca. 3.3 km)
- 2x380-kV + 1x65-kV Freileitung: Kabelübergang 2 - UW Ulrichen (ca. 20 km)
- 2x380-kV Freileitung: UW Ulrichen - UW Innertkirchen (26 km),
- 2x380-kV Freileitung: UW Ulrichen - UW Larvogo (47 km)

Die Verbindung der modellierten Netzkomponenten wird schematisch als *ATPDraw*-Zeichnung in Abb.2 gezeigt. *ATPDraw* ist der grafische Vorprozessor für *ATP-EMTP*.

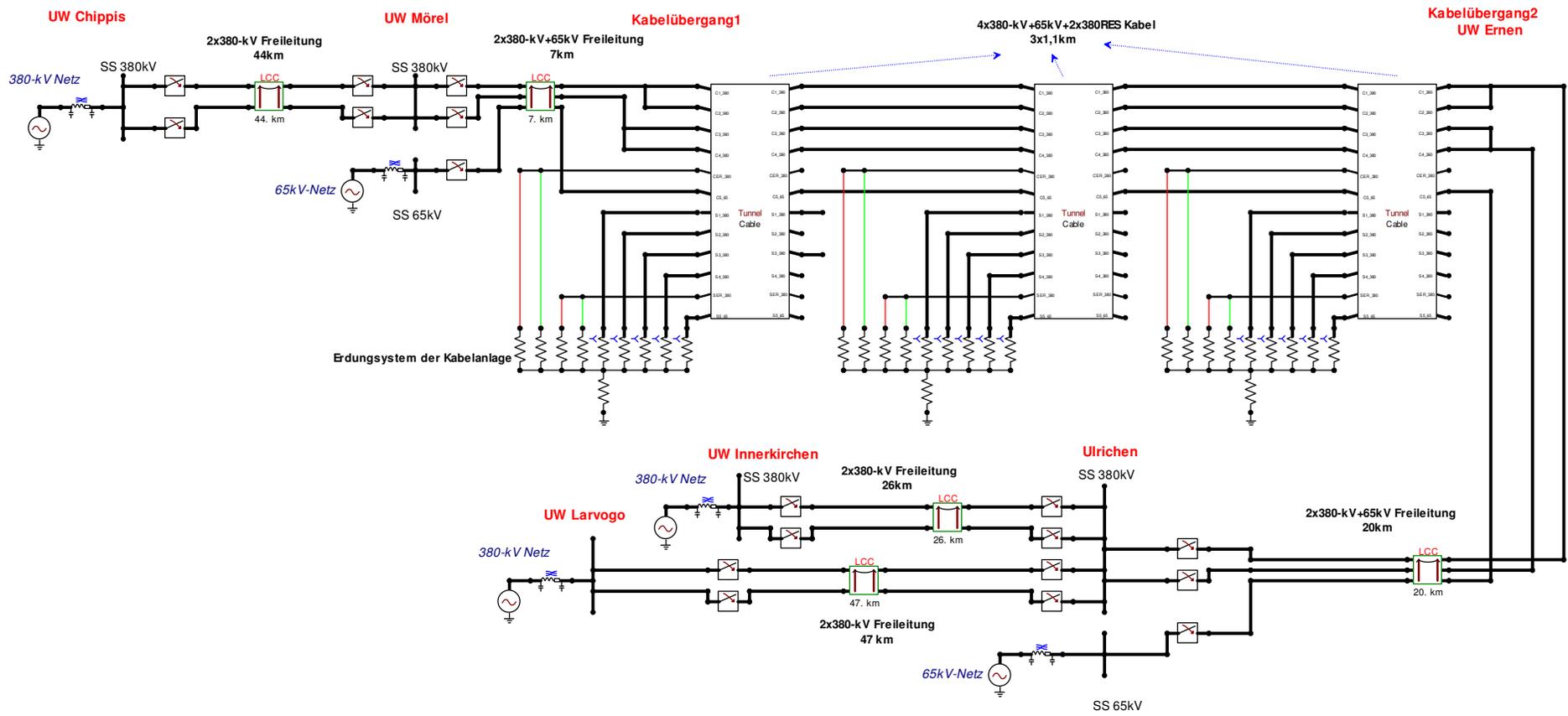


Abbildung 2: ATPDraw-Zeichnung des modellierten Netzes

2.1.1 380-kV-Netzeinspeisung UW Chippis, Innertkirchen und Larvogo

Die 380-kV-Netzeinspeisung wird durch eine dreipolige Ersatzspannungsquelle (Spannungsquelle hinter der Kurschlussimpedanz) nachgebildet. Die Sternpunktterdung des 380-kV-Netzes wird als starr geerdet angenommen. Der dreipolige Anfangskurzschlussstrom I_{K3}'' liegt zwischen 23 kA und 30 kA, und der einpolige Anfangskurzschlussstrom I_{K1}'' wird zu 80% von I_{K3}'' angenommen. Bei Vernachlässigung des ohmschen Anteils beträgt die Kurzschlussimpedanz :

$$\underline{Z}_{k1\max} = jX_{k1\max} = \frac{U_{nN} \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot I_{K3\min}''} = j \frac{380 \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot 23} = j10,49 \Omega$$

$$\underline{Z}_{k0\max} = jX_{k0\max} = \frac{3 \cdot U_{nN} \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot I_{K1\min}''} - 2 \cdot \underline{Z}_{k1\max} = j \left(\frac{3 \cdot 380 \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot 23 \cdot 0,8} - 2 \cdot 10,49 \right) = j18,38 \Omega$$

$$\underline{Z}_{k1\min} = jX_{k1\min} = \frac{U_{nN} \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot I_{K3\max}''} = j \frac{380 \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot 30} = j8,04 \Omega$$

$$\underline{Z}_{k0\min} = jX_{k0\min} = \frac{3 \cdot U_{nN} \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot I_{K1\max}''} - 2 \cdot \underline{Z}_{k1\min} = j \left(\frac{3 \cdot 380 \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot 30 \cdot 0,8} - 2 \cdot 8,04 \right) = j14,09 \Omega$$

Für die Berechnung der Überspannungen auf Kabelleitern wird die maximale Kurzschlussimpedanz verwendet. Zur Berechnung der Überspannungen auf den Kabelschirmen wird die minimale Kurzschlussimpedanz benutzt. Sie stellen jeweils den ungünstigsten Fall dar.

2.1.2 65-kV-Netzeinspeisung UW Mörel und Ulrichen

Die im 65-kV-Netz auftretenden transienten Vorgänge bewirken eigentlich nur geringe Beanspruchungen der Isolierungen des 380-kV Netzes. Aus diesem Grund wird das 65-kV-Netz nur vereinfacht bis UW Mörel und UW Ulrichen nachgebildet. Es wird wie beim 380-kV-Netz als eine dreipolige Ersatzspannungsquelle modelliert. Der Sternpunkt der Primärseite der 65-kV-Transformatoren wird direkt geerdet. Der dreipolige Anfangskurzschlussstrom I_{K3}'' liegt zwischen 1,4...4,6 kA, und der einpolige Anfangskurzschlussstrom I_{K1}'' wird ebenfalls zu 80% von I_{K3}'' angenommen. Bei Vernachlässigung des ohmschen Anteils betragen die Kurzschlussimpedanzen :

$$\underline{Z}_{k1\max} = jX_{k1\max} = \frac{U_{nN} \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot I_{K3\min}''} = j \frac{65 \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot 1,4} = j29,49 \Omega$$

$$\underline{Z}_{k0\max} = jX_{k0\max} = \frac{3 \cdot U_{nN} \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot I_{K1\min}''} - 2 \cdot \underline{Z}_{k1\max} = j \left(\frac{3 \cdot 65 \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot 1,4 \cdot 0,8} - 2 \cdot 29,49 \right) = j51,6 \Omega$$

$$\underline{Z}_{k1\min} = jX_{k1\min} = \frac{U_{nN} \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot I_{K3\max}''} = j \frac{65 \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot 4,6} = j8,97 \Omega$$

$$\underline{Z}_{k0\min} = jX_{k0\min} = \frac{3 \cdot U_{nN} \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot I_{K1\max}''} - 2 \cdot \underline{Z}_{k1\min} = j \left(\frac{3 \cdot 65 \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot 4,6 \cdot 0,8} - 2 \cdot 8,97 \right) = j15,71 \Omega$$

Für die Berechnung der Überspannungen auf den Kabelleitern wird die maximale Kurzschlussimpedanz verwendet. Zur Berechnung der Überspannungen auf den Kabelschirmen wird die minimale Kurzschlussimpedanz benutzt, wodurch die jeweils ungünstigsten Fälle erfasst werden.

2.1.3 Modellierung des Freileitungssystems

Zur Modellierung des betrachteten Freileitungssystems werden die Leitungsparameter anhand der bekannten Daten mithilfe des im ATP-EMTP integrierten Hilfsprogramms LINE CONSTANTS (LC) berechnet. LC benötigt als Eingabe die Geometrie von Masten und die Seildaten. Der in Abb.3 gezeichnete Tragmast wird einheitlich zur Modellierung aller Freileitungen verwendet.

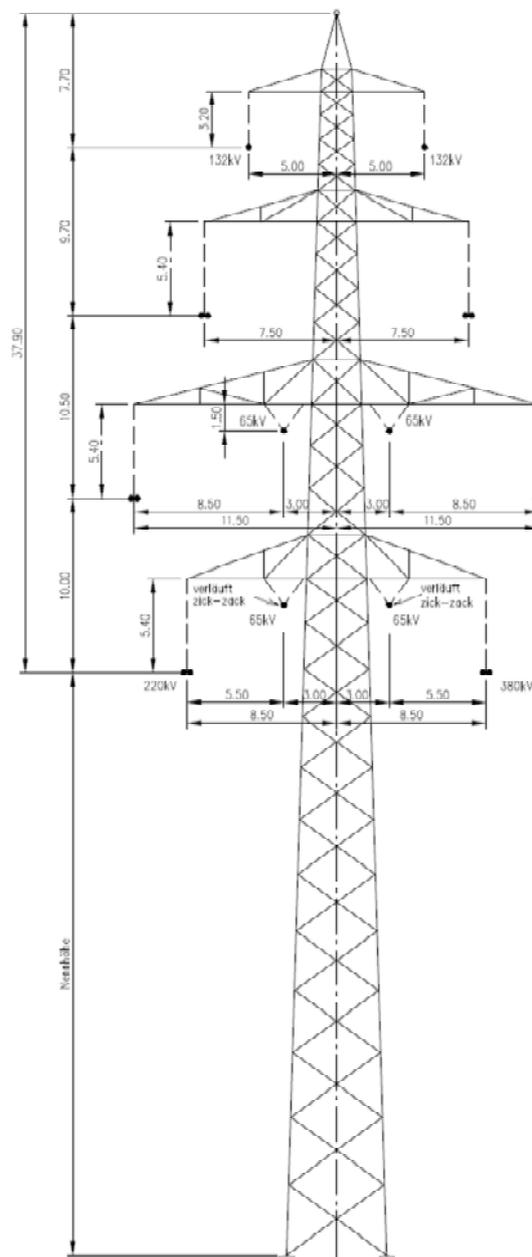


Abbildung 3 Tragmast zur Nachbildung des Freileitungssystems

. Die verwendeten Seildaten sind:

- 380-kV: 2 Stränge mit 2 x 800 mm² Aldrey,
- 65-kV: 1 Strang mit 1 x 600 mm² Aldrey und
- Erdseil: 50 mm² Aldrey

Der spezifische Bodenwiderstand wird zu 100 Ω m angenommen. Das Freileitungssystem wird in dieser Studie für alle transiente Berechnungen mithilfe des frequenzabhängigen Wanderwellenmodells *JMarti*-Modell modelliert.

2.1.4 Modellierung des Kabelsystems

Das 380-kV Kabel mit der Bezeichnung (N)2XS(FL)2Y 1x2500 RMS/180 380/220 kV und das 65-kV Kabel mit der Bezeichnung NA2XS(FL)2Y 1x2000 RE/50 65/37,5 kV werden mithilfe des im ATP-EMTP integrierten Hilfsprogramms CABLE CONSTANTS (CP) modelliert. CP benötigt als Eingaben die Abmessungen der Kabel, die elektrischen Eigenschaften von Leiter, Schirm, Isolierung, Außenmantel, die Bodeneigenschaften sowie Verlegungsart und -tiefe. Anhand der bekannten Daten aus den Datenblättern der Kabelfirma nkt cables werden die verwendeten Daten in Tab.1 zusammengefasst.

Parameter		380-kV Kabelsystem	65-kV Kabelsystem
Leiterdurchmesser	mm	60,9	54,5
Isolierungsdicke Inklusive innerer- und äußerer Leiterschicht	mm	26	14
Schirmquerschnitt	mm ²	180	50
Außendurchmesser	mm	138	103
Spezifische Widerstand von Leiter	Ω·m	1.7241e-8	1.7241e-8
Spezifische Widerstand von Schirm	Ω·m	1.7241e-8	1.7241e-8
Rel. Permittivität der Leiterisolierung		2,3	2,3
Rel Permittivität der Schirmisolierung		2,3	2,3
Schirmbehandlung		Einseitige Erdung	

Anzahl der Systeme		4	1
Länge jedes Unterabschnittes	m	1000	
Kabelverlegung		Tunnel entspricht Abb.1	
Erdungswiderstand der Übergangsbauwerk	Ω	0,4	
Spezifischer Erdwiderstand	$\Omega \cdot m$	100	

Tabelle 1 Kenndaten der Kabelsysteme

Das CP-Programm ermöglicht die Nachbildung der in Abb.1 dargestellten Tunnelanordnung als *Pipe-Type Cable* (Kabel in einem Rohr). Die Zuordnung der Kabelanschlüsse in ATPDraw wird in Abb. 4 dargestellt.

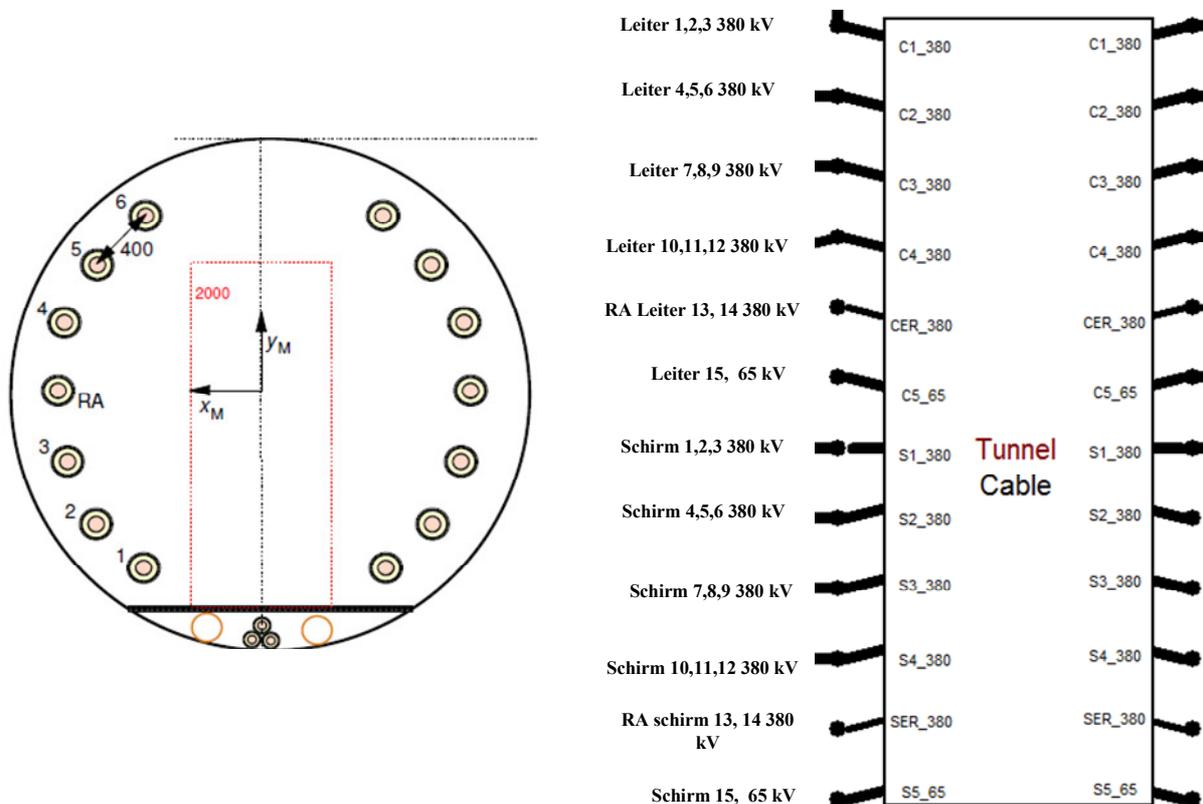


Abbildung 4 Nachbildung der Tunnel-Kabelanlage im ATPDraw

Abhängig von der Art der Berechnung werden die Kabel mithilfe des Wanderwellenmodells Bergeron-Modell und der mehrpoligen π -Glieder modelliert.

3. Schaltvorgänge

Das Ein- und Ausschalten von Leitungen kann abhängig von der Art der Netzschaltungskonfiguration (z.B. die Netzanschlussleistung, die Leitungsparameter, die Längen von Freileitungs- und Kabelstrecken, mit oder ohne Kompensationsdrosseln) zu großen transienten oder zeitweilig langsam gedämpften Überspannungen sowie Überströmen führen. Als Ursprung für Überspannungen und Überströme bei den betrachteten Kabelstrecken werden folgende Schaltvorgänge näher untersucht:

- Einschalten von leerlaufenden Freileitungs- und Kabelstrecken,
- Wiedereinschalten der bereits geladenen Leitungen,
- Ausschalten von leerlaufenden Freileitungs- und Kabelstrecken,
- Einpoliger Erdkurzschluss

Wegen der relativ kurzen Strecken werden keine Kompensationsdrosseln für die zu untersuchende Zwischenverkabelung vorgesehen. Die Besonderheiten beim Zuschalten von kompensierten Leitungen wie Verlust des Stromnulldurchgangs und Resonanz werden bei der vorliegenden Zwischenverkabelung nicht auftreten. Eine Beschreibung der besonderen Vorgänge bei kompensierten Kabelstrecken findet man in [1].

Zur Beurteilung von Überspannungen gilt für die 380-kV Anlagen nach IEC 62067 die Bemessungsschaltstoßspannung $U_{ms} = 1050 \text{ kV}$. Die PE-Mäntel von VPE-Kabeln werden vor allem für den mechanischen Schutz entworfen. Es wird keine Bemessungsschaltstoßspannung für Schirmisolierungen und Muffen-Isolierungen festgelegt. Nach Angabe von Kabelherstellern beträgt die Bemessungsblitzstoßspannung von PE-Mäntel mehr als 50 kV, und die Bemessungsstoßspannung kann als 80% der Bemessungsblitzstoßspannung angenommen werden. Es wird jedoch empfohlen, die genaue Grenze mit den Herstellern abzustimmen.

Im modellierten Netz nach Abb.2 wird aus Gründen der Übersichtlichkeit nur eine begrenzte Anzahl von Varianten mit den höchsten Überspannungen bewertet. Um den Unterschied der Kabelstrecke zur Freileitung zu verdeutlichen, werden die Berechnungen für eine Variante mit der geplanten Kabelstrecke und eine Variante mit reiner Freileitung ohne Kabelstrecke durchgeführt.

3.1 Spannungserhöhungen der leerlaufenden Freileitungs- und Kabelstrecke

Die Schaltüberspannung auf einer leerlaufenden Leitung resultiert aus einem transienten Teil wegen der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen Leitungs-Induktivitäten und Kapazitäten und einem stationären Teil durch den Ferranti-Effekt. Wenn UW Chippis als Anschlussseite betrachtet wird, so wird die maximale stationäre Spannungserhöhung am Ende der Leitung im UW Larvogo erwartet, da dies der größten Leitungslänge von 121,3 km entspricht. Bezogen auf die Spannungen am Leitungsanfang in der UW Chippis ist die Spannungserhöhung nicht nennenswert. Sie beträgt max. 1,8% bei der Variante mit Kabelstrecke und 1,2% bei der reinen Freileitung. Wegen der großen Kapazitäten der Kabel wird die stationäre Spannung im Leerlauf leicht erhöht.

	mit Kabelstrecke	reine Freileitung
Spannungserhöhung (%)	1,8	1,2

Tabelle 2 Stationäre Spannungserhöhungen auf der leerlaufenden Leitung

3.2 Einschalten der leerlaufenden Freileitungs- und Kabelstrecke

Der Einschaltzeitpunkt wird mithilfe einer statistischen Analyse bestimmt. Die Pole des Leistungsschalters schließen in der Regel nicht gleichzeitig. Es wird beim Einschalten eine Gleichlaufdifferenz von maximal 5 ms angenommen. Die Streuung der Einschaltaugenblicke erfolgt nach einer Normalverteilung. Der erste zu schließende Schalterpol wird in einem Zeitintervall von einer halben Periode (10 ms) geschaltet. Die anderen Pole folgen dem ersten Schalterpol in einem Zeitintervall von 5 ms nach einer Normalverteilung. Insgesamt werden jeweils 200 Simulationen des Einschaltvorgangs mit stochastisch bestimmten, unterschiedlichen Einschaltzeiten der Schalterpole durchgeführt. Der Überspannungsfaktor k ist wie folgt definiert:

$$k = \frac{\frac{|\hat{u}|}{\sqrt{2} \cdot 380kV}}{\sqrt{3}} = \frac{|\hat{u}|}{310,269kV}$$

Zur Berechnung der Einschaltüberspannungen bei einem Doppel-Freileitungssystem werden die folgenden zwei Fälle betrachtet:

- Fall 1: Es wird zuerst das erste Einfachsystem eingeschaltet und das parallele System ist noch nicht eingeschaltet,
- Fall 2: Es wird dann das zweite Einfachsystem eingeschaltet, wobei das parallele System sich im stationären Betrieb befindet.

Das gleichzeitige Einschalten des leerlaufenden Doppelsystems kann theoretisch zu noch höherer Überspannung führen. Es tritt allerdings im Verbundnetz nur mit geringer Wahrscheinlichkeit auf und wird daher in dieser Studie nicht betrachtet

3.2.1 Einschalten des leerlaufenden Einfachsystems

Entsprechend der Ergebnisse im Kap.3.1 wird das Einschalten der Freileitungs- und Kabelstrecke von der Seite UW Chippis vorgenommen. Die Leitungen befinden sich im Leerlauf am Ende der UW Larvogon und UW Innertkirchen, und das 65-kV-Netz befindet sich im normalen Betrieb. Die Schaltung lässt sich prinzipiell nach Abb.5 darstellen.

