

# Herausforderungen an Erdungs- und Potentialausgleichssysteme von DC-Energieübertragungskabeln

**Martin Fürnschuß<sup>1</sup>, Moritz Pichler<sup>2</sup>, Robert Schürhuber<sup>3</sup>, Herwig Renner<sup>4</sup>,  
Stephan Pack<sup>5</sup>, Ernst Schmutzner<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 18/1, 8010 Graz, [martin.fuernschuss@tugraz.at](mailto:martin.fuernschuss@tugraz.at)

<sup>2</sup>KPMG Advisory GmbH, Porzellangasse 51, 1090 Wien, [moritzpichler@kpmg.com](mailto:moritzpichler@kpmg.com)

<sup>3</sup>Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 18/1, 8010 Graz, [robert.schuerhuber@tugraz.at](mailto:robert.schuerhuber@tugraz.at)

<sup>4</sup>Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 18/1, 8010 Graz, [herwig.renner@tugraz.at](mailto:herwig.renner@tugraz.at)

<sup>5</sup>Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 18/1, 8010 Graz, [pack@tugraz.at](mailto:pack@tugraz.at)

<sup>6</sup>Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 18/1, 8010 Graz, [schmutzner@tugraz.at](mailto:schmutzner@tugraz.at)

## **Kurzfassung:**

Kabelgebundene Gleichstrom-Energieübertragung stellt für die erforderlichen Erdungs- und Potentialausgleichssysteme eine besondere Herausforderung dar, da zukünftig Übertragungsleistungen im Gigawattbereich über mehrere 100 km lange Strecken übertragen werden sollen. Ziel ist es, dass derartige elektrische Anlagen sicher und zuverlässig funktionieren; so sollte bei einem Blitzeinschlag in eine Anlagenkomponente oder bei einem Kurzschluss niemand gefährdet werden und die Anlage keinen dauerhaften Schaden erleiden. Zur Bewältigung dieser Herausforderung tragen Erdungs- und Potentialausgleichssysteme im Zuge einer Kabelstrecke wesentlich bei.

In dieser Arbeit wird eine 300 km lange HVDC-Energieübertragungsstrecke mit 2 GW Übertragungsleistung in der Spannungsebene 500 kV mittels EMTP-RV<sup>1</sup> nachgebildet und die transienten Vorgänge bei verschiedenen Fehlerfällen untersucht. Weiters wird die Wirkung eines Begleiterders und dessen Vorteile gegenüber einer Variante, bei der nur die Kabelschirme geerdet sind, aufgezeigt.

Aus ökonomischer Sicht spielt die Anzahl der Muffengruben, wo u.a. der Kabelschirm aufgelegt wird, eine wesentliche Rolle. Als Kriterien für die maximale Anzahl der Muffengruben gilt zum einen die maximal produzierbare Kabellänge und zum anderen die Schirm-Erde-Spannung, welche einen bestimmten Wert im Normalbetrieb und im Fehlerfall nicht überschreiten darf. Bei Einhaltung dieser beiden Kriterien zeigt sich, dass die Anzahl der Muffengruben reduziert werden kann, wenn ein Begleiterder beigelegt wird. Ebenso bringt der

---

<sup>1</sup> Electromagnetic Transient Programm von EMTP Alliance, <https://www.emtp-software.com/en/about-us/emtp-alliance> (Letzter Zugriff: 31.01.2020)

Begleiterder auch noch Vorteile hinsichtlich Personen- und Sachgüterschutz und dient dem Blitzschutz für die Kabeltrasse.

**Keywords:** HVDC-Energieübertragung, Kabeltrasse, Erdung, MMC, Muffengrube, transiente Vorgänge, Blitz, Begleiterder

## 1 Modellbeschreibung

Zur Untersuchung der transienten Vorgänge im Verlauf der Kabelstrecke bei verschiedenen Fehlerfällen wird in EMTP-RV nachfolgende, schematisch dargestellte HVDC-Energieübertragungsstrecke modelliert.

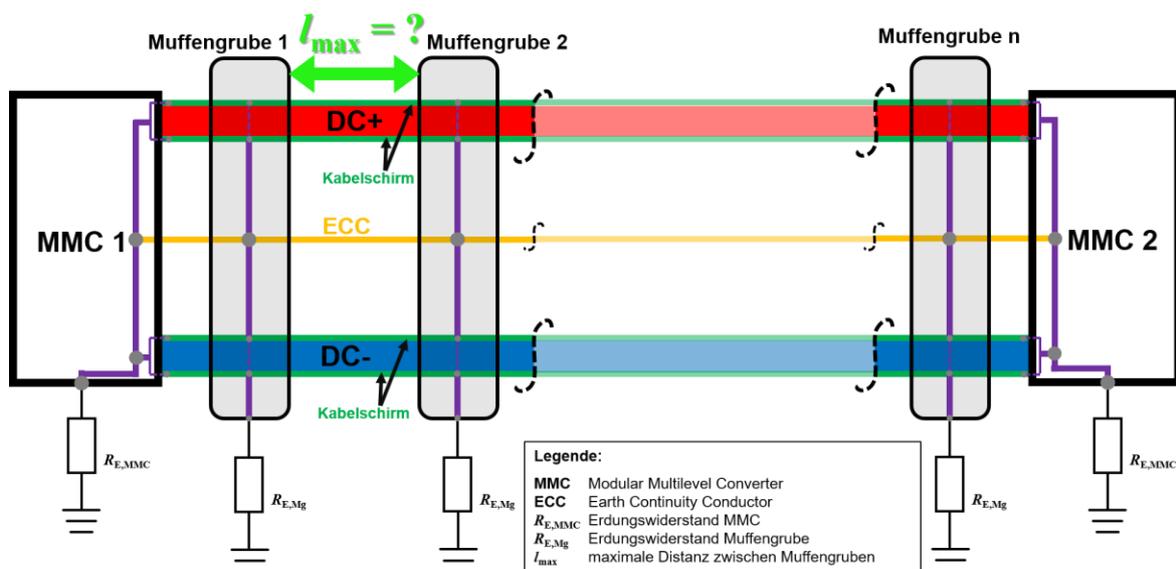


Abbildung 1: Schematische Darstellung der HVDC-Energieübertragungsstrecke

Ziel ist es, den maximalen zulässigen Abstand zwischen den Muffengruben  $l_{max}$ , sowohl mit als auch ohne Beilegung eines Begleiterders (engl. ECC... Earth Continuity Conductor) zu berechnen. Die HVDC-Energieübertragungsstrecke weist eine Länge von 300 km, eine Nennspannung von 500 kV und eine Übertragungsleistung mit 2 GW auf. Als maßgebendes Kriterium für  $l_{max}$  gilt die höchste zulässige Spannung zwischen dem äußeren Kabelschirm und Erdreich  $U_{Sch}$ .

### 1.1 MMC (Modular Multilevel Converter)

Die im Modell nachgebildeten MMC-Stationen sind ident aufgebaut und speisen bzw. beziehen Energie aus einem Drehstromnetz. Der Nennstrom wird mit 2000 A, die Arminduktivität mit  $L_{arm} = 70$  mH und die äquivalente Armkapazität mit  $C_{arm} = 11$   $\mu$ F festgelegt. Der Aufbau erfolgt mit Halbbrücken, da bei dieser Art der Kurzschlussstrom maximal wird. Tritt ein Kurzschluss unmittelbar nach einer MMC-Station auf, so wird der Kurzschlussstrom im ersten Moment vorrangig durch die aktive Modulkapazität gespeist, wodurch sich ein hoher Stromgradient ergibt (ca. 8 pu/ms). Nach der Fehlerdetektion werden sämtliche Module gesperrt, das Drehstromnetz treibt einen Kurzschlussstrom durch die Freilaufdioden, wodurch sich der Kurzschlussstrom auf ca. 9 pu erhöht bis schlussendlich der drehstromseitig installierte Schutz auslöst. Die Modellierung wurde auf Basis der in [1] vorgestellten Methode durchgeführt.