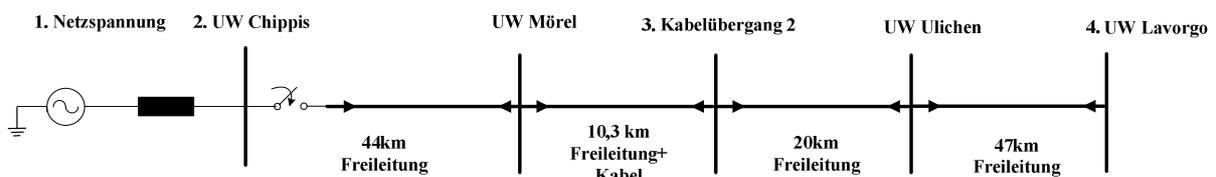


Abbildung 5: Prinzipielle Schaltung zur Simulation der Einschaltvorgänge

Abb. 6 zeigt die statistische Auswertung der Einschaltüberspannungen. Die y-Achse in Abb. 6 gibt für einen bestimmten Überspannungsfaktor k_1 die Anzahl der Fälle in Prozent wieder, in denen Überspannungsfaktoren $k \geq k_1$ auftreten.

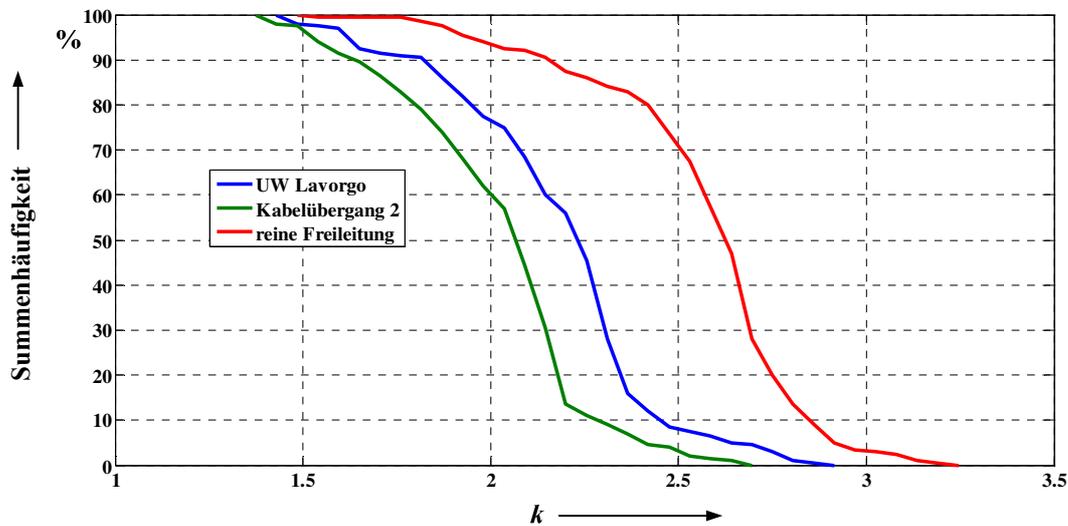


Abbildung 6: Statistische Verteilung des Überspannungsfaktors am Ende der Leitung im UW Lavorgo und am Kabelübergang 2

Aus Abb. 6 ist zu entnehmen:

- Die höchste Einschaltüberspannung auf den Kabelstrecken, die mit 2% Wahrscheinlichkeit auftritt, beträgt 785 kV und ist ungefähr das 2,53-fache der Nennscheitelspannung (310,27 kV).
- Die höchste 2%-Einschaltüberspannung am Leitungsende im UW Lavorgo beträgt ca. 862 kV und ist ungefähr das 2,78-fache der Nennscheitelspannung.
- Die Einschaltüberspannungen liegen somit deutlich unter der Bemessungsstoßspannung von 1050 kV.
- Die höchste transiente Einschaltüberspannung bei reiner Freileitung ist höher als bei der Zwischenverkabelung. Die 2%-Einschaltüberspannung am Leitungsende im UW Lavorgo beträgt in diesem Fall ca. das Dreifache der Nennscheitelspannung. Der Grund: einlaufende Spannungswellen werden am Übergang von Freileitung zu Kabel durch den Brechungsfaktor $b = \frac{2 \cdot Z_{wK}}{Z_{wF} + Z_{wK}}$ herabgesetzt und auf der Kabelstrecke weiter gedämpft.

Exemplarisch werden die zeitlichen Verläufe der Einschaltüberspannungen für den schlimmsten Einschaltzeitpunkt am Leitungsende im UW Lavorgo in Abb.6 und am Kabelübergang 2 in Abb.7 gezeigt.

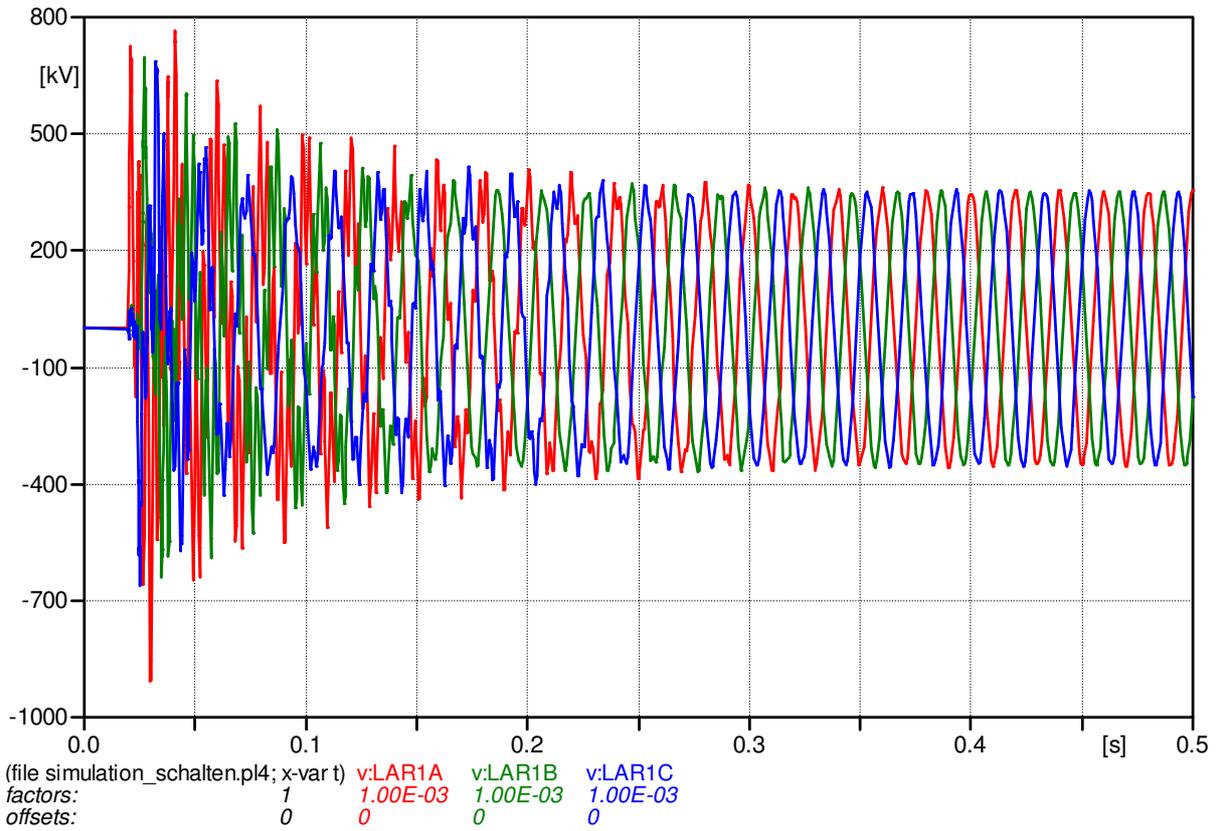


Abbildung 7: Verläufe der Leiter-Erde-Spannungen am Leitungsende im UW Lavorgo (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

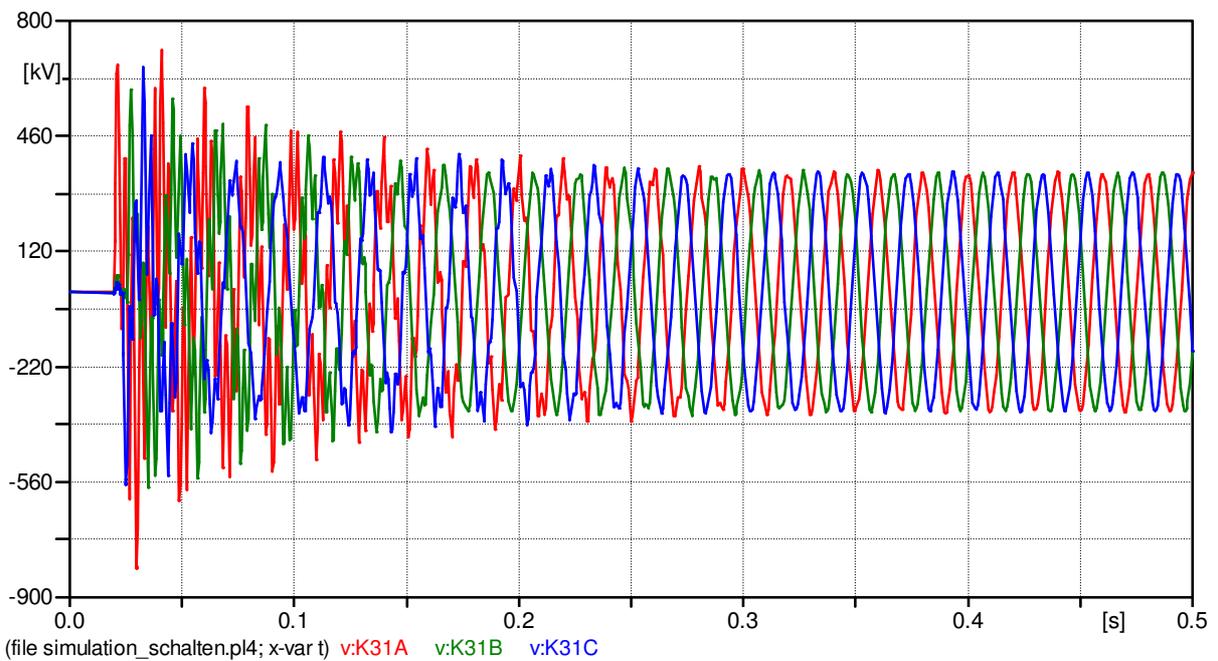


Abbildung 8: Verläufe der Leiter-Erde-Spannungen am Kabelübergang 2 (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

Eine Gegenüberstellung der Überspannungen für die Phase R an den verschiedenen Orten wird in Abb.9 für die Zwischenverkabelung und in Abb.10 für die reine Freileitung (auch in den ungünstigsten Einschaltzeitpunkten) dargestellt.

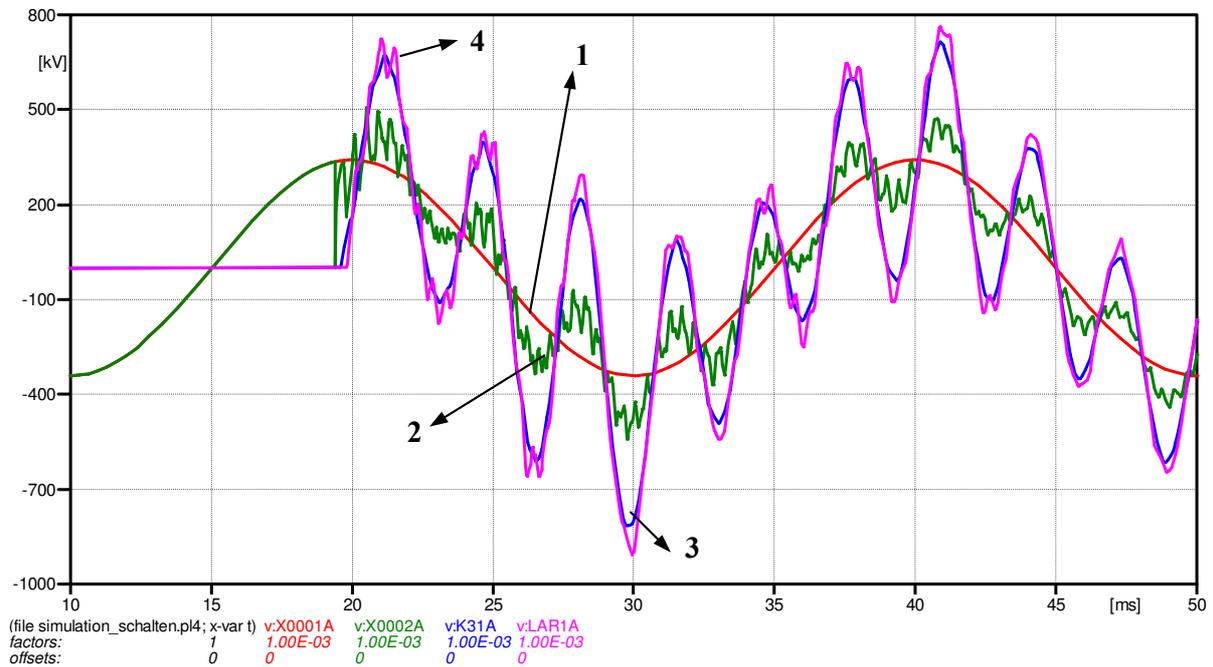


Abbildung 9: Verläufe der Überspannung (Phase R) an den verschiedenen Orten bei Zwischenverkabelung: 1-Netzspannung, 2-UW Chippis, 3-Kabelübergang 2 und 4-UW Lavorgo

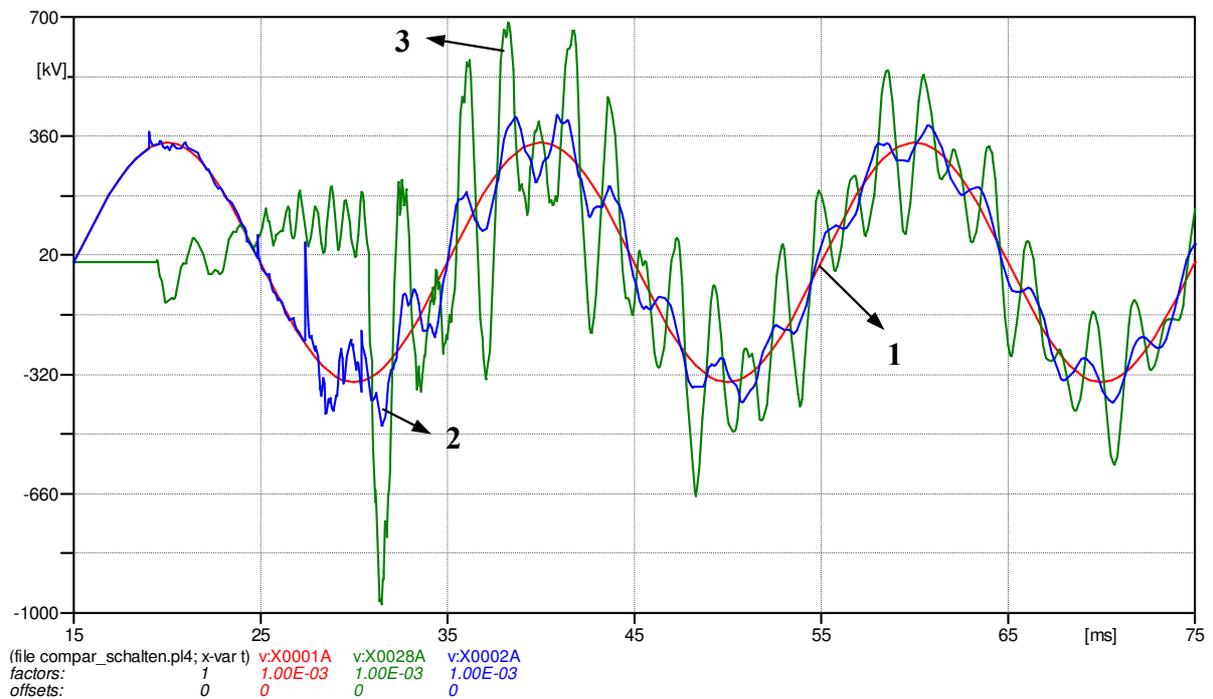


Abbildung 10: Verläufe der Überspannung (Phase R) an den verschiedenen Orten bei reiner Freileitung: 1-Netzspannung, 2-UW Chippis, 3-UW Lavorgo

Für das Einschalten der leerlaufenden Leitung lässt sich die Grundresonanzfrequenz der Leitung wie folgt ermitteln:

$$f = \frac{\text{Geschwindigkeit der Wanderwelle}}{4 \cdot \text{Leitungslänge}}$$

Für eine ideale Freileitung mit einer Wellengeschwindigkeit von 299,79 m/μs liegt diese Frequenz ungefähr bei 625 Hz. Aufgrund der Verkabelungen, der mehrfach gekoppelten Leitungseile und der unterschiedlich einschaltenden Schalterpole wird diese Frequenz auf ungefähr 400 Hz reduziert.

Die Einschaltströme am Leitungsanfang im UW Chippis werden in Abb.11 dargestellt. Der maximale Strom beträgt c.a. 2342 A und ist fast in gleicher Grössenordnung wie der zulässige Betriebsstrom. Die Einschaltströme stellen daher keine außergewöhnliche Strombelastung für die Leistungsschalter und andere Betriebsmittel dar.

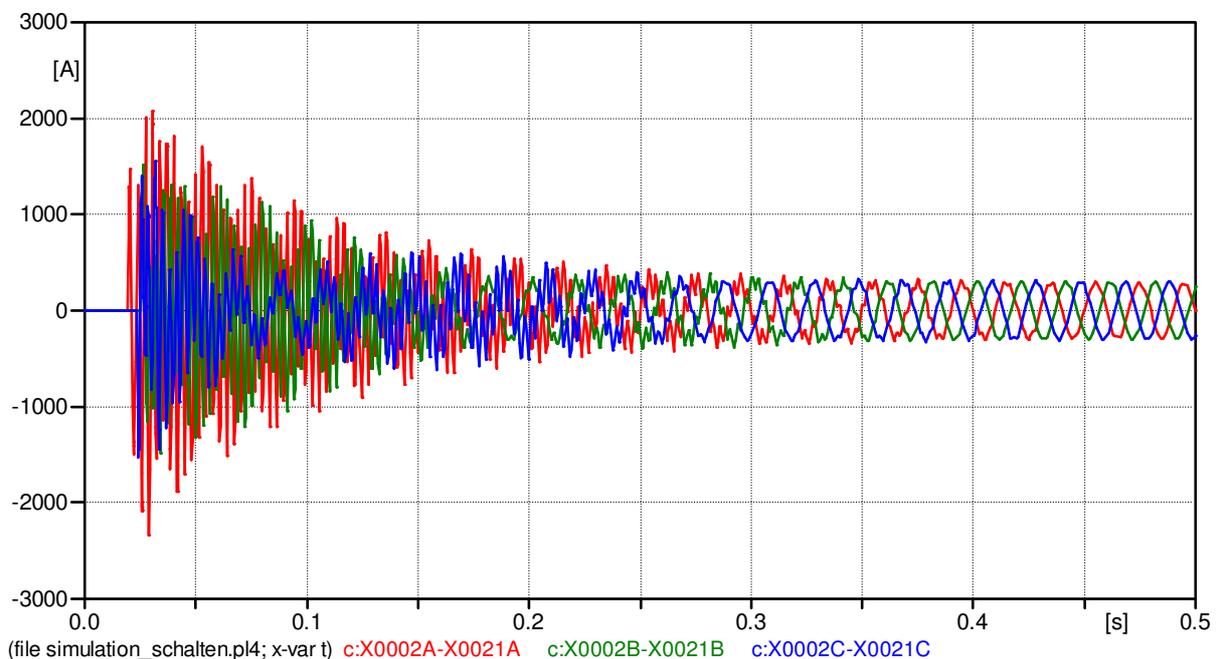


Abbildung 11: Einschaltströme am Leitungsanfang im UW Chippis (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

Die maximalen Schirmspannungen treten im ersten Unterabschnitt auf der Seite des Kabelübergangs 1 auf. Die Verläufe der Schirmspannungen werden in Abb. 12 dargestellt. Der Höchstwert der Schirmspannungen beträgt ca. 4151 V und stellt somit keine kritische Belastung der Schirmisolierung dar.

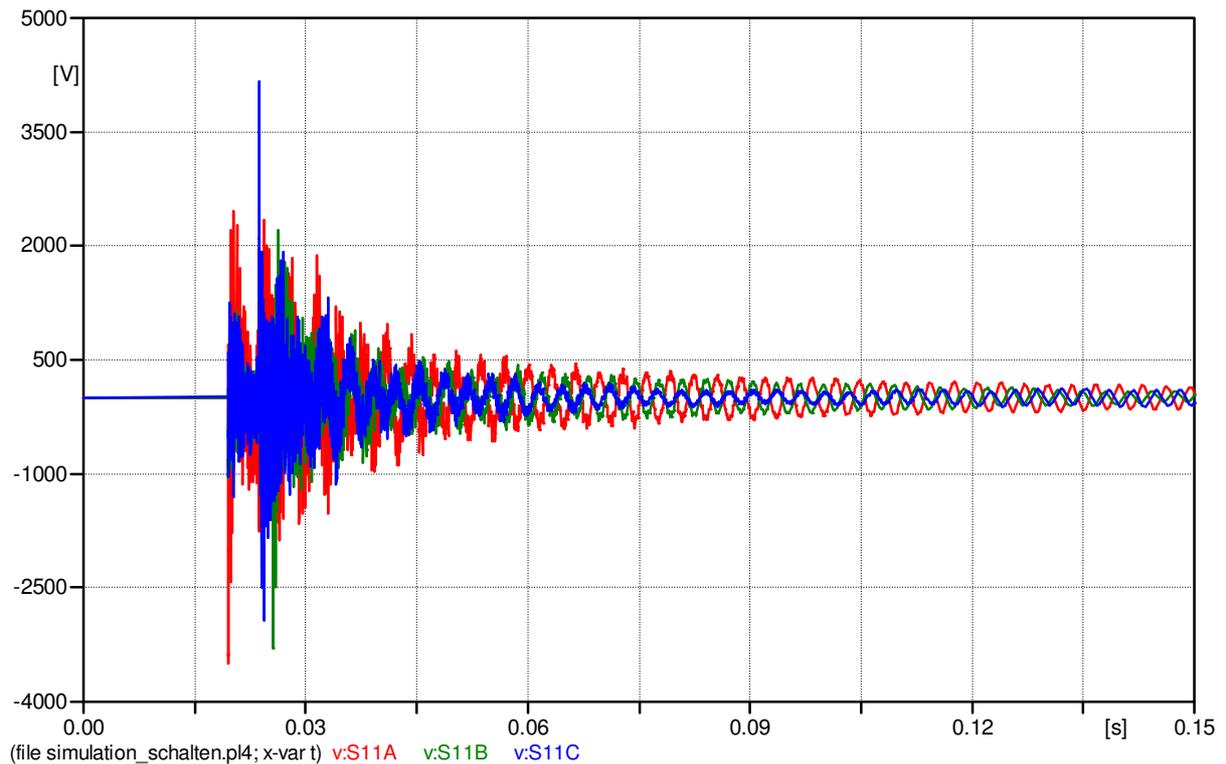


Abbildung 12: Schirmspannungen am ersten Unterabschnitt auf der Seite des Kabelübergangs 1 (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

Abb. 13 zeigt die induzierten Spannungen auf den Reservekabeln. Wegen des coaxialen Aufbaus sind sie für die Leiter und für die Schirme gleichgross.

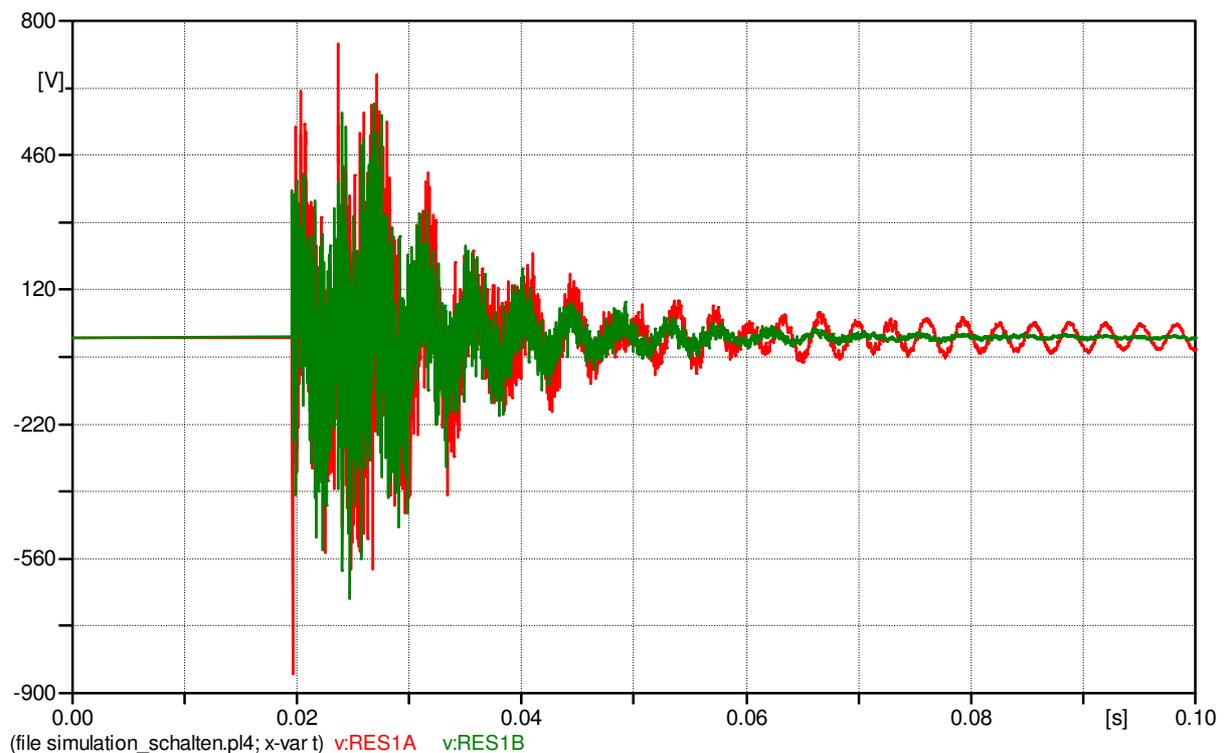


Abbildung 13: Induzierte Spannungen am ersten Unterabschnitt der Reservekabel (Reservekabel 1 - Rot, Reservekabel 2 - Grün)

Der Einfluss des Einschaltvorgangs eines 380-kV-Systems auf das 65-kV-System wird in Abb.14 und Abb. 15 dargestellt. Abb.14 zeigt die Spannungen der 65-Kabel am Kabelübergang 2, und Abb.15 zeigt die Schirmspannungen der Kabel. Diese Spannungen stellen keine außergewöhnlichen Belastungen für die 65-kV-Kabel dar.

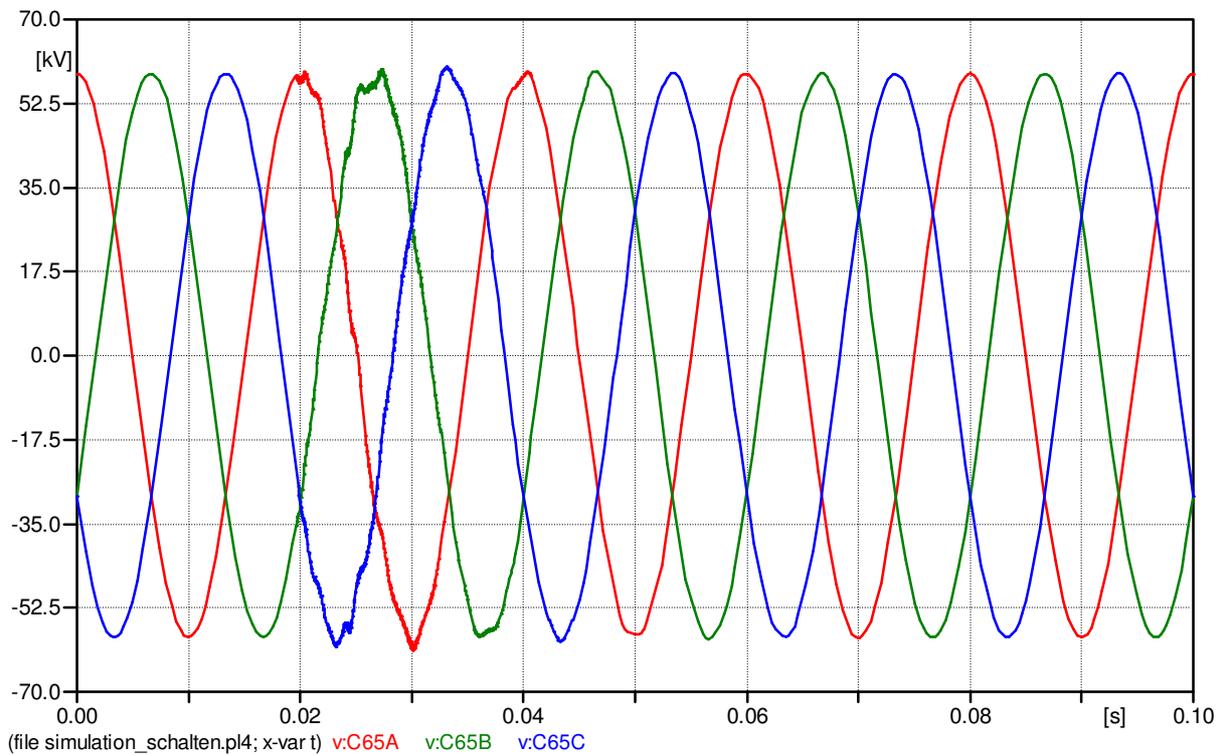


Abbildung 14: Leiter-Erde-Spannungen der 65-kV-Kabel am Kabelübergang 2 während des Einschaltvorgangs (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

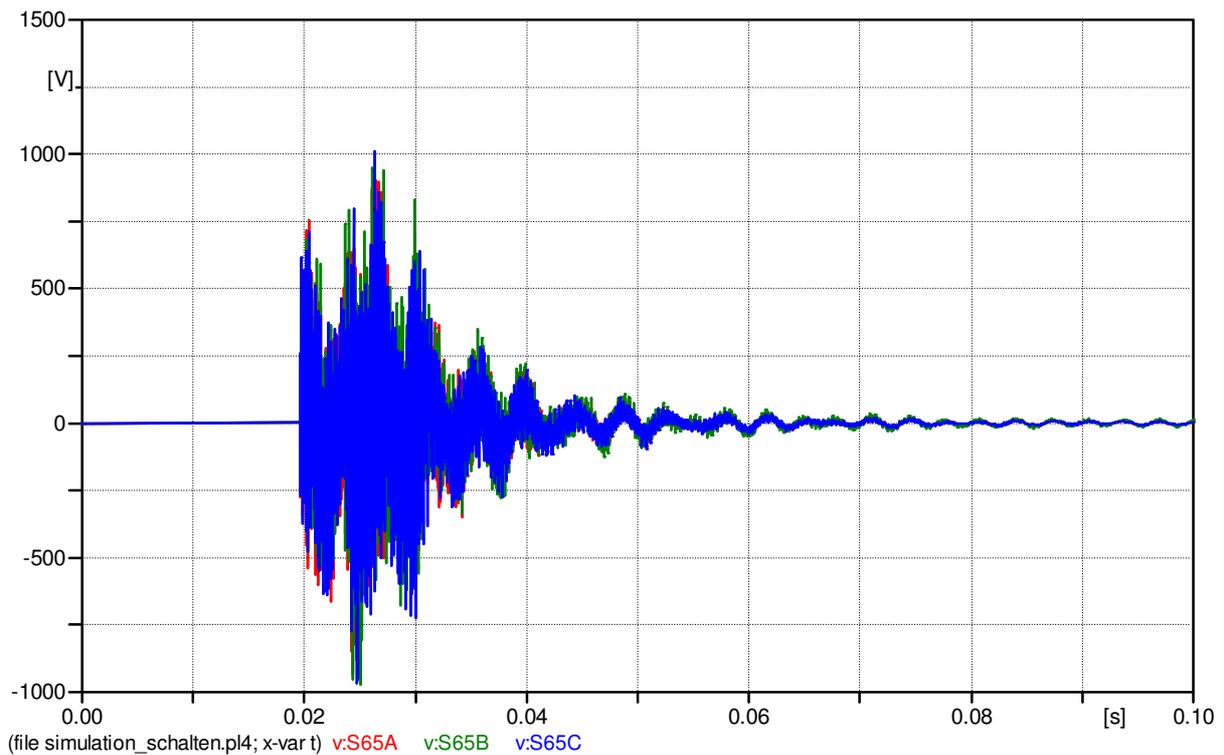


Abbildung 15 Schirmspannungen der 65-kV-Kabel am ersten Unterabschnitt auf der Seite des Kabelübergangs 1 (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

3.2.2 Einschalten bei parallel in Betrieb befindlicher Freileitungs- und Kabelstrecke

Ein Kabel verhält sich wie eine verteilte Kapazität. Das Einschalten paralleler langer Kabelstrecken ist daher vergleichbar mit dem Einschalten parallel in Betrieb befindlicher Kondensatorbänke, bei denen sehr große Inrush-Ströme auftreten könnten. Bezüglich dieses Aspektes wurden ähnlichen Berechnungen wie beim letzten Kapitel für die Schaltung in Abb.16 durchgeführt.

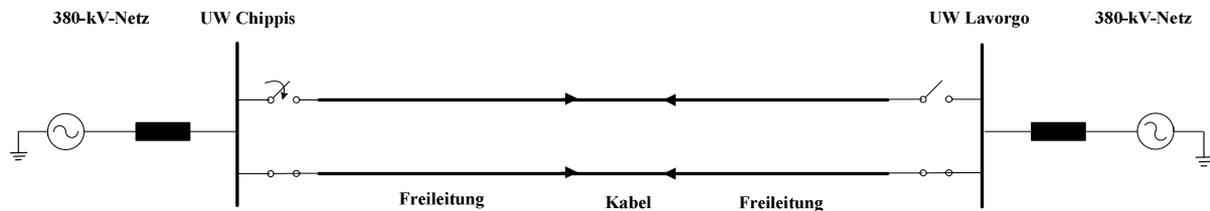


Abbildung 16: Prinzipielle Schaltung zur Simulation der Einschaltvorgänge bei parallel in Betrieb befindlicher Freileitungs- und Kabelstrecke

Wegen der relativen kurzen Kabelstrecken treten keine große Inrush-Ströme auf. Abb. 17 zeigt die Verläufe der Inrush-Ströme im UW Chippis. Der maximale Strom ist leicht auf ca. 2720 A erhöht.

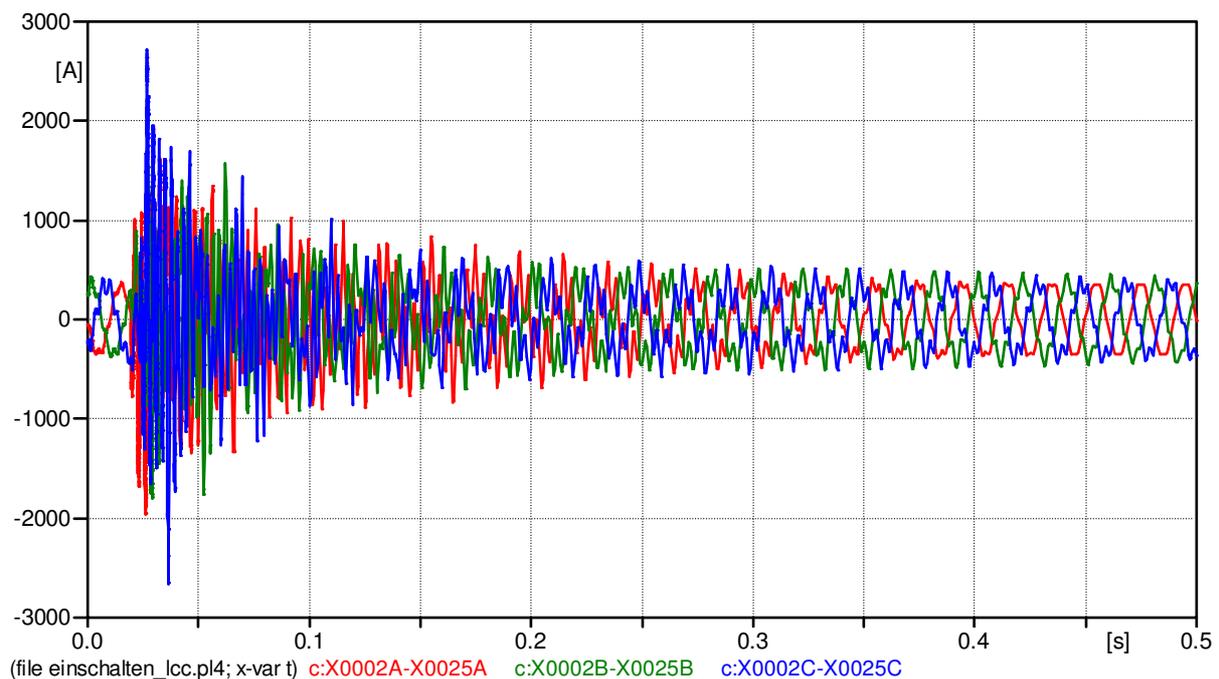


Abbildung 17: Einschaltströme am Leitungsanfang im UW Chippis (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

Die Einschaltüberspannungen auf den Leitern sind auch vergleichbar mit den Ergebnissen im Kap.3.2.1. Die Überspannungen auf den Schirmen sind jedoch wegen der vollständigen Verkopplung aller 12 Kabel erheblich auf ca. 23 kV erhöht. Trotzdem stellen sie keine gefährliche Belastungen für die Schirmisolierung dar.

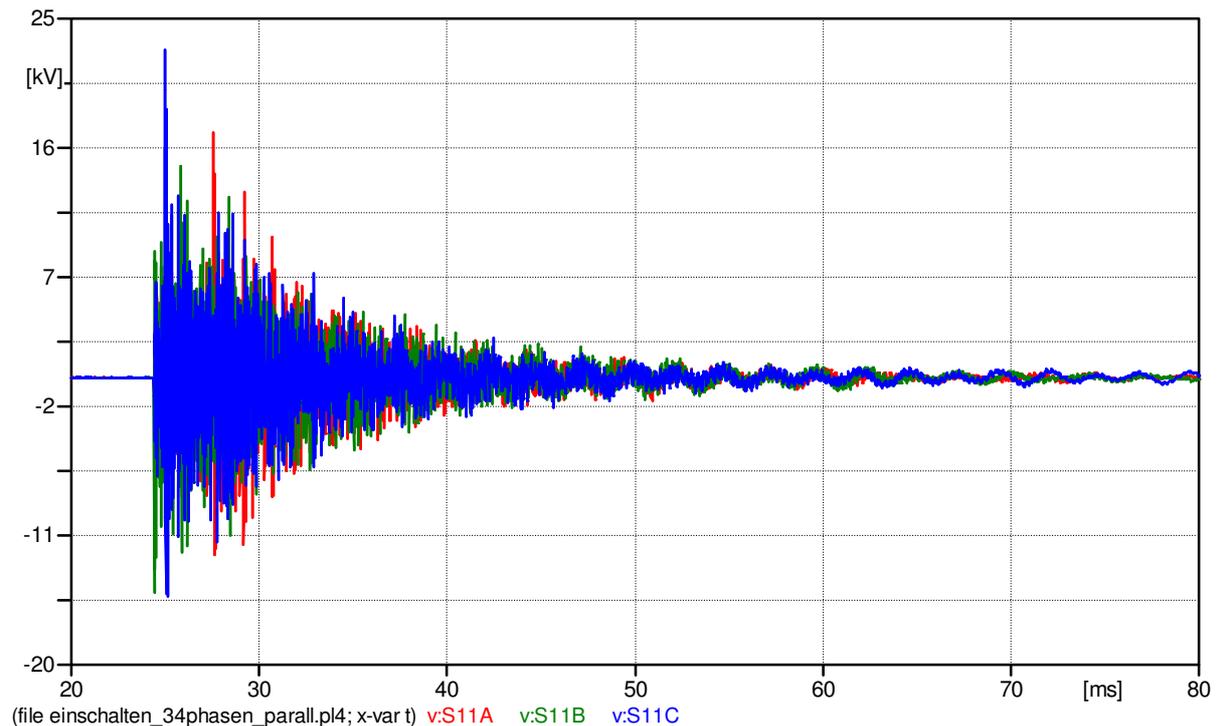


Abbildung 18: Schirmspannungen am ersten Unterabschnitt auf der Seite des Kabelübergangs 1 (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

Die Einflüsse auf die Reservekabeln und auf die 65-kV-Kabel sind dementsprechend auch vergrößert, jedoch werden die Grenzwerte weiter unterschritten. Exemplarisch zeigen Abb. 19 und Abb.20 die Beeinflussungen auf den 65-kV-Kabeln.

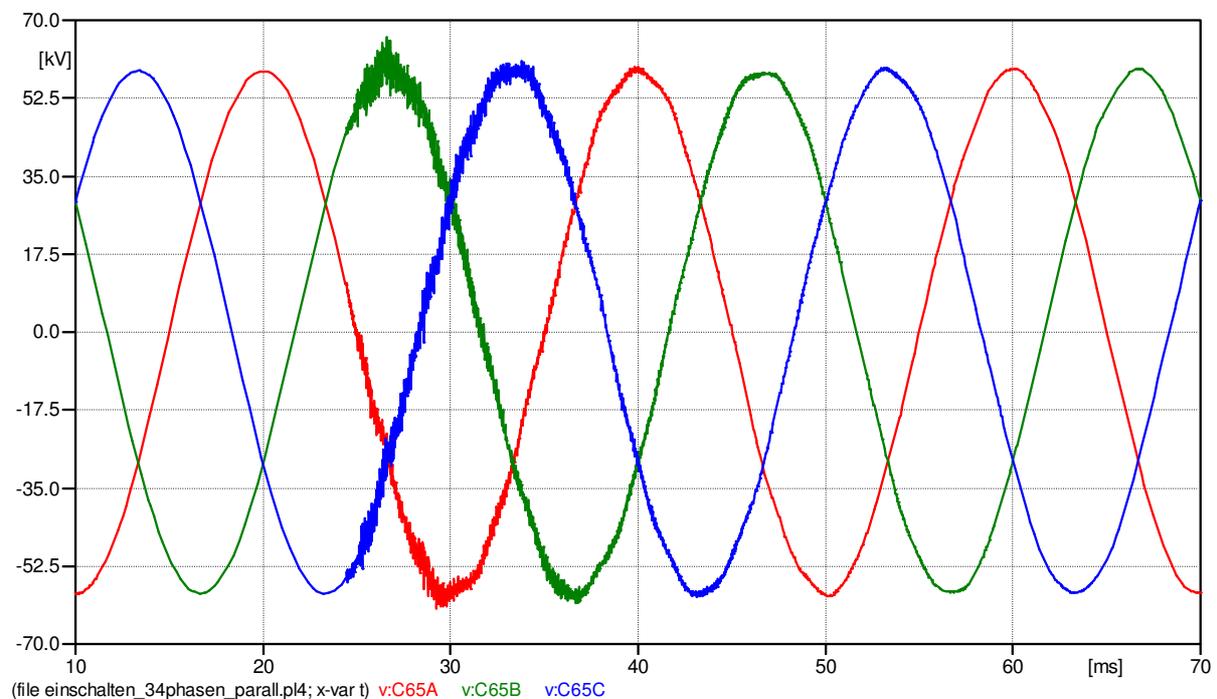


Abbildung 19: Spannungen der 65-kV-Kabel am Kabelübergang 2 während des Einschaltvorgangs (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

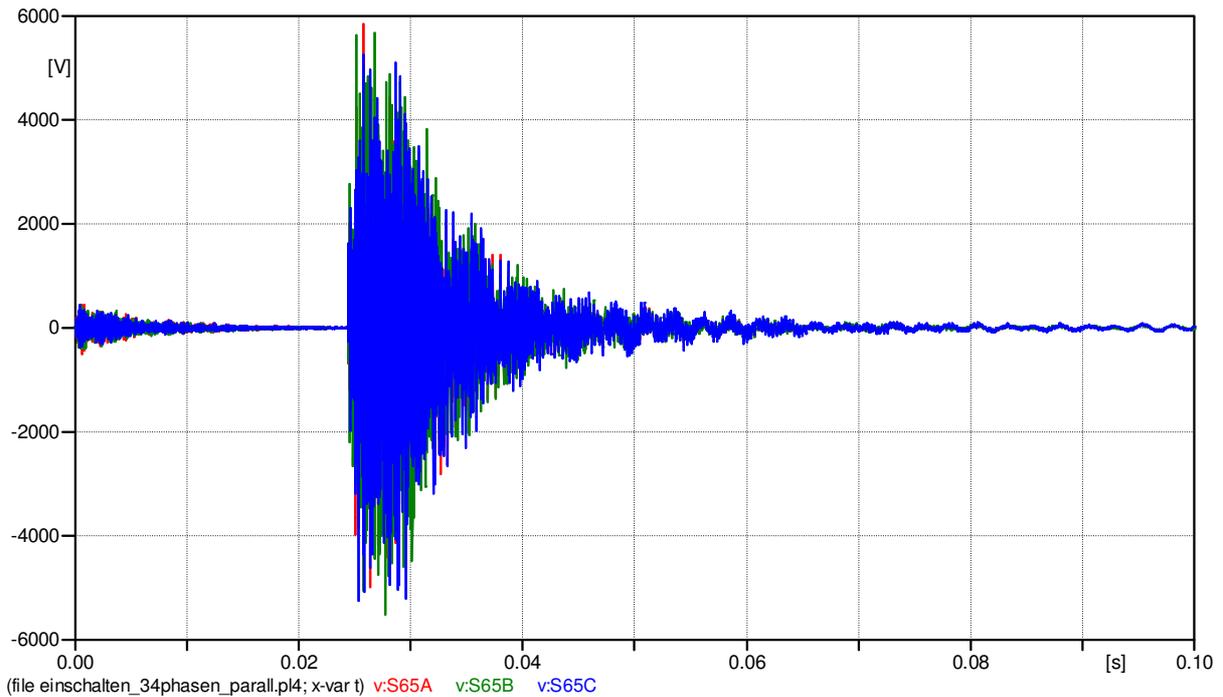


Abbildung 20: Schirmspannungen der 65-kV-Kabel am ersten Unterabschnitt von der Seite des Kabelübergangs 1 (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

3.3 Synchrones Schalten

Das transiente Einschwingen bei Einschaltvorgängen kann unterdrückt werden, wenn die Leistungsschalter durch Steuergeräte im geeigneten Zeitpunkt eingeschaltet werden. Ideal ist ein Schalten aller drei Pole im Nulldurchgang der Spannung. Die Überspannungen sowie die Überströme können dadurch deutlich reduziert werden, vergl. Abb. 22 und Abb. 23.

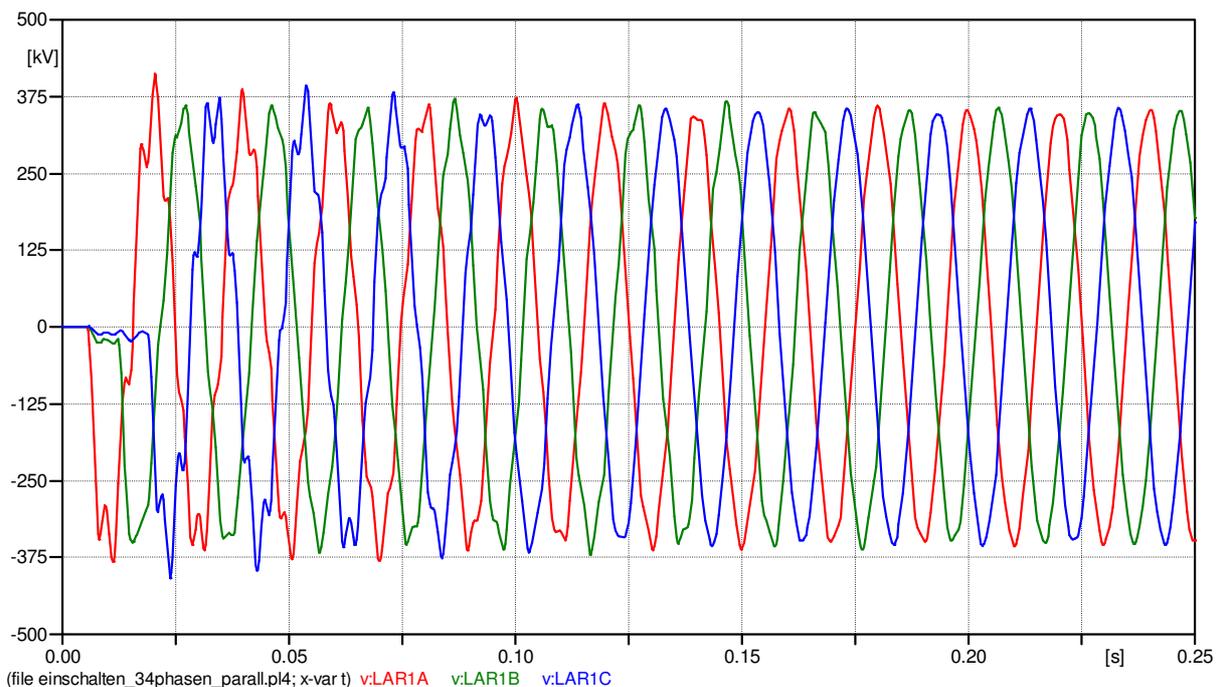


Abbildung 21: Verläufe der Leiter-Erde-Spannungen am Leitungsende im UW Lavorgo beim synchronen Schalten (R-Rot, S-Grün, T-Blau); Vergleich mit Abb.7

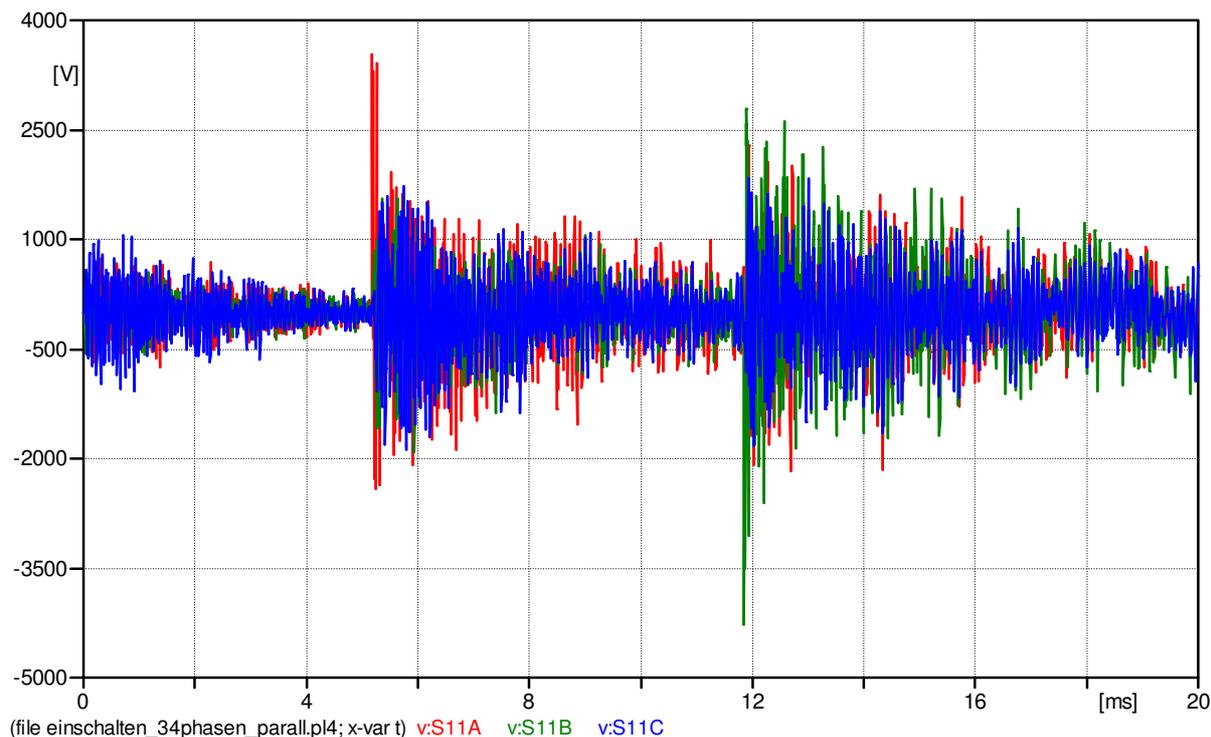


Abbildung 22: Schirmspannungen beim synchronen Schalten am ersten Unterabschnitt auf der Seite des Kabelübergangs 1 (R-Rot, S-Grün, T-Blau). Vergleich mit Abb. 18

3.4 Ausschalten von leerlaufenden Freileitungs- und Kabelstrecken

Erhebliche Schaltüberspannungen können bei Ausschalten langer leerlaufender Kabel auftreten, wenn die Schaltstrecke ein- oder mehrmalig wieder zündet. Strenge Anforderungen müssen deshalb bei der Auswahl der Schalter zum Ausschalten von kapazitiven Strömen berücksichtigt werden, damit die Schalterstrecke sich schnell verfestigt und keine Neigung zum Rückzünden besteht. Leistungsschalter mit kapazitivem Schaltvermögen nach IEC 62271 beherrschen diese Überspannungen bis zur ihrem Bemessungs-Ausschaltstrom. Für 400 kV-Anlagen beträgt der Bemessungs-Ausschaltstrom 400 A. Wegen der relativ kurzen Kabelstrecke beträgt der kapazitive Strom in den betrachteten Leitungen im Leerlauf nur ungefähr 220 A. Bei Verwendung moderner SF₆-Schaltgeräte ist eine Rückzündung daher nicht zu erwarten.

3.5 Wiedereinschalten der bereits aufgeladenen Leitungen

Hohe transiente Spannungen können beim Wiedereinschalten der aufgeladenen Leitungen auftreten, wenn ein Leiter bei Phasenopposition der netzseitigen Spannungen eingeschaltet wird. Die Leitung bleiben unter Spannung, wenn sie beidseitig vom Netz getrennt werden. Dieser Vorgang kann z.B. bei Verwendung einer Automatischen Wiedereinschaltung (AWE) für diese Zwischenverkabelung auftreten. Falls entlang der Leitung keine Querkomponenten, wie .B. induktive Spannungswandler, vorhanden sind, bleiben die Leiter lange Zeit geladen, da die Entladung nur über den Querleitwert der Leitung erfolgt. Abb.23 zeigt die Verläufe der Spannungen am Leitungsende im UW Lavorgo. Die Spannungen erreichen einen Spitzenwert von 1191 kV und überschreiten daher die Bemessungsstoßspannung von 1050 kV.

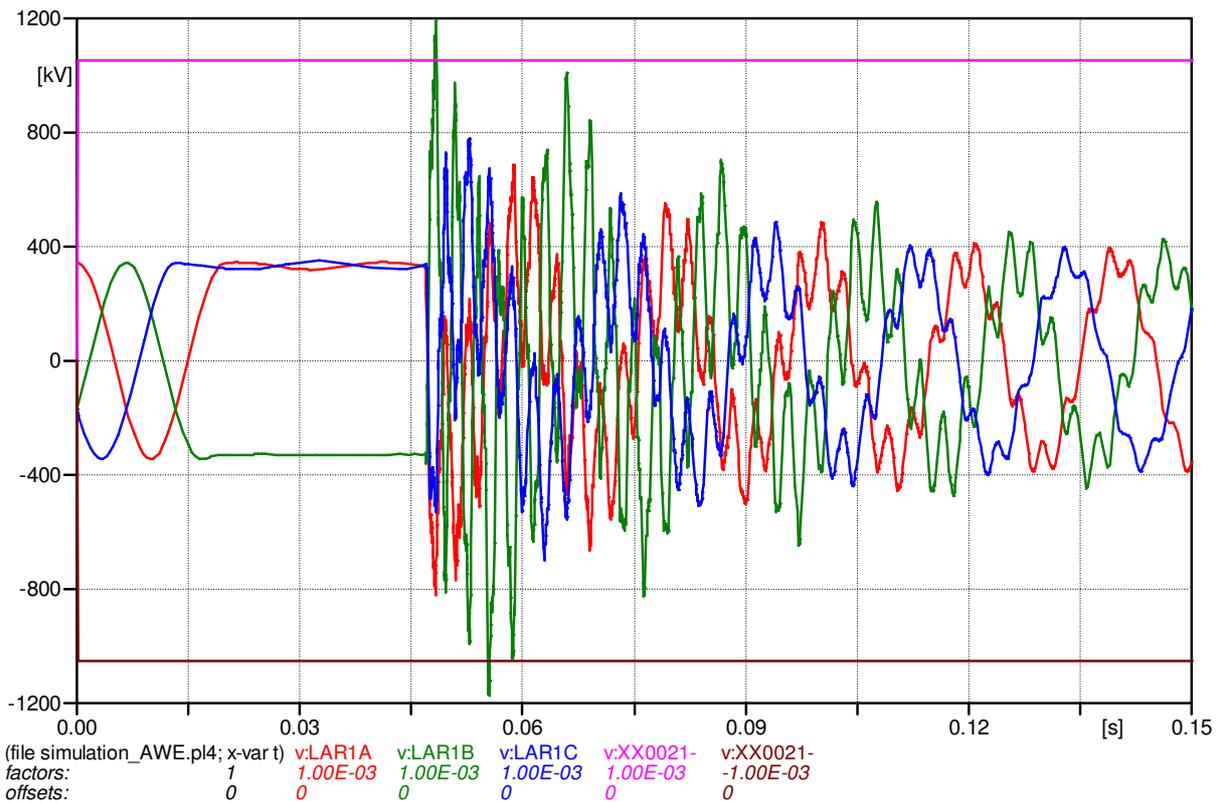


Abbildung 23: Verläufe der Leiter-Erde-Spannungen am Leitungsende im UW Lavorgo beim Wiedereinschalten (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

Die Verläufe der Überspannungen am Kabelübergang 2 werden in Abb. 24 dargestellt. Die maximale Spannung auf der Kabelstrecke beim Wiedereinschalten beträgt 984 kV und liegt somit immer noch unter der Bemessungsstoßspannung. Die maximale Schirmspannung tritt wie beim normalen Einschalten am ersten Unterabschnitt von der Einschaltseite auf und ist, wie in Abb.25 gezeigt, auch deutlich erhöht und erreichen einen Spitzenwert von 42 kV.

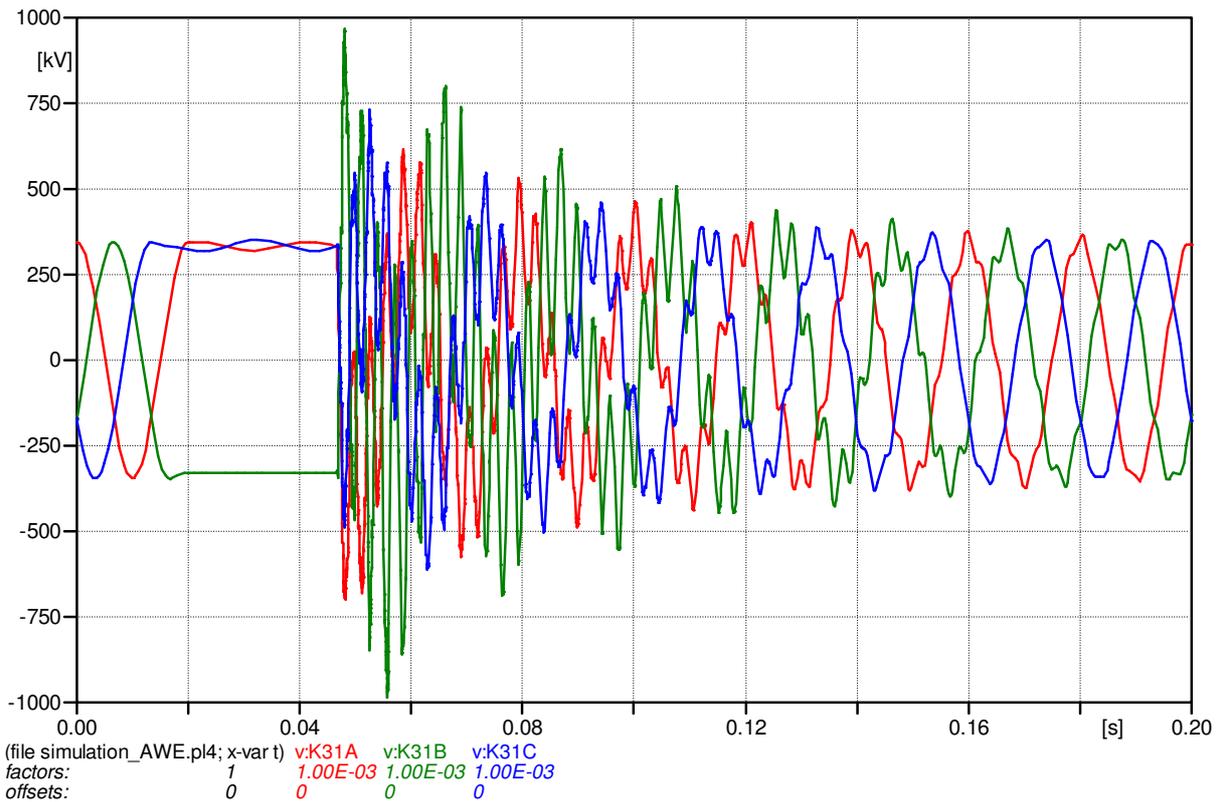


Abbildung 24: Verläufe der Leiter-Erde-Spannungen am Kabelübergang 2 beim Wiedereinschalten (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

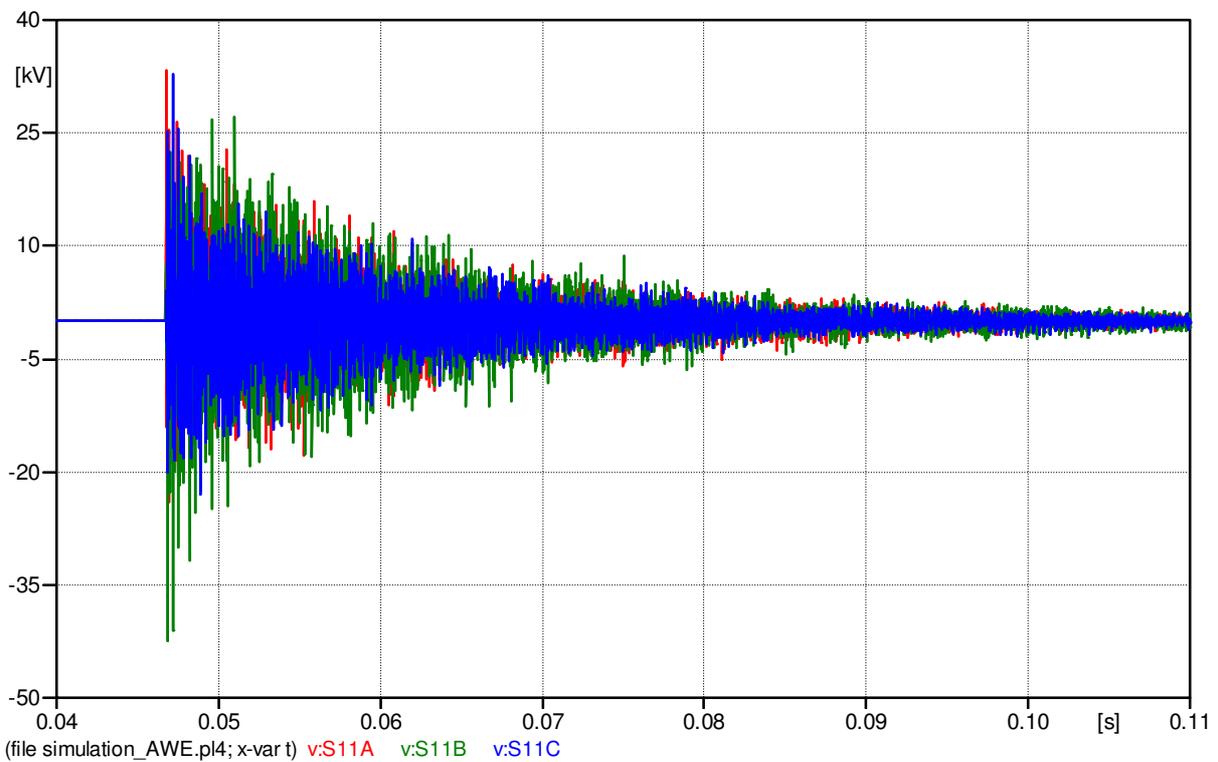


Abbildung 25: Schirmspannungen am ersten Unterabschnitt auf der Seite des Kabelübergangs 1 beim Wiedereinschalten (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

Beim ungünstigsten Wiedereinschalten wird daher der Einsatz von Überspannungsableitern zwingend notwendig. Die maximalen Überspannungen beim Einsatz von Überspannungsableitern an den beiden Kabelübergängen sowie an den Schirmtrennstellen werden in Tab. 3 zusammengefasst. Ihre Verläufe werden in Abb.26, Abb. 27 und Abb. 28 dargestellt. Demnach sind beim Einsatz von Überspannungsableitern alle auftretenden Spannungen als unkritisch zu bewerten.

Max. Überspannung	ohne Überspannungsableiter	mit Überspannungsableitern
am Leitungsende im UW Lavorgo	1191 kV	794 kV
am Kabelübergang 2	984 kV	693 kV
Schirm	42 kV	22 kV

Tabelle 3: Vergleich der Überspannungen beim Einsatz von Überspannungsableitern

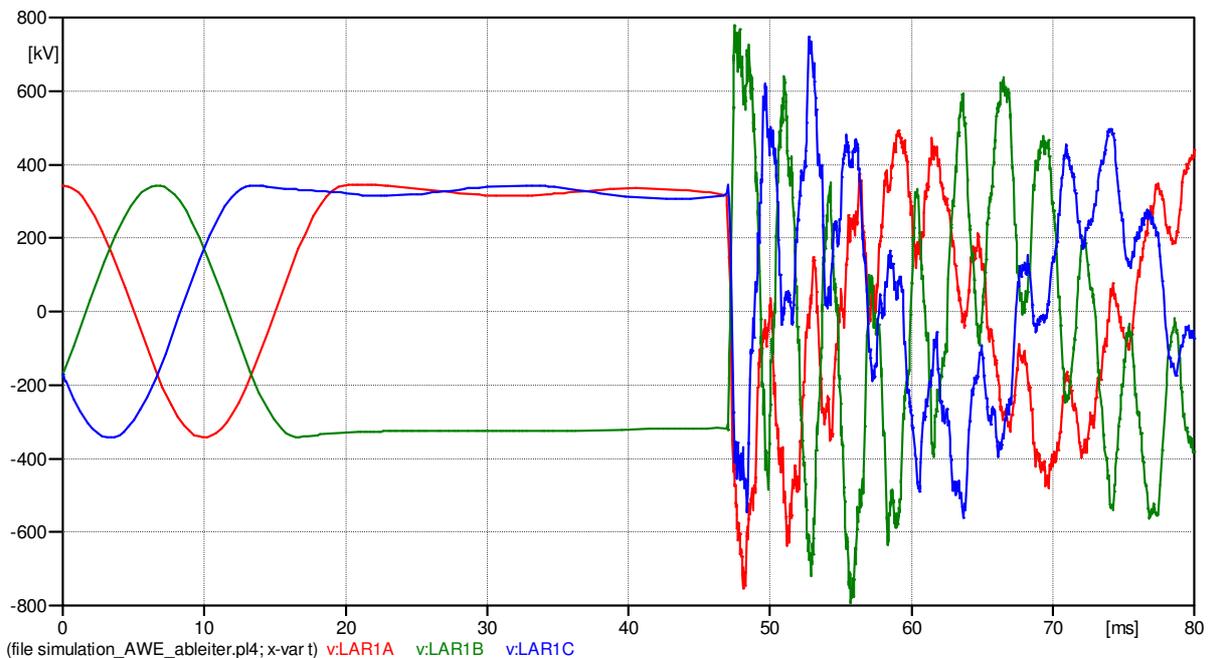


Abbildung 26 Verläufe der Leiter-Erde-Spannungen am Leitungsende im UW Lavorgo beim Wiedereinschalten mit Einsatz von Überspannungsableitern (R-Rot, S-Grün, T-Blau). Vergleich mit Abb. 23

Die Energieaufnahme der Überspannungsableiter während des Wiedereinschaltens ist in Abb. 29 dargestellt. Der maximale Wert für die Phase S beträgt 262 kJ und liegt somit deutlich unter der technischen Grenze von 4116 kJ (ABB Überspannungsableiter-Datenblatt):

- Bemessungsspannung U_r : 343 kV
- Energieaufnahmevermögen 12 kJ/kV(U_r)

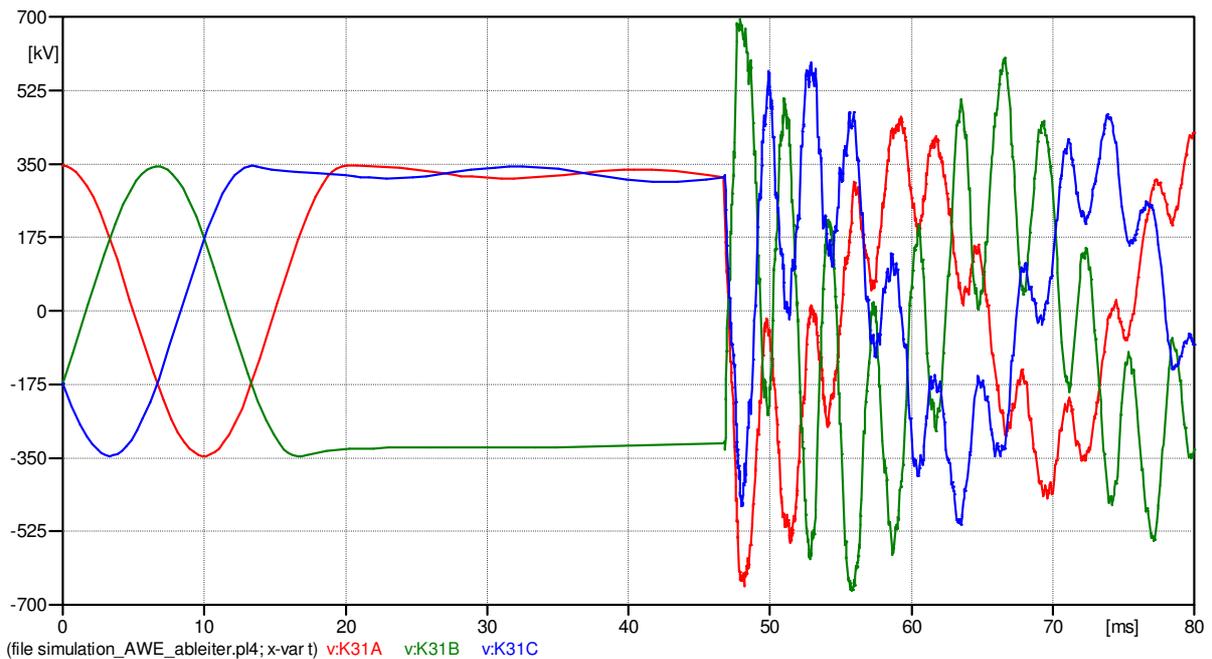


Abbildung 27: Verläufe der Leiter-Erde-Spannungen am Kabelübergang 2 beim Wiedereinschalten mit Einsatz von Überspannungsableitern (R-Rot, S-Grün, T-Blau). Vergleich mit Abb. 24

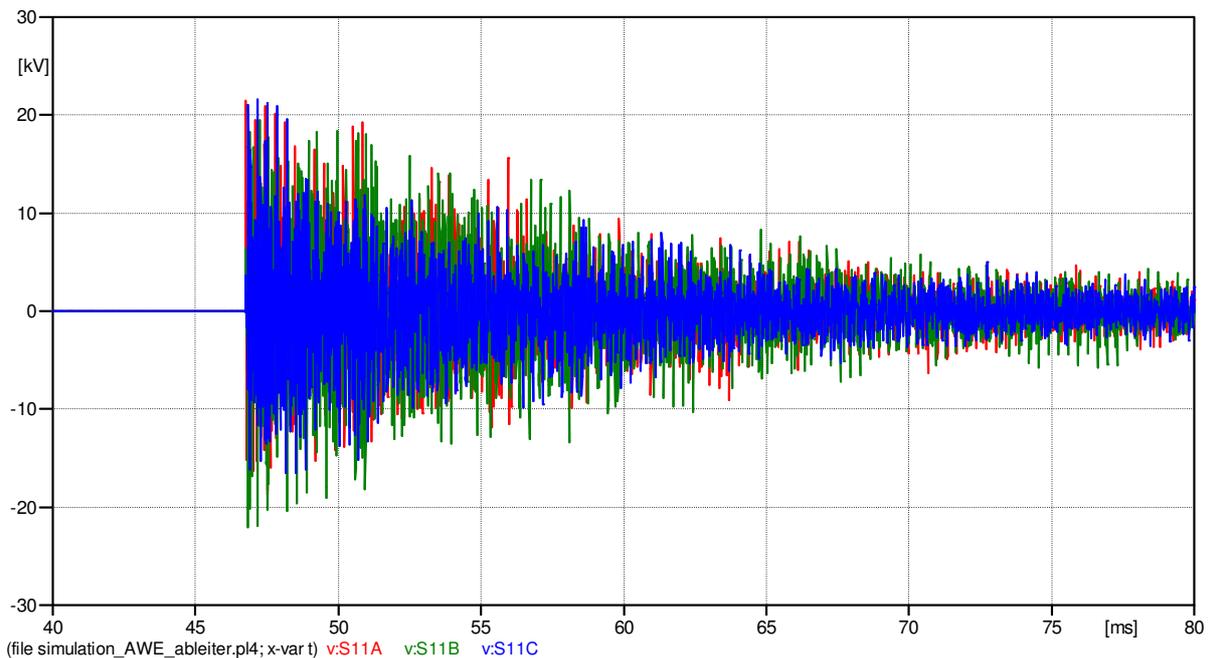


Abbildung 28: Schirmspannungen am ersten Unterabschnitt von der Seite des Kabelübergangs 1 beim Wiedereinschalten mit Einsatz von Schirm-Überspannungsableitern (R-Rot, S-Grün, T-Blau). Vergleich mit Abb. 25

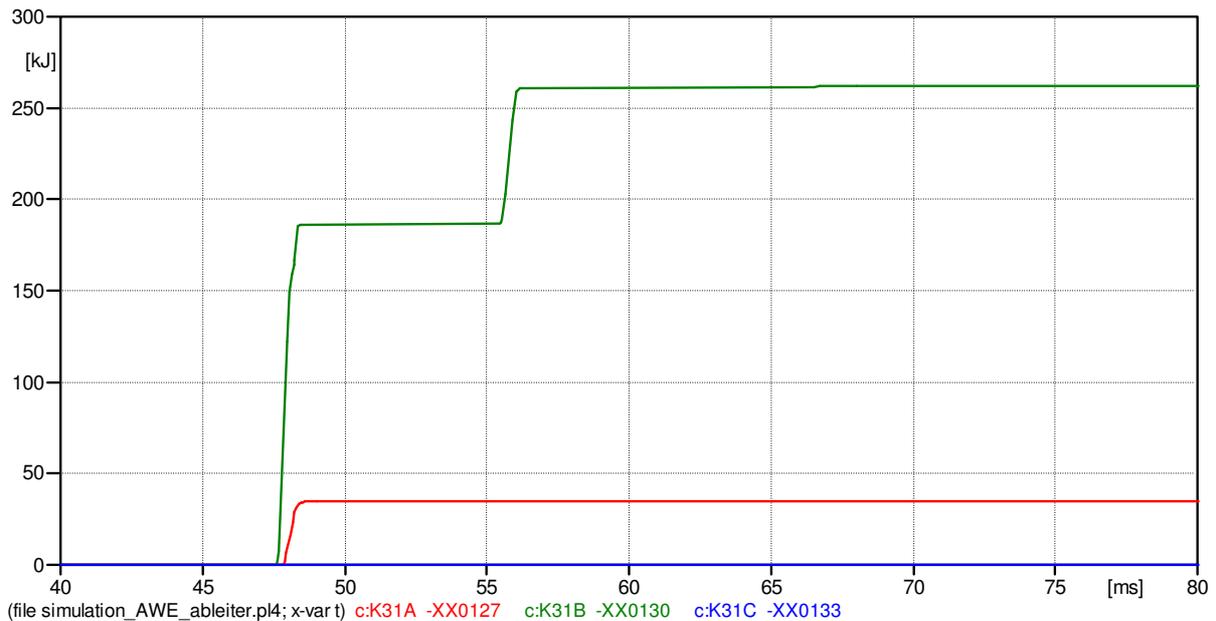


Abbildung 29: Energieaufnahme eines Überspannungsableiters beim Wiedereinschalten (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

3.6 Transienter Erdkurzschluss

Die elektrischen Verhältnisse beim Eintritt eines einpoligen Erdkurzschlusses unmittelbar am Kabelübergang 2 wurden für die leerlaufenden Leitungen untersucht. Der Erdungswiderstand der Übergangsbauwerke beträgt $0,4 \Omega$ und der Erdungswiderstand der angrenzenden Schaltanlagen (Chippis, Innertkirchen, Lavorgo) $0,2 \Omega$. In Abb.30 sind die Fehlerströme am Anschlusspunkt im UW Chippis bei Fehlereintritt im Kabelübergang 2 dargestellt.

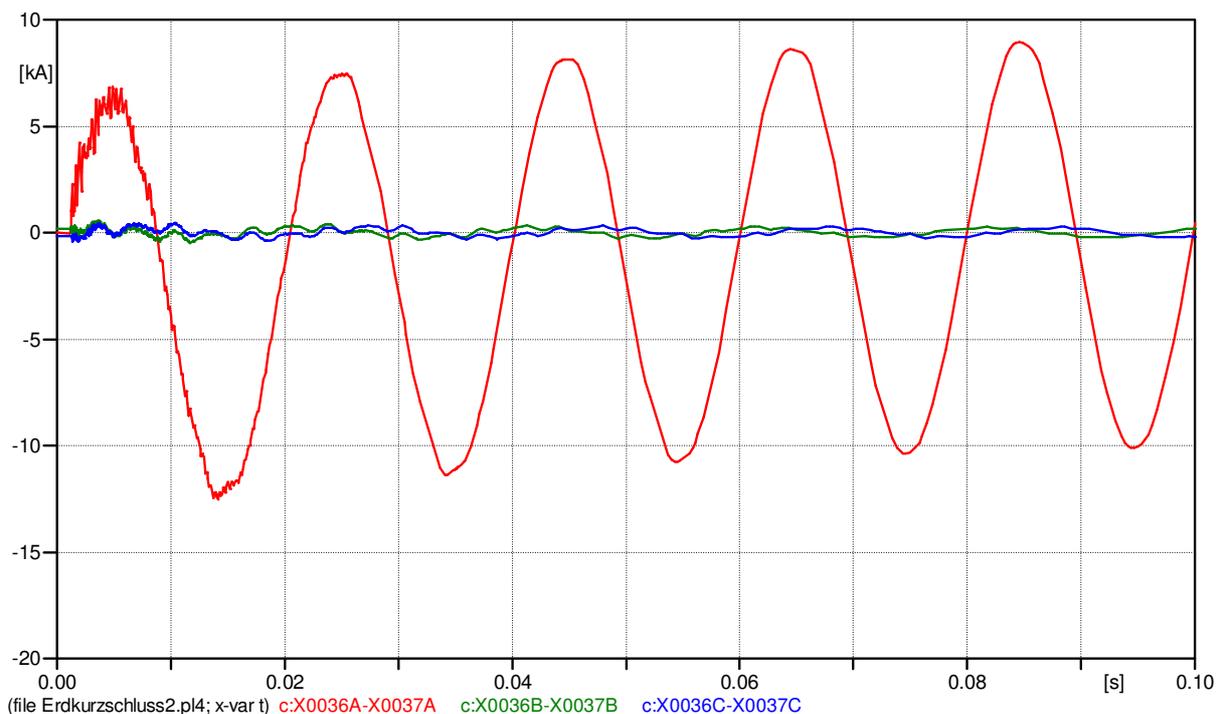


Abbildung 30 Verläufe der Fehlerströme am Anschlusspunkt im UW Chippis beim Fehlereintritt im Kabelübergang 2 (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

Die Verläufe der Leiterspannungen am Leitungsanfang im UW Chippis und am Fehlerort im Kabelübergang 2 werden in Abb. 31 und Abb. 32 dargestellt. Die Spannungserhöhung der gesunden Leiter beträgt ungefähr 1,27 und liegt auch unterhalb der Bemessungsspannung der Überspannungsableiter. Ein einpoliger Erdkurzschluss stellt daher keine besondere Belastung der Hauptisolierungen dar.

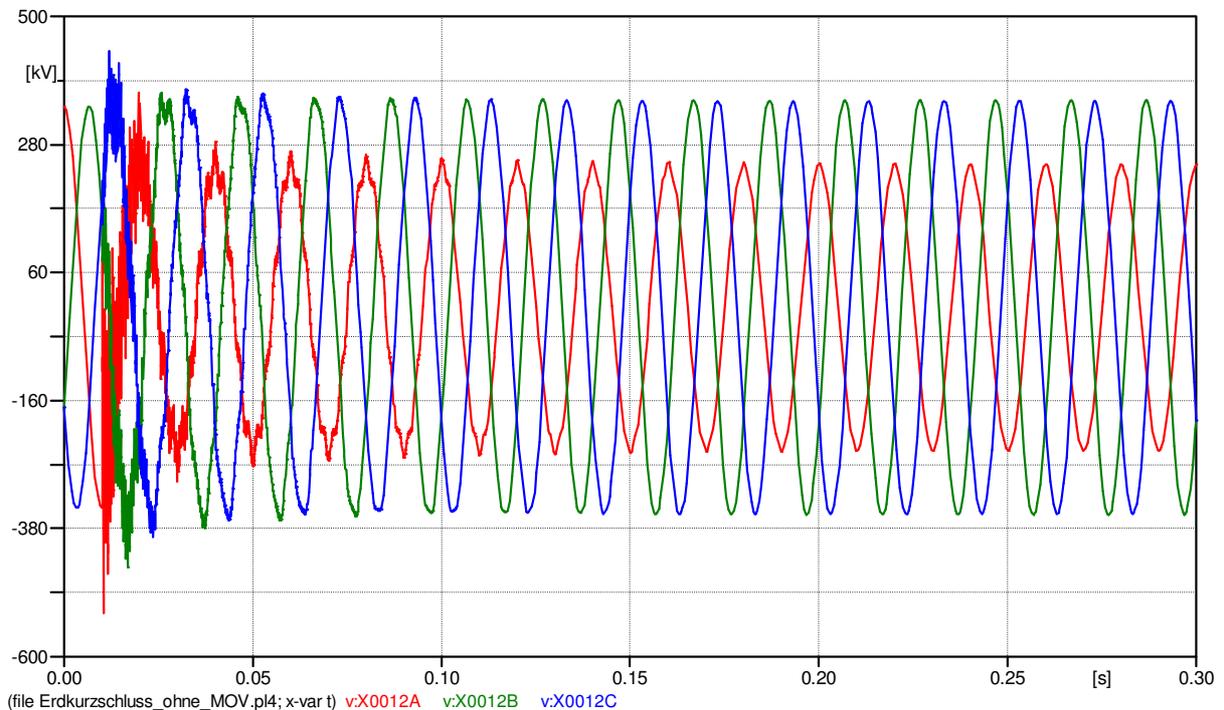


Abbildung 31: Leiterspannungen am Anschlusspunkt im UW Chippis beim Fehlereintritt im Kabelübergang 2 (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

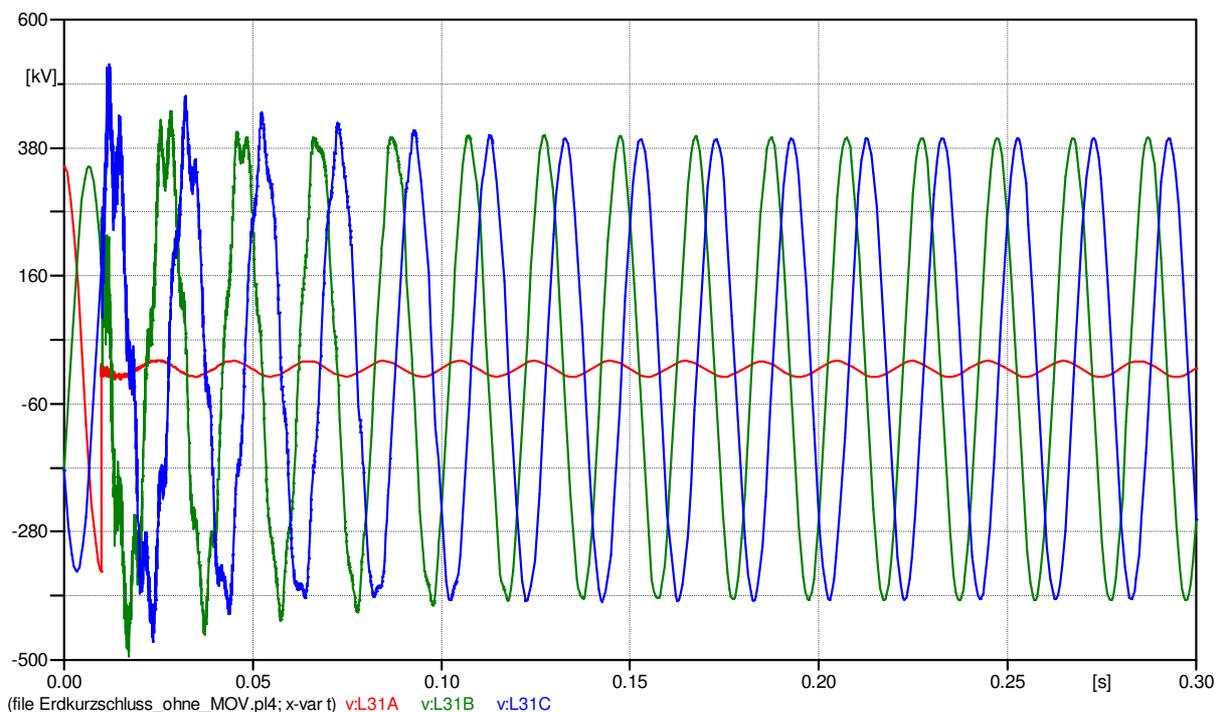


Abbildung 32: Leiterspannungen am Fehlerort im Kabelübergang 2 (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

Für Schirmisolierung stellt jedoch der einpoliger Erdkurzschluss erhebliche Spannungsbeanspruchungen. Abb.33 zeigt hierzu die Verläufe der Schirmspannungen am Kabelübergang 2. Die Spannungen erreichen einen Spitzenwert von 300 kV. Mit Einsatz von Schirm-Überspannungsableitern wird die maximale Spannung allerdings auf tolerierbare ca. 35 kV begrenzt.

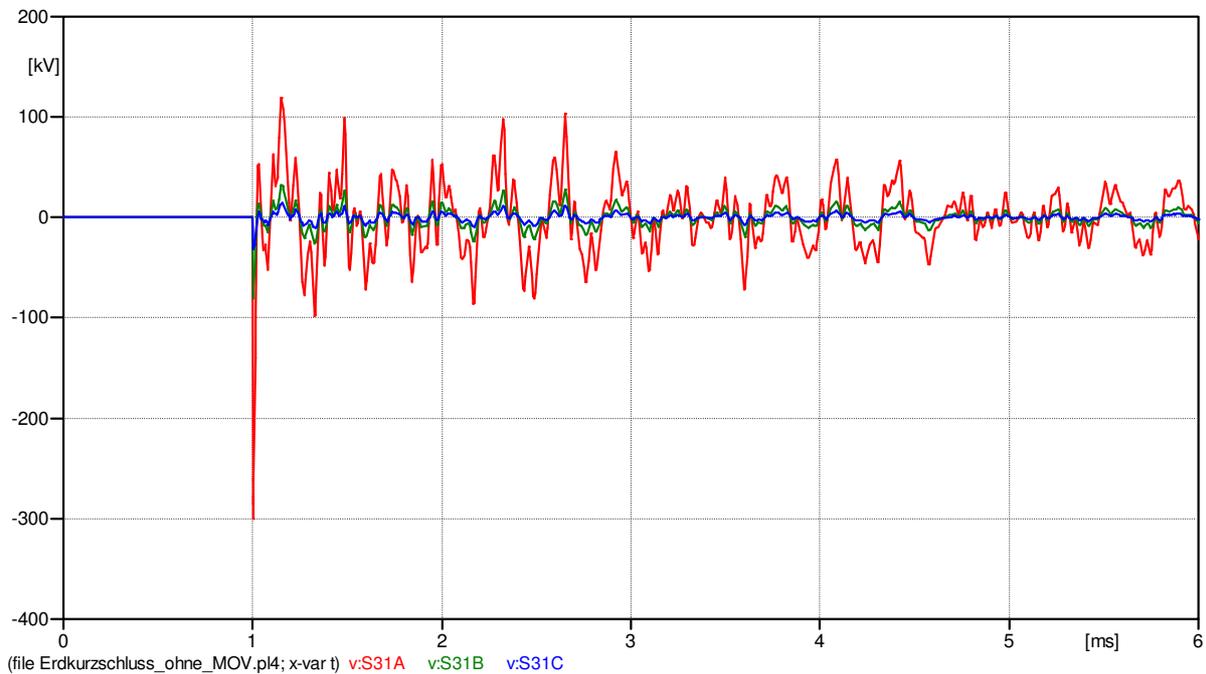


Abbildung 33: Schirmspannungen am dritten Unterabschnitt am Kabelübergang 2 beim einpoligen Erdkurzschluss (R-Rot, S-Grün, T-Blau).

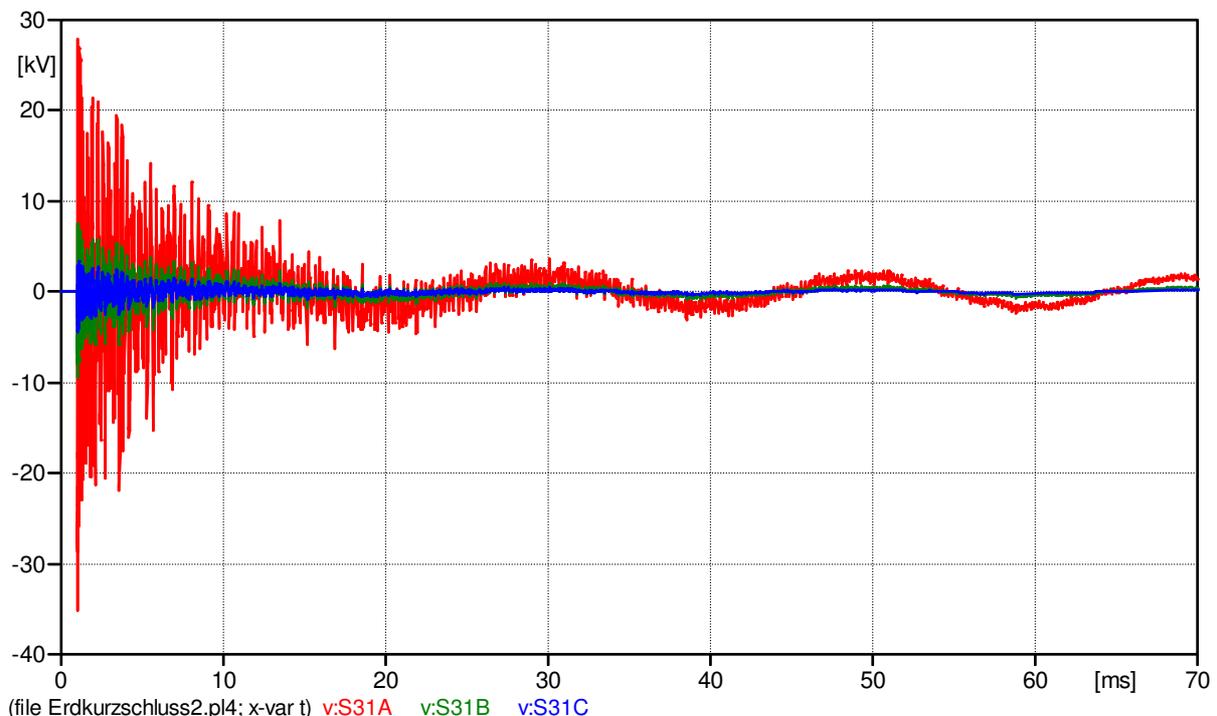


Abbildung 34: Schirmspannungen am dritten Unterabschnitt am Kabelübergang 2 beim einpoligen Erdkurzschluss mit Einsatz von Schirm-überspannungsableitern (R-Rot, S-Grün, T-Blau).

Die Energieaufnahme der Schirmüberspannungsableiter während des einpoligen Erdkurzschlusses ist in Abb. 35 dargestellt. Sie stellt mit rd. 21 kJ keine besondere Belastung für die üblichen Schirmüberspannungsableiter dar.

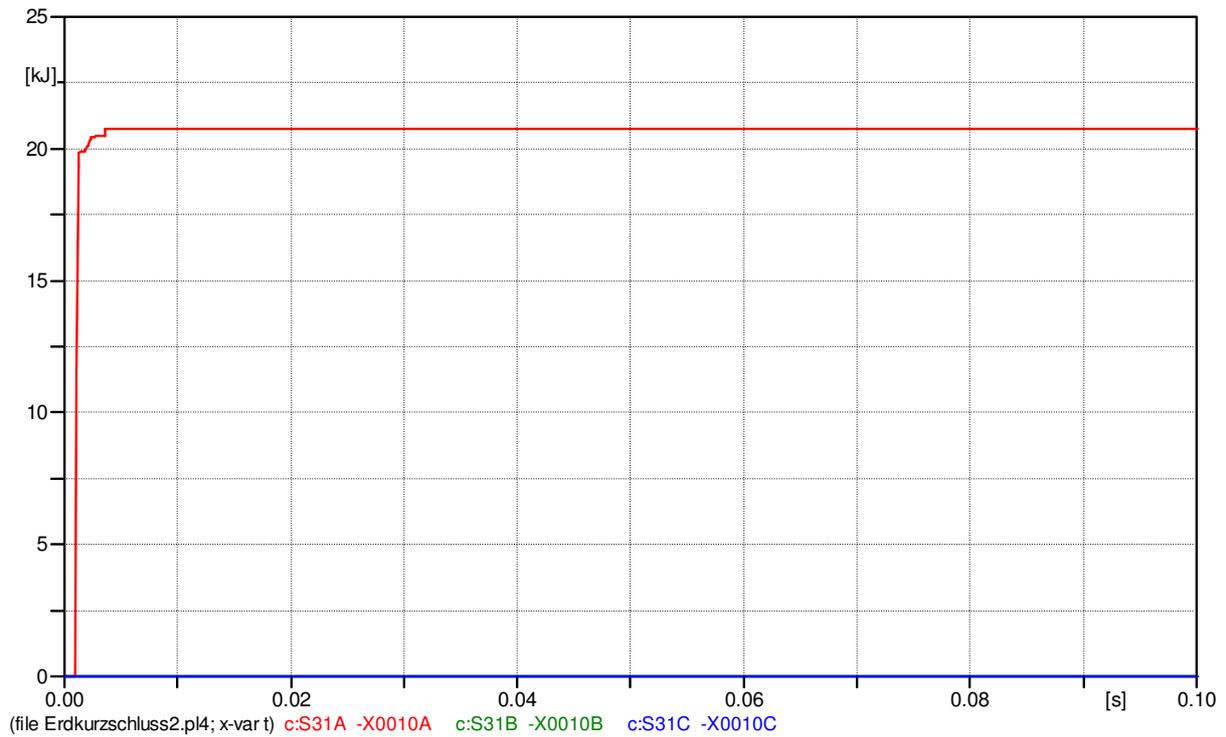


Abbildung 35 Energieaufnahme der Schirmüberspannungsableiter beim einpoligen Kurzschluss (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

4. Blitzüberspannungen

Bei Vollverkabelungen können direkte Blitzeinschläge in die erdverlegten Kabelanlagen praktisch ausgeschlossen werden. Bei Teil- oder Zwischenverkabelungen können jedoch Wanderwellen infolge von direkten Blitzeinschlägen in die Freileitungsleiterseile oder infolge von rückwärtigen Überschlügen an den Masten oder an den Erdseilen in die Kabelstrecke eindringen. Die Amplitude der einlaufenden Welle wird zunächst an dem Übergang von Freileitung zu Kabel herabgesetzt, wird aber an den Kabelenden aufgrund der stark unterschiedlichen Wellenwiderstände mehrfache reflektiert. Durch solche Mehrfachreflexionen und deren Überlagerungen können, je nach Leitungsparametern und Systemlänge, extrem hohe Überspannungen im Kabelsystem auftreten. Nachfolgend wird zuerst die theoretische Charakteristik der Wanderwellenvorgänge bei einer Zwischenverkabelungen erläutert, und anschliessend wird auf die Simulation der Blitzeinschläge im ATP-EMTP eingegangen.

4.1 Ausbreitung von Wanderwellen bei Zwischenverkabelungen

Die prinzipielle Ausbreitung von Wanderwellen bei einer Zwischenverkabelung lässt sich anschaulich durch das graphische Wellengitter-Verfahren darstellen. Abb. 36 zeigt einen solchen sogenannten „Wanderwellenfahrplan“ bei einer Zwischenverkabelung mit den wie folgt definierten Reflexions- und Brechungsfaktoren:

$$r_{ij} = \frac{Z_i - Z_j}{Z_i + Z_j} \quad \text{und} \quad b_{ij} = \frac{2 \cdot Z_j}{Z_i + Z_j}$$

τ ist die Laufzeit der Wanderwelle mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit v und der Kabellänge l :

$$\tau = \frac{l}{v}$$

Die komplexe Zahl $\underline{\lambda}$ beschreibt die Übertragungsdämpfung sowie die Phasenverschiebung der Wanderwelle entlang der Kabelstrecke.

In [4] wird beschrieben, dass eine charakteristische Kabellänge l_0 besteht, bei welcher das Kabel mit der gleich großen Blitzstoßspannung wie die vorgelagerte Freileitung beansprucht wird. Wenn die Kabellänge größer als l_0 ist, wird das Kabel weniger beansprucht als die vorgelagerte Freileitung. Falls die Kabelstrecke kürzer als l_0 ist, wird das Kabel mit einer erhöhten Blitzstoßspannung beansprucht. Der Faktor k somit bezeichnet die Verstärkung der Blitzüberspannung durch die Kabelstrecke und ist wie folgt definiert:

$$k = \frac{\hat{U}_{\text{kabel}}}{\hat{U}_{\text{freileitung}}}$$

wobei \hat{U}_{Kabel} und $\hat{U}_{\text{Freileitung}}$ die maximalen Blitzüberspannungen auf der Kabel- und auf der Freileitungsstrecke sind.

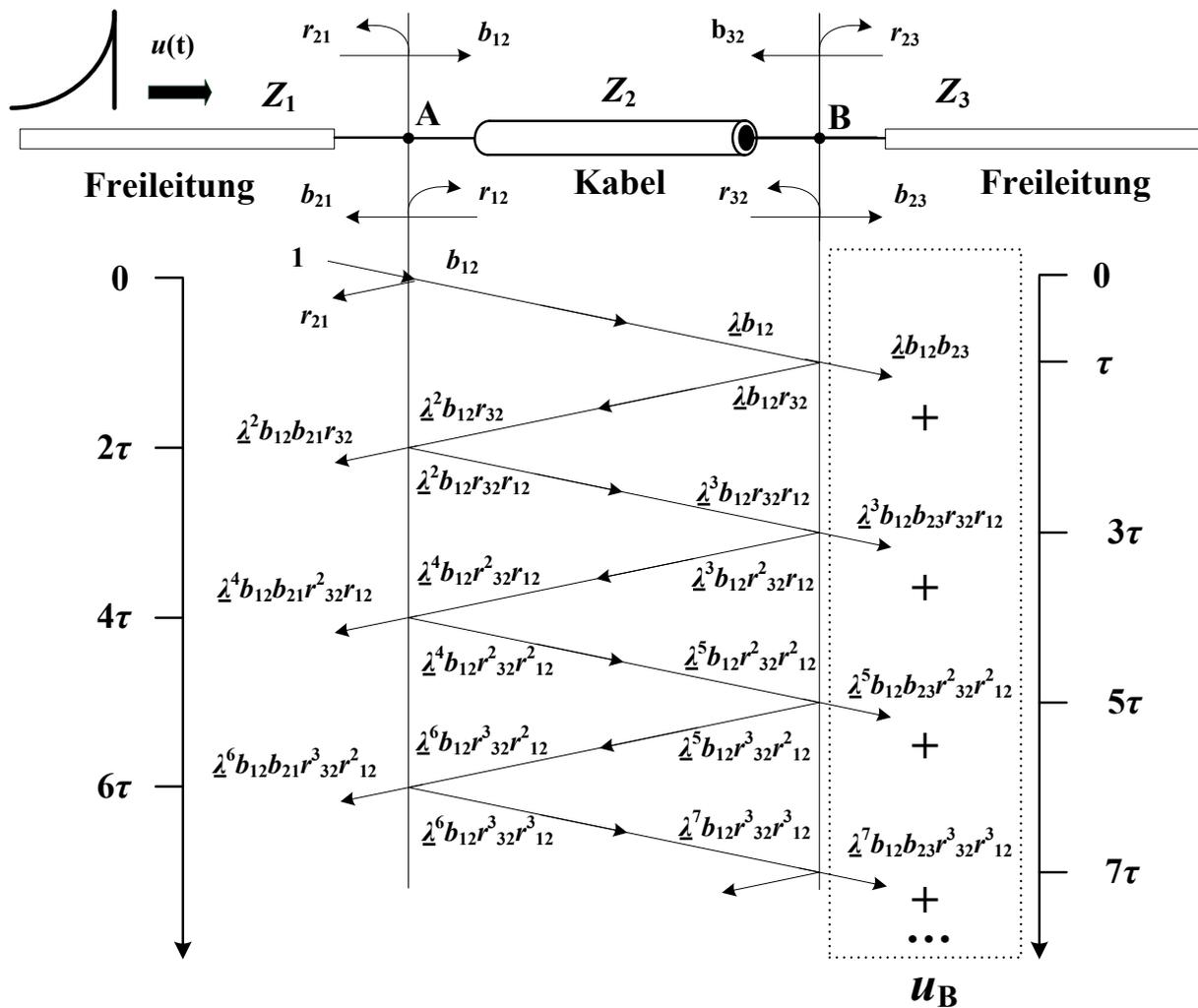


Abbildung 36: Wanderwellenfahplan einer Zwischenverkabelung

Mit typischen Leitungsdaten von 380 kV-Netzen wird der Verstärkungsfaktor k als Funktion der Kabellänge für zwei Arten der Verkabelung in Abb. 37 dargestellt. Aus Abb. 37 lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Bei einer Teil-Verkabelung zwischen Freileitung und Transformator liegt die charakteristische Länge l_0 bei ca. 400 m. Mit abnehmenden Kabellängen nähert der Verstärkungsfaktor k sich seinem theoretischen Maximum von 2 wie bei der Totalreflektion einer leerlaufenden Leitung.
- Bei einer Verkabelung zwischen zwei Freileitungsabschnitten ist die charakteristische Länge l_0 unendlich klein. Bei einer solchen Konfiguration ist die maximale Blitzüberspannung auf der Kabelstrecke stets kleiner als auf der Freileitung und mit zunehmender Kabellänge rasch herabgesetzt. Bei einer Kabellänge von 2 km besitzt die maximale Spannung auf der Kabelstrecke nur ca. 40% der ursprünglichen Spannungshöhe auf der Freileitung.

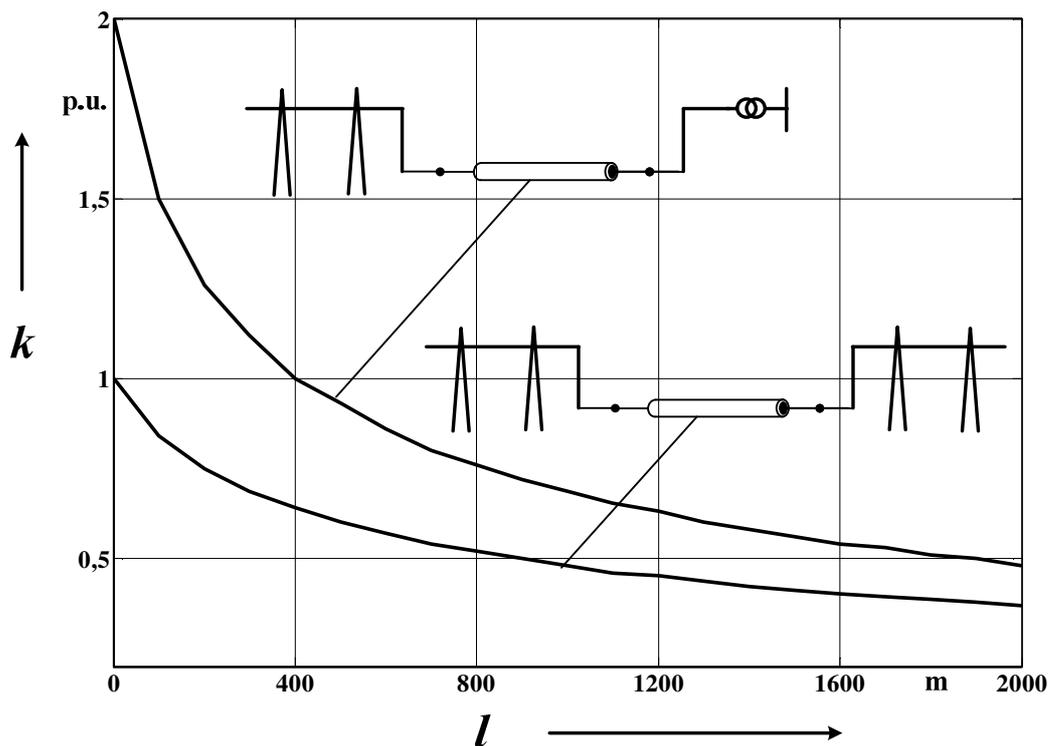


Abbildung 37: Verstärkungsfaktor k der höchsten Blitzüberspannung bei Kabelstrecken als Funktion der Kabellänge

4.2 Direkte Blitzeinwirkungen auf der Kabelanlage

Ein Direkteinschlag in ein Leiterseil bei einer durch Erdseile geschützten Freileitung kann typischerweise in Form eines "shielding failure" auftreten, wenn die Blitzströme mit geringer Amplitude (typischerweise einige kA) die Erdseile überbrücken. Die Größenordnung der überbrückten Blitzströme wird wesentlich durch den Aufbau der Freileitungsmaste bestimmt und kann durch verschiedene elektromagnetische Modelle [4] berechnet werden.

Neben dem Einsatzes von Überspannungsableitern wird man die ersten beiden Spannfelder der Freileitung mit zusätzlichen Erdseilen schützen, um einen direkten Blitzeinschlag in die Leiterseile in unmittelbarer Nachbarschaft zum Kabelendverschluß zu vermeiden. Im Folgenden wird ein konservatives Szenarium simuliert: ein Blitz mit einem Spitzenwert von 30 kA und einem 0,5/50 μ s-Verlauf schlägt direkt in ein Leiterseil, 1,5 km vor dem Kabelübergang 1 ein.

Abb. 38 zeigt die Verläufe der Blitzüberspannungen entlang der Kabelstrecke. Die maximale Blitzüberspannung tritt nicht an den Kabelenden, sondern am zweiten Unterabschnitt auf. Sie bleibt deutlich unter der Bemessungsblitzstoßspannung von 1450 kV. Die Energieaufnahmen der Überspannungsableiter an den beiden Kabelenden sind in Abb. 39 dargestellt und stellen keine besondere Belastungen dar.

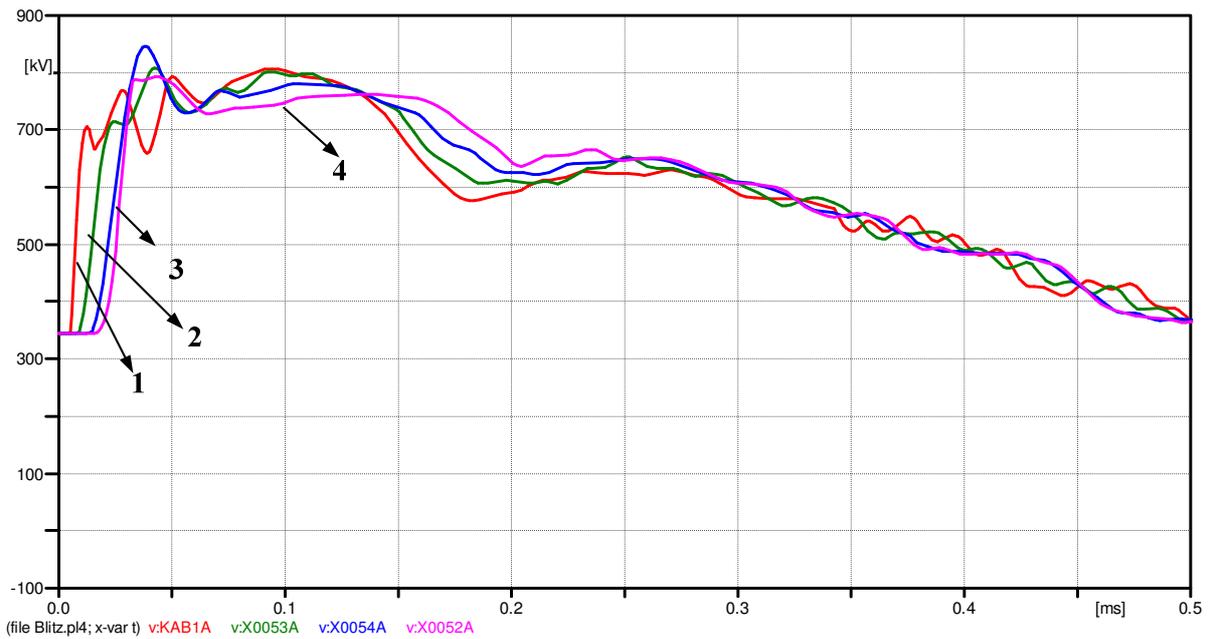


Abbildung 38: Blitzüberspannungen: 1 - Kabelübergang 1, 2 - der 1. Unterabschnitt, 3- der 2. Unterabschnitt und 4 - Kabelübergang 2

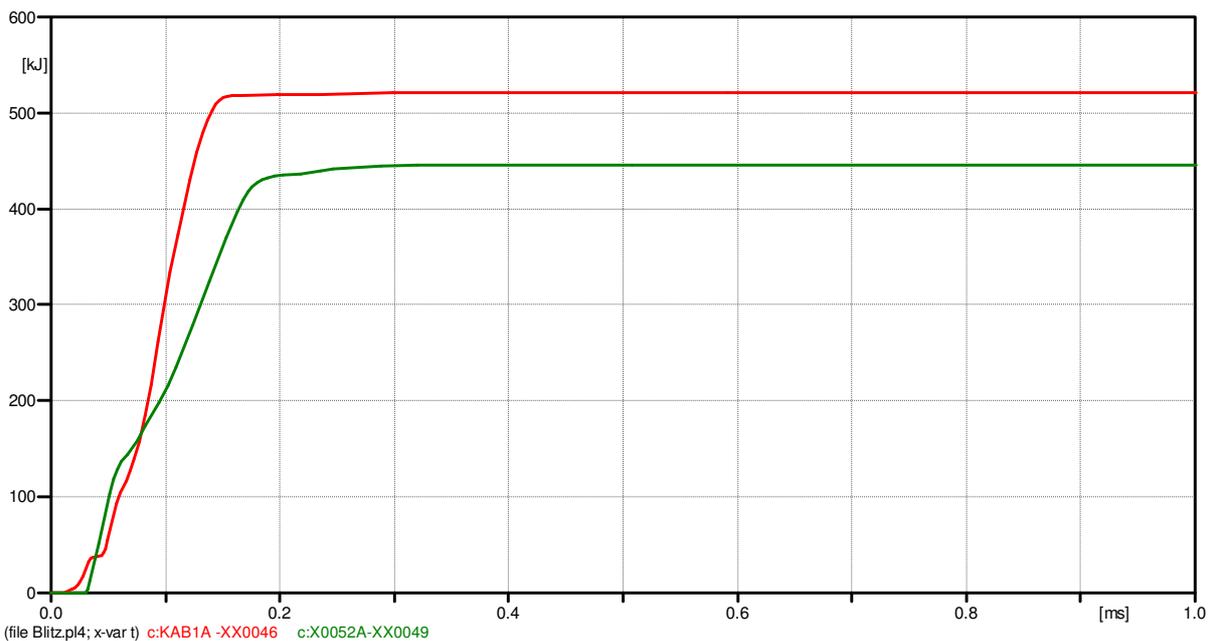


Abbildung 39: Energieaufnahme der Überspannungsableiter (rot-Kabelübergang 1, grün-Kabelübergang 2)

Die Schirmspannungen beim direkten Blitzeinschlag sind in Abb. 40 dargestellt. Die Energieaufnahme liegt unterhalb der typischen Grenzen der Überspannungsableiter ($U_r = 9/12$ kV und Energieaufnahmevermögen 3,6 kJ/kV).

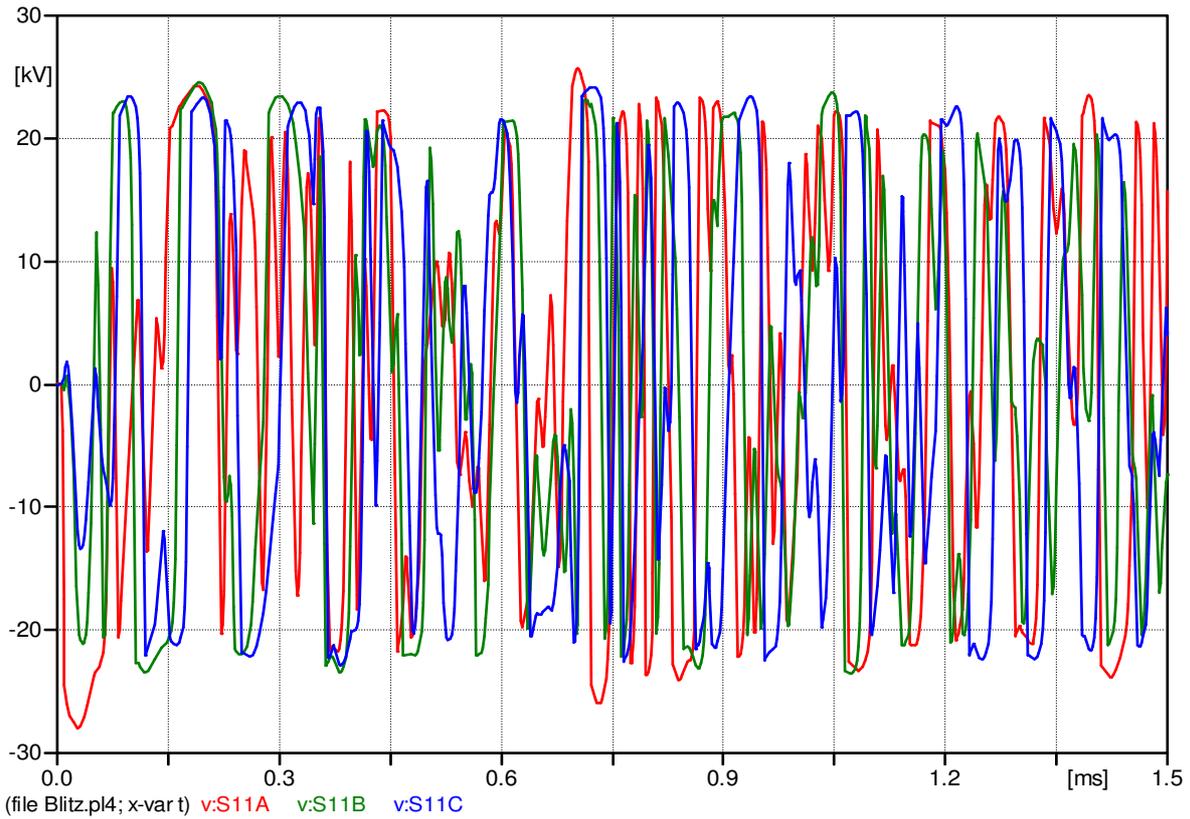


Abbildung 40: Schirmüberspannungen am ersten Unterabschnitt beim direkten Blitzeinschlag (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

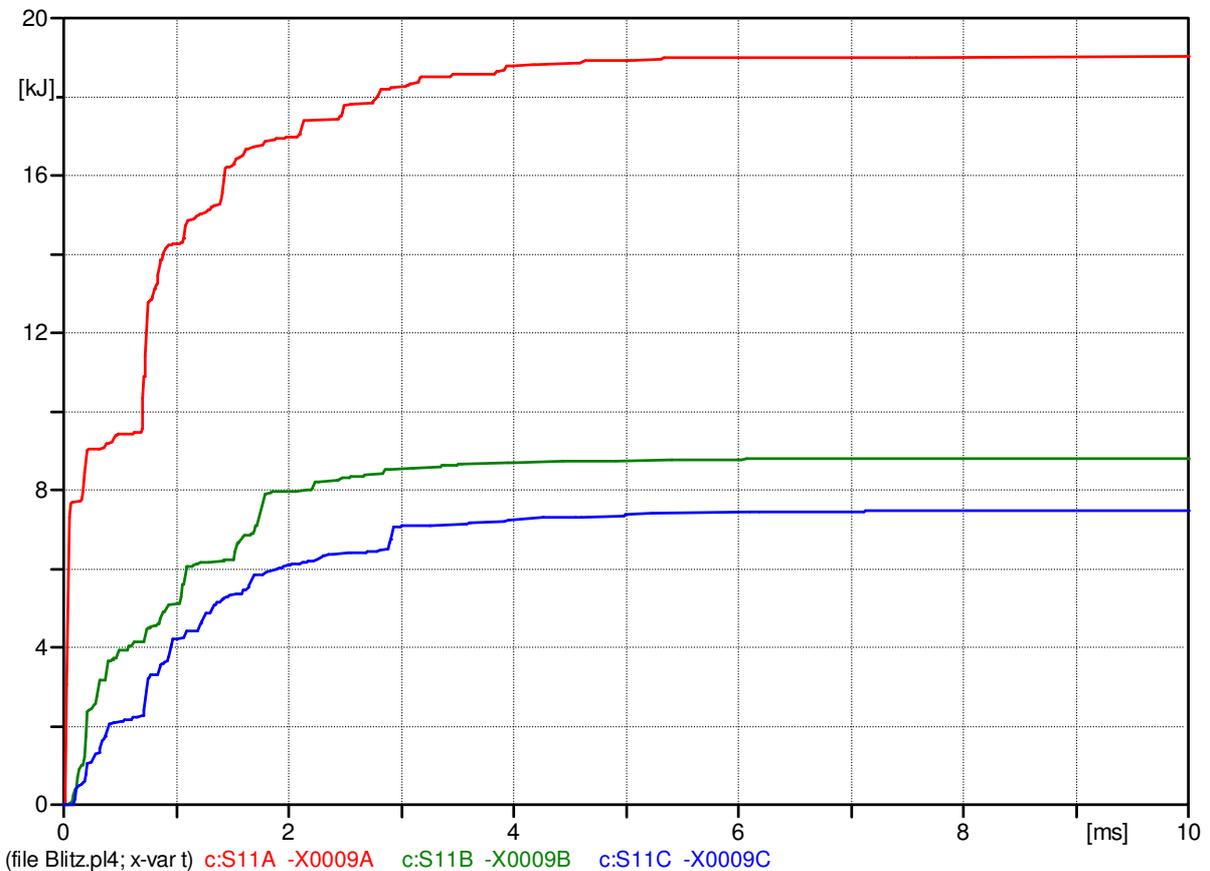


Abbildung 41: Energieaufnahme der Schirmüberspannungsableiter beim direkten Blitzeinschlag (R-Rot, S-Grün, T-Blau)

4.3 Blitzeinwirkungen auf Kabelschirme bei Einschlägen in geerdete Anlagen

Wie in den letzten zwei Abschnitten gezeigt, werden die Hauptisolierungen der Kabel beim Blitzeinschlag generell nicht durch die vom Leiterseil eingedrungenen Wanderwellen kritisch beansprucht. Die Kabelschirme sind jedoch noch mit dem ganzen Erdungssystem entlang der Trasse galvanisch verbunden und könnten durch Blitzeinschläge in geerdete Anlagen beschädigt werden. Die Tunnelverlegung kann vorteilweise Durchschläge bei einem Naheinschlag wie z.B. in einen Baum verhindern. Blitzströme können jedoch noch infolge von Einschlägen in Maste oder Erdseile in die Kabelschirme eindringen. Die entstehenden Schirmüberspannungen werden durch die Größenordnung der eingedrungenen Stromwanderwellen bestimmt. Dieser Vorgang lässt sich anschaulich durch Abb.42 erläutern:

- Ein Blitz mit dem Strom i_1 schlägt in die Spitze des ersten Mastes vor dem Kabelübergang 1 ein. Der Strom i_1 wird nach Verhältnis der Wellenwiderstände des Erdseils und des Mast-Erdungswiderstandes aufgeteilt.
- Ein Teil i_2 pflanzt sich als Stromwanderwelle entlang des Erdseils in den Kabelübergang 1 fort und wird dort nach dem Verhältnis des Erdungswiderstandes am Kabelübergang 1 und des Erdungssystems der Kabelanlage in i_3 und i_4 aufgeteilt. Die Stromwanderwelle i_3 bestimmt die Erdpotentialerhöhung, und die Stromwanderwelle i_4 bestimmt die Höhe der Schirmspannungen.
- Ein Rückwärtiger Durchschlag kann auftreten, falls die Potentialdifferenz zwischen Mast und Leiterseil die Spannungsfestigkeit des Isolators überschreitet. Eine zusätzliche Stromwanderwelle wird dann auch in dem Leiterseil entstehen.

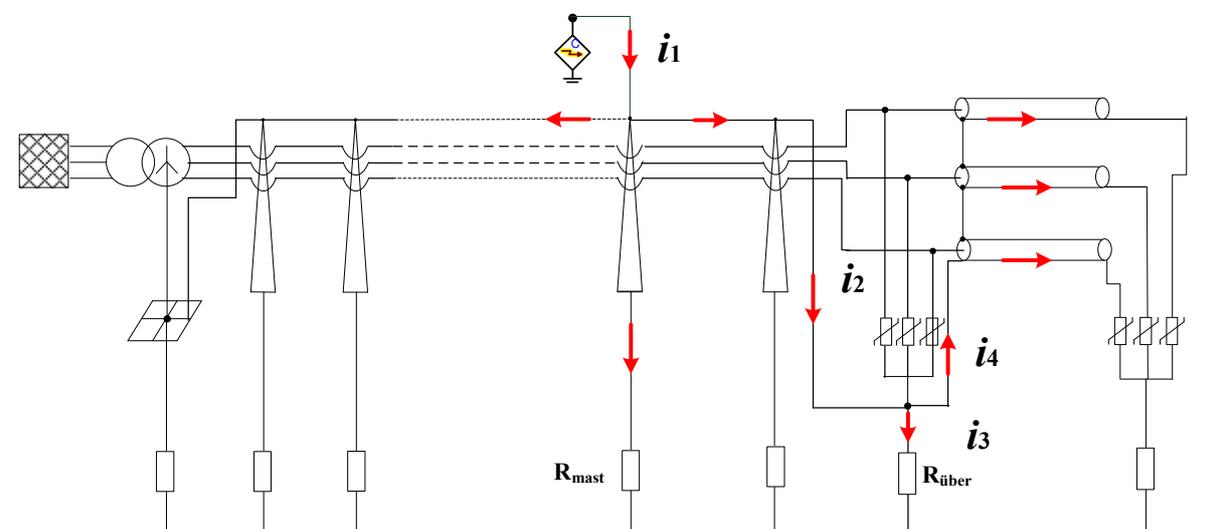


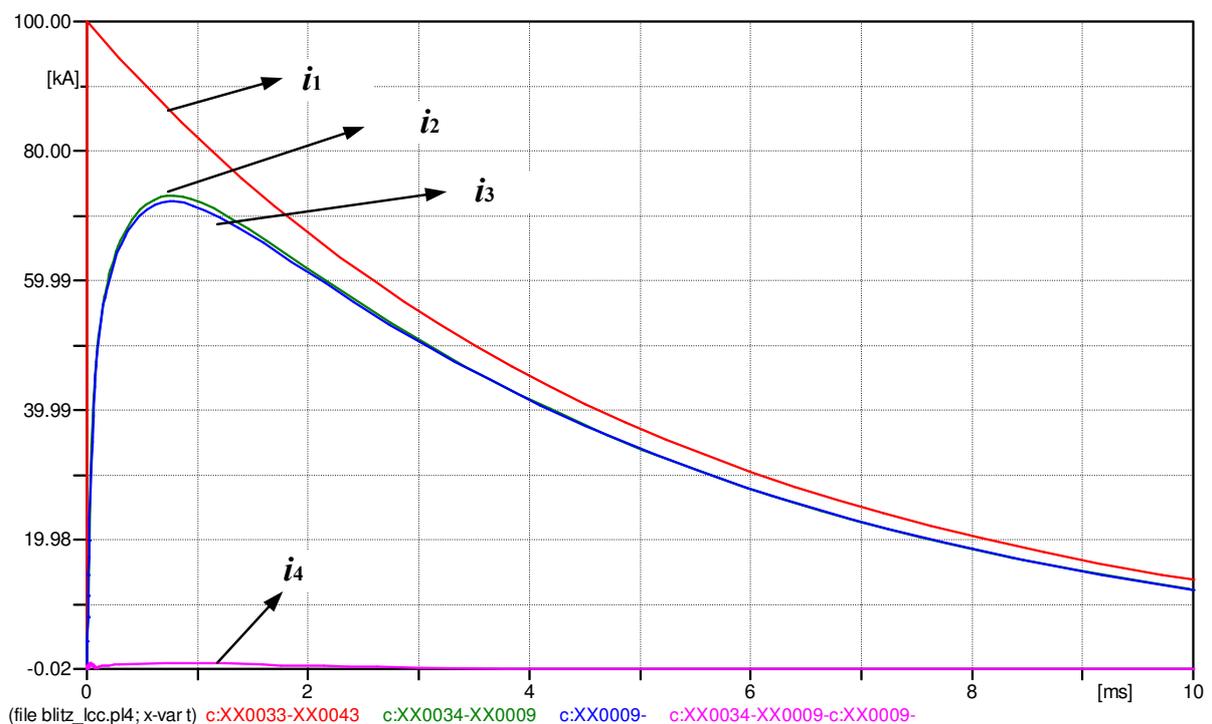
Abbildung 42: Eindringen der Blitzströme in die Kabelschirme beim Einschlag in einen Mast

Im Folgenden wird der oben beschriebene Vorgang simuliert mit den folgenden Daten:

- Blitz: 100 kA, 7/350 μ s
- Erdungswiderstand am Freileitungsmast: 10 Ω ,
- Erdungswiderstand am Kabelübergang 1: 0,4 Ω ,

- Induktivitäten der Verbindungskabel von den Schirmen zur lokalen Erdung: 1,5 μH ,
- Die Schirmüberspannungsableiter ($U_r = 9 \text{ kV}$ und Energieaufnahmevermögen 3,6 kJ/kV) werden in Stern geschaltet und starr geerdet.
- Die Isolatoren werden vereinfacht als Spannungsgesteuerte Schalter simuliert. Die Spannungsfestigkeit entspricht der Bemessungsblitzstoßspannung von 1450 kV.

Für diesen Fall gilt: Die Verläufe der Stromwanderwellen von i_1 bis i_4 sind in Abb. 43 dargestellt. Wegen der guten Erdung am Kabelübergang 1 wird nur ein sehr kleiner Teil i_4 in die Kabelschirme eindringen. Die dadurch verursachten Schirmüberspannungen sind durch die Schirmüberspannungsableiter effektiv begrenzt (Abb. 44), und die Energieaufnahmen der Überspannungsableiter sind sehr gering (Abb. 45). Ein rückwärtiger Durchschlag ist nicht passiert.



**Abbildung 43: Verläufe der Stromwanderwellen (Erdungswiderstand des betroffenen Mastes: 10Ω , Erdungswiderstand am Kabelübergang 1: $0,4\Omega$)
 Ströme i_1 bis i_4 nach Abb.42**

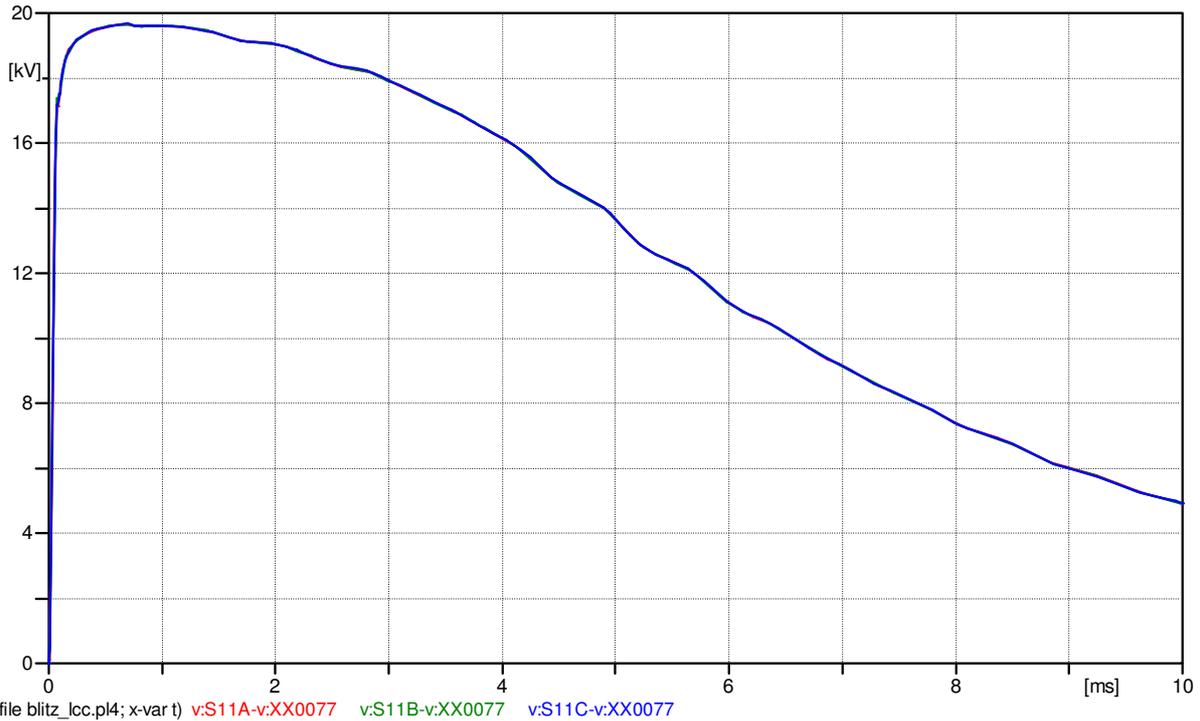


Abbildung 44: Schirmüberspannungen am ersten Unterabschnitt (Erdungswiderstand des betroffenen Mastes: 10Ω , Erdungswiderstand am Kabelübergang 1: $0,4\Omega$, R-Rot, S-Grün, T-Blau)

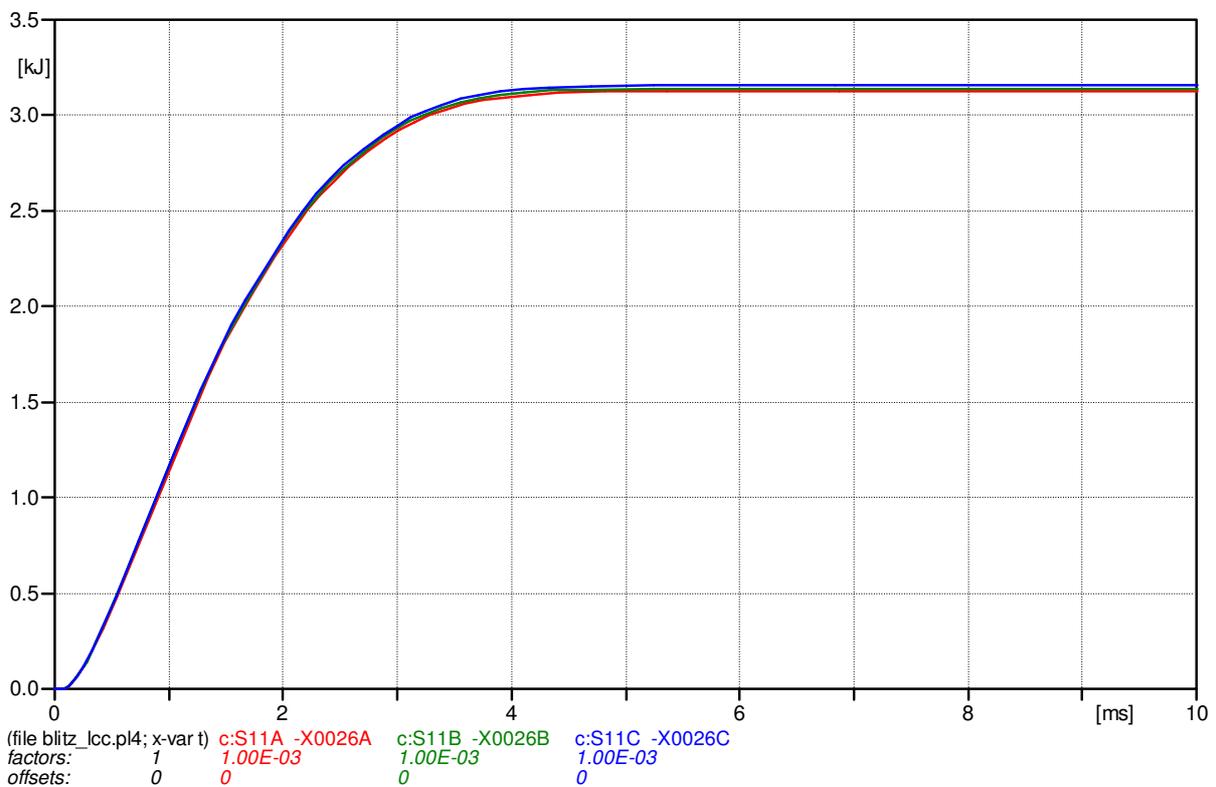


Abbildung 45: Energieaufnahme der Schirmüberspannungsableiter (Erdungswiderstand des betroffenen Mastes: 10Ω , Erdungswiderstand am Kabelübergang 1: $0,4\Omega$, R-Rot, S-Grün, T-Blau)

Der Abb. 42 ist einfach zu entnehmen, dass die in die Kabelschirme eindringende Stromwandlerwelle i_4 direkt von der lokalen Erdung am Kabelübergang 1 beeinflusst wird. Dieser Einfluss wird nachfolgend durch dieselbe Berechnung, aber mit einem vergrößerten Erdungswiderstand von 3Ω am Kabelübergang 1 aufgezeigt.

Abb.46 zeigt die neue Verteilung der Stromwandlerwellen. Im Vergleich zu Abb. 43 ist ersichtlich, dass die in die Kabelschirme eindringende Stromwandlerwelle sich fast 20-fach vergrößert. Die Schirmüberspannungsableiter können zwar die maximalen Spannungen noch begrenzen (Abb.47), jedoch werden die begrenzten Schirmspannungen wegen der Übertragung der Erdpotentialerhöhung vom Kabelübergang 1 nach dem ersten Unterabschnitt stets höher als die Bemessungsspannung der Überspannungsableiter. Daraus ergibt sich hohe Energieaufnahmen der Überspannungsableiter (Abb. 48), die die Überspannungsableiter thermisch zerstören könnten.

Folgerung ist, dass für hinreichend gute Erdungen an den Kabelübergängen gesorgt werden muss.

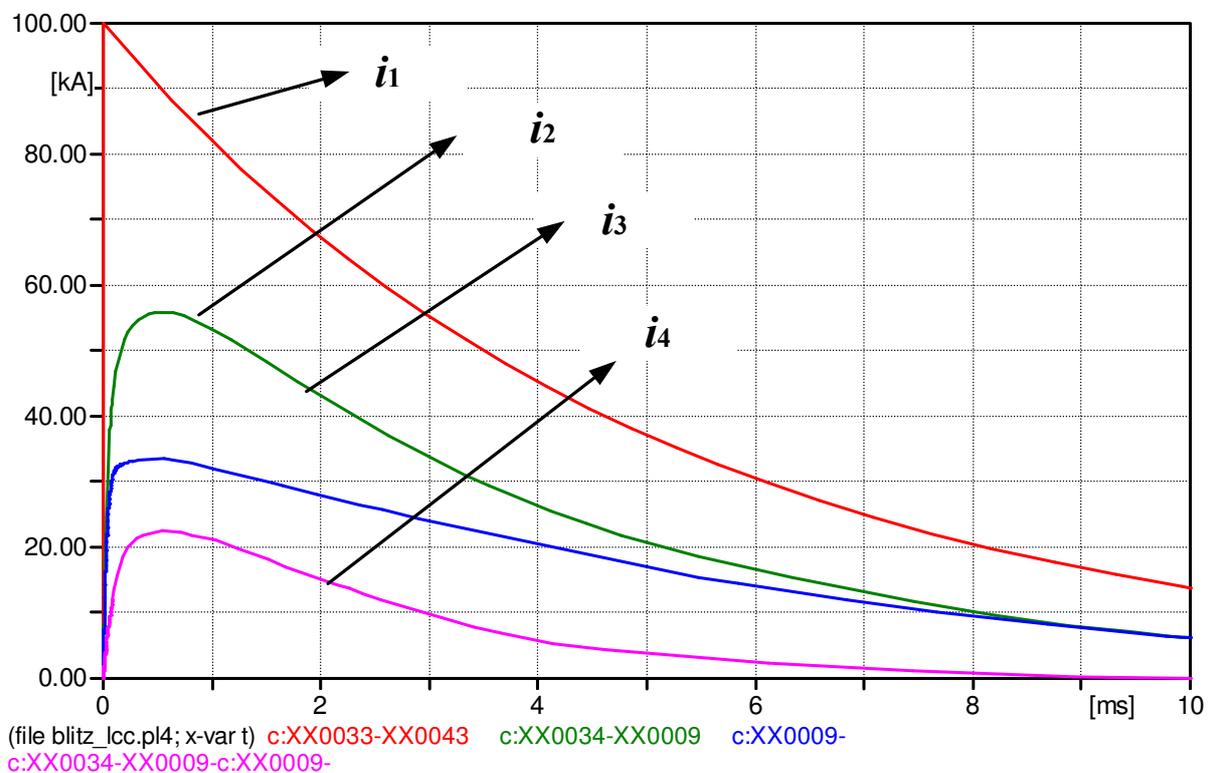


Abbildung 46: Verläufe der Stromwandlerwellen (Erdungswiderstand des betroffenen Mastes: 10Ω , Erdungswiderstand am Kabelübergang 1: 3Ω) i_1 bis i_4 nach Abb.42

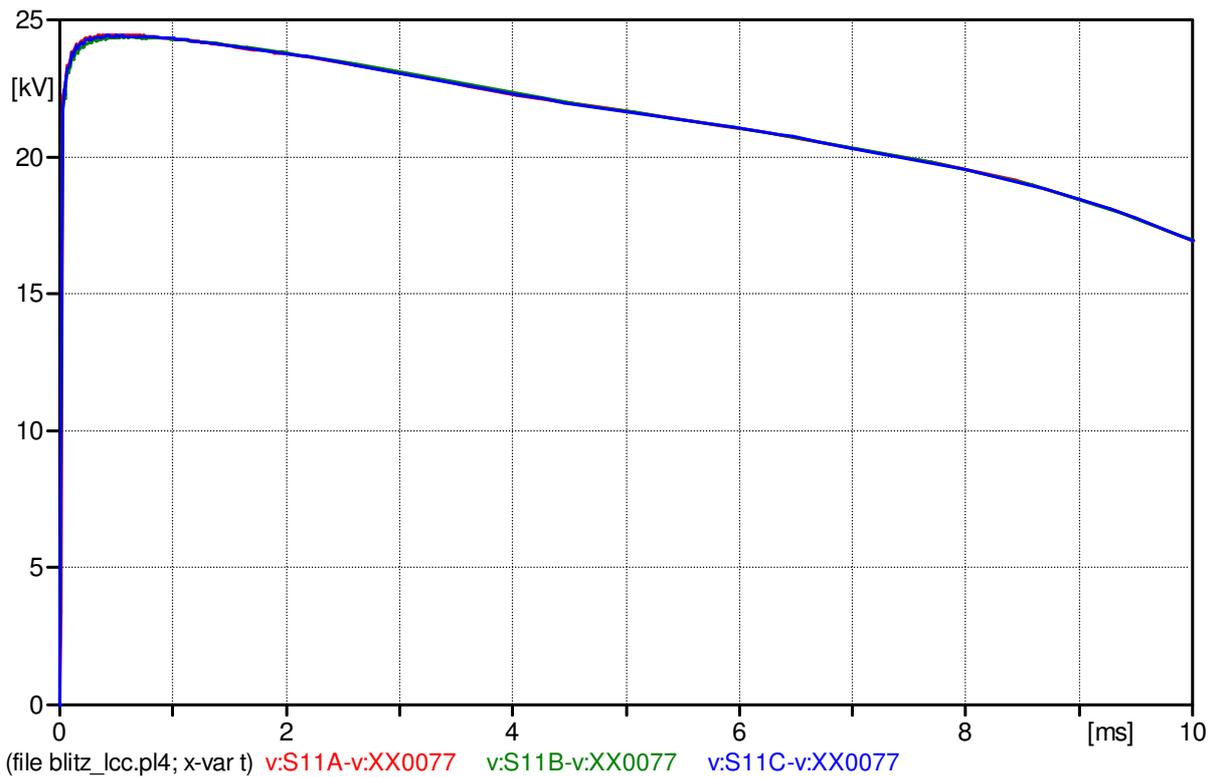


Abbildung 47: Schirmüberspannungen am ersten Unterabschnitt (Erdungswiderstand des betroffenen Mastes: 10Ω , Erdungswiderstand am Kabelübergang 1: 3Ω , R-Rot, S-Grün, T-Blau)

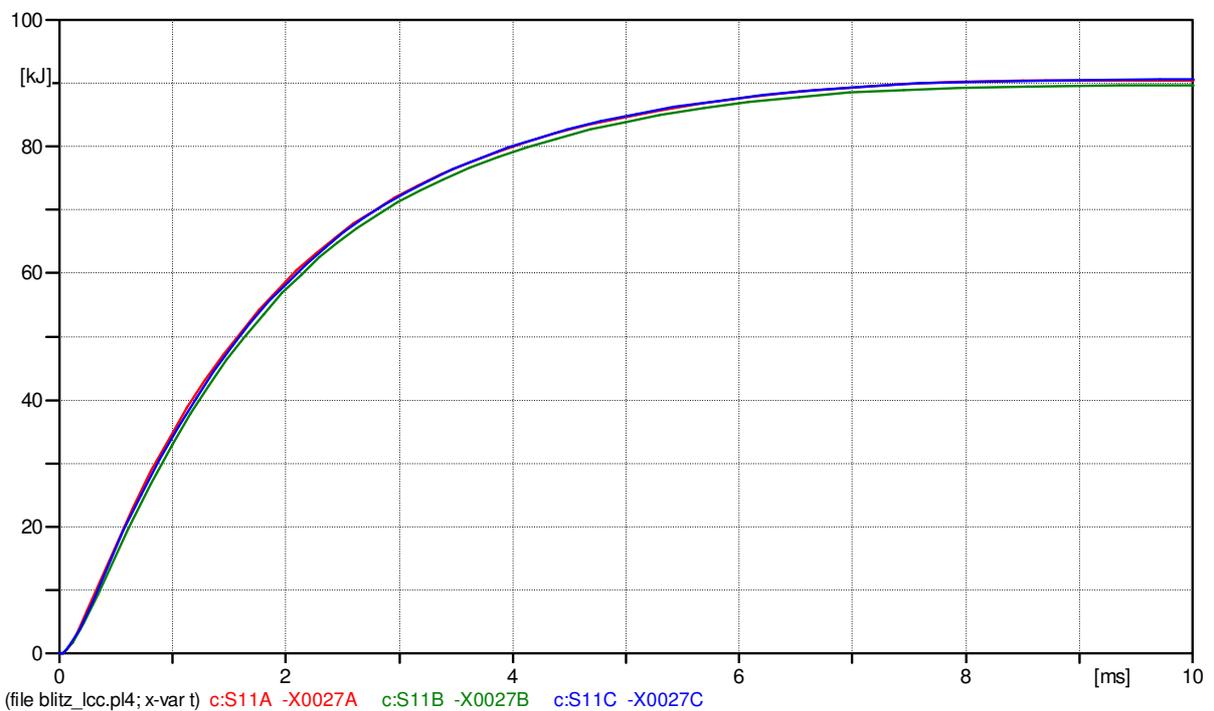
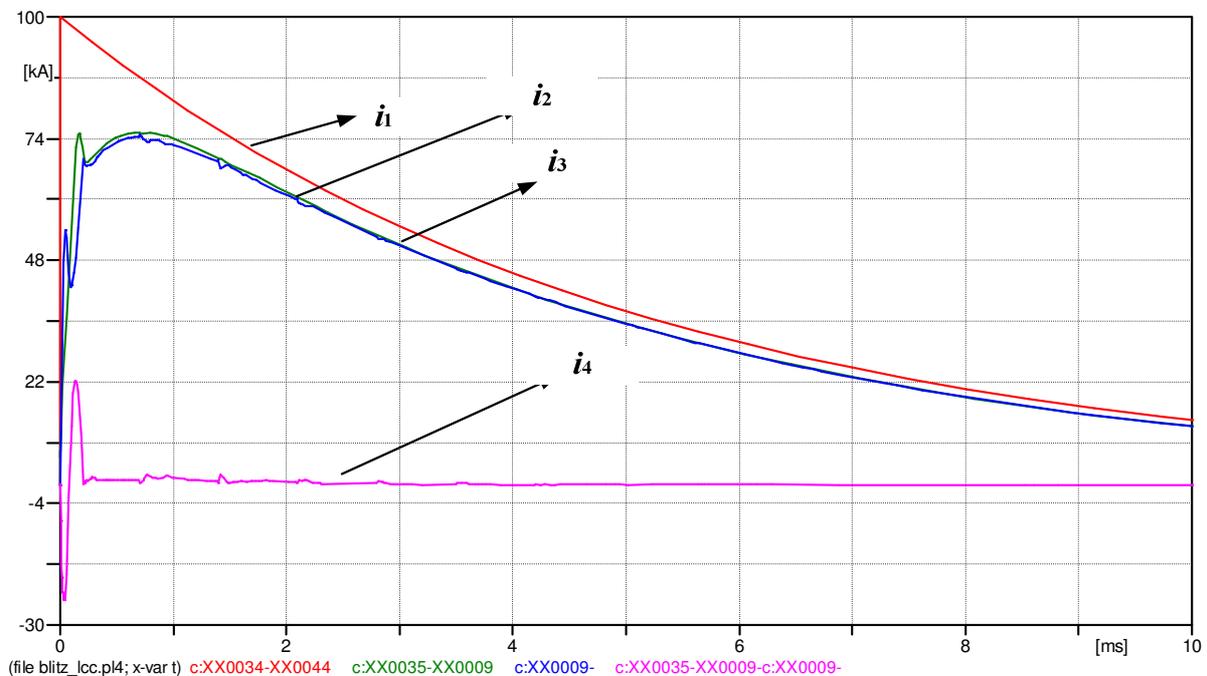


Abbildung 48: Energieaufnahme der Schirmüberspannungsableiter (Erdungswiderstand des betroffenen Mastes: 10Ω , Erdungswiderstand am Kabelübergang 1: 3Ω , R-Rot, S-Grün, T-Blau)

Aus Abb. 42 ist noch zu entnehmen, dass die in die Kabelschirme eindringende Stromwandlerwelle i_4 auch indirekt von der lokalen Erdung des betroffenen Freileitungsmastes beeinflusst wird. Dieser Einfluss wird durch dieselbe Berechnung, aber mit einem vergrößerten Erdungswiderstand von 20Ω am betroffenen Freileitungsmast aufgezeigt.

Abb.49 zeigt die neuen Verteilungen der Stromwandlerwellen. In diesem Fall ist ein rückwärtiger Durchschlag zu erkennen. Die in den Kabelschirmen entstehenden Stromwandlerwellen resultieren aus dem durch das Erdseil eindringenden Teil und dem von der Stromwandlerwelle auf den Kabelleitern induzierten Teil. Die Energieaufnahmen der Schirmüberspannungsableiter sind in Abb.50 dargestellt. Die Phase R nimmt wegen des rückwärtigen Durchschlages mehr Energie als die anderen Phasen auf und nähert sich der thermischen Grenze der Überspannungsableiter mit einer Bemessungsspannung von 9 kV . In diesem Fall sollten Überspannungsableiter mit einer höheren Bemessungsspannung von z.B. 12 kV ausgewählt werden.

Folgerung ist, dass für hinreichend gute Erdungen der Masten an den Kabelübergängen gesorgt werden muss.



**Abbildung 49: Verläufe der Stromwandlerwellen (Erdungswiderstand des betroffenen Mastes: 20Ω , Erdungswiderstand am Kabelübergang 1: $0,4 \Omega$)
 i_1 bis i_4 nach Abb.42**

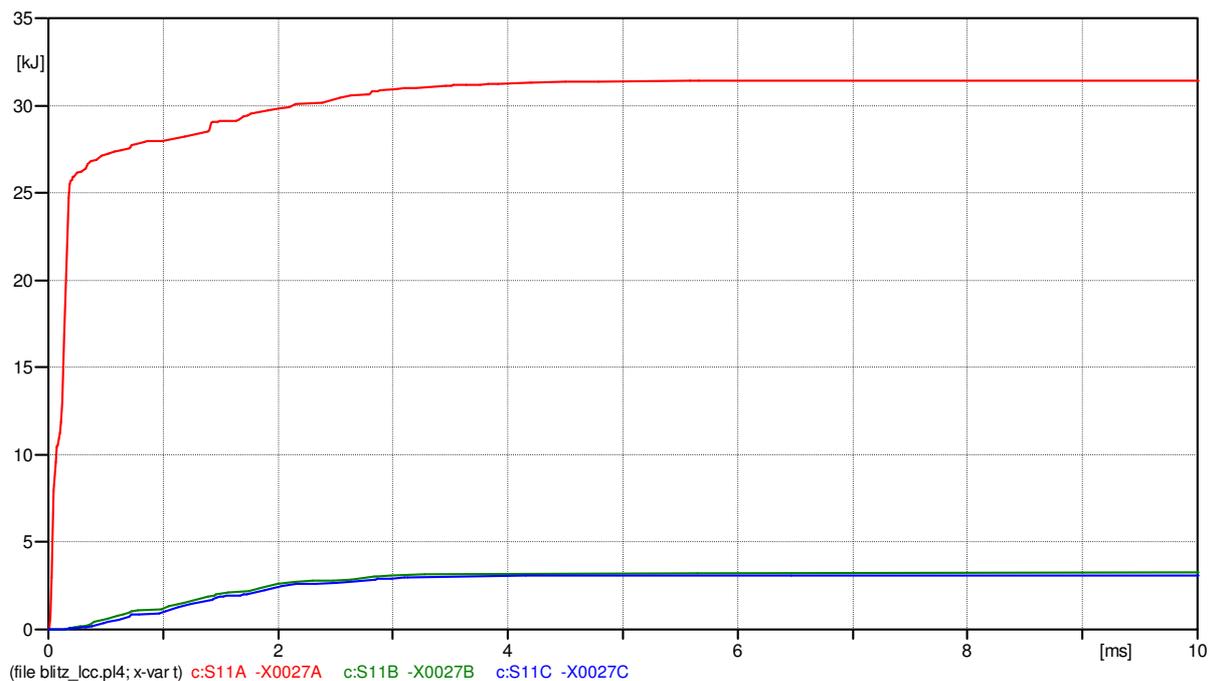


Abbildung 50: Energieaufnahme der Schirmüberspannungsableiter (Erdungswiderstand des betroffenen Mastes: 20Ω , Erdungswiderstand am Kabelübergang 1: $0,4 \Omega$, R-Rot, S-Grün, T-Blau)

5. Zusammenfassung

In dieser Studie werden wichtige Ausgleichvorgänge für die betrachtete Kabelanlage untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden wie folgt zusammengefasst:

- Die relative kurze Kabelstrecke verursacht stationär im Leerlaufzustand nur eine ganze leichte (0,6 %-) Spannungserhöhung gegenüber einer reinen Freileitung.
- Beim Einschaltvorgang wird die maximale Schaltüberspannung durch die Zwischenverkabelung reduziert. Die charakteristische Frequenz der Schaltüberspannungen verschiebt sich jedoch in niedrigere Bereiche (ca. 300-400 Hz),
- Einschaltvorgänge stellen generell keine besonderen Belastungen der Kabel oder auch der anderen Betriebsmitteln dar. Bei einem synchronen Schalten treten praktisch keine kritischen Überspannungen und Überströme auf. Selbst beim ganz selten auftretenden Wiedereinschalten der leerlaufenden Leitung können die Überspannungen durch Überspannungsableiter effektiv beherrscht werden.
- Wegen der relativ kurzen Strecke und ohne Einsatz der Kompensationsdrosseln sind keine kritische Belastungen bei Ausschaltvorgängen zu erwarten,
- Der Erdkurzschluss stellt ohne Schirmüberspannungsableiter eine kritische Belastung der Kabelschirme dar. Der Einsatz von Schirmüberspannungsableitern ist zwingend erforderlich.

- Ein Blitzeinschlag in die Leiterseile bewirkt generell keine kritische Belastungen der Kabelhauptisolierungen. Bei der Zwischenverkabelung wird die Kabelhauptisolierung stets weniger beansprucht als die angrenzende Freileitung.
- Die Tunnelverlegung ist günstig im Hinblick auf Naheinschläge in eine geerdete Anlage wie z.B. in einen nahe stehenden Baum.
- Blitzeinschläge in Freileitungsmaste oder Erdseile könnten erhebliche thermische Belastungen der Überspannungsableiter verursachen, wobei die Erdungsverhältnisse beim Freileitungsmast und am Kabelübergang eine entscheidende Rolle spielen. Mit den vorausgesetzten Daten werden keine kritischen Belastungen auftreten. Es ist jedoch zu empfehlen, dass ausführliche Berechnungen bei der Auswahl der Schirmüberspannungsableiter durchgeführt werden, wenn genauere Erdungsdaten wie z.B. Erdungswiderstand der Freileitungsmaste, Verlegung der Erdungsleiter in Tunnel bekannt sind und sich als ungünstiger als hier angenommen erweisen. Gegebenenfalls müssen Maßnahmen wie Auswahl der Überspannungsableiter mit hohem Energieaufnahmevermögen oder Schaltungen der Überspannungsableiter im Dreieck verwendet werden.
- Die 65-kV-Kabel werden bei Ausgleichvorgängen im 380-kV-Netz nicht kritisch beansprucht. Da die Schirme der 65-kV-Kabel bei Erdkurzschlüssen oder bei Blitzeinschlägen in geerdete Anlagen fast gleich wie bei den 380-kV-Systemen beansprucht werden, sollten sie auf dem gleichen Niveau wie die Schirme der 380-kV-Kabel geschützt werden.

6. Literatur

- | | | |
|-----|------------------------------|--|
| [1] | CIGRE WG C4-502 | Power System Technical Performance Issues
Related to the Application of Long HVAC Cables
CIGRE Technical Brochure 556, 2013 |
| [2] | H. Brakelmann
Sh. Ghaderi | Zwischenverkabelung der 380-kV-Leitungsverbindung
Chippis-Ulrichen
Studie im Auftrag Swissgrid AG, 08.2014 |
| [3] | ATP Website | www.emtp.org und www.eeug.org |
| [4] | T.Dong | Modulares Analysesystem für Grundsatzuntersuchungen
an langen Netzverbindungen mit Drehstrom-Hoch- und
Höchstspannungskabeln
Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2012 |