## 1.2 Muffengruben

Es liegt nahe, dass der Aufbau der Muffengruben einen entscheidenden Einfluss auf den maximal zulässigen Abstand zwischen Kabelschirm und dem umgebenden Erdreich, d.h. auf die Schirmspannung  $U_{Sch}$  hat. Der Schirm der DC-Kabel wird auf die Erdungs- bzw. Potentialausgleichsanlage der Muffengrube aufgelegt. Neben diesen aufwändigen Muffengruben mit entsprechenden Erdungsanlagen werden aufgrund der begrenzten Kabelsegmentlänge Muffen ohne entsprechenden baulichen Anlagen gesetzt.

Für den Fall, dass ein ECC den DC-Kabeln beigelegt wird, ist dieser ebenso mit der Erdungs-/PA-Anlage der Muffengrube verbunden. Die zwei unterschiedlichen Aufbauten der Erdungsanlage der Muffengruben sind in Abbildung 2 (ohne ECC) und Abbildung 3 (mit ECC) dargestellt.

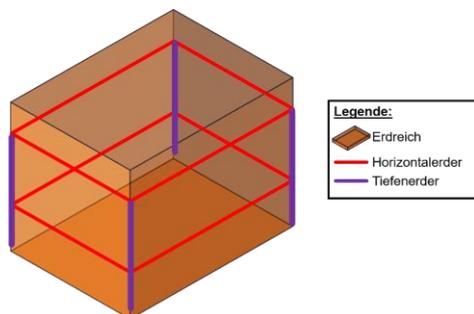


Abbildung 2: Erdungsanlage einer Muffengrube ohne ECC

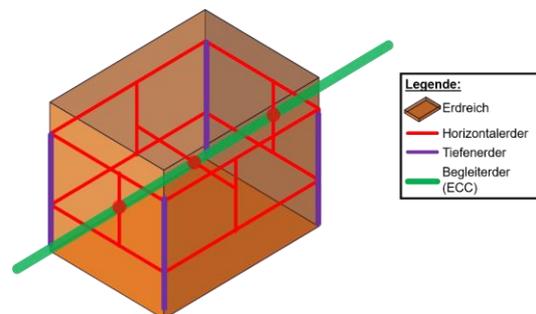


Abbildung 3: Erdungsanlage einer Muffengrube mit ECC

In beiden Fällen betragen die Abmessungen der Muffengruben des HVDC-Kabelsystems 10 m x 20 m und liegen vollständig im Erdreich. Die Erdungsanlagen sind aus zwei rechteckförmigen Horizontalertern aufgebaut, welche an ihren Ecken mit Tiefenertern vertikal verbunden sind. Der obere Ring liegt in 0,8 m Tiefe und der untere in 2,8 m Tiefe. Zur Verbesserung der Erdungsanlagen der Muffengruben haben die Tiefenerter den doppelten Querschnitt wie die Horizontalerter und sind bis auf 7,8 m unter die Erdoberfläche eingeschlagen.

Wird nun der ECC in die Muffengrube eingeführt, so wird dieser vermascht (horizontal und vertikal) an die Erdungs-/PA-Anlage des Muffenbauwerks angeschlossen.

Die Wirksamkeit der Erdungs-/PA-Anlage der Muffengrube auf die Schirmspannung sowie den Schritt-/Berührungsspannungsverlauf im Bereich der Muffengrube wird durch den Erdungswiderstand  $R_{E,Mg}$  beschrieben. Dieser hängt einerseits von dem Aufbau der Erdungsanlage und andererseits vom spezifischen Bodenwiderstand  $\rho$  ab. Ein geringer spezifischer Bodenwiderstand spricht für einen elektrisch gut leitfähigen Boden, im Umkehrschluss ein hoher spezifischer Bodenwiderstand ist charakteristisch für einen elektrisch schlecht leitfähigen Boden. Der Erdungswiderstand einer elektrischen Anlage sollte möglichst klein sein; ist dies der Fall, so verteilt sich ein auftretender Erdstrom voluminöser über das Erdreich und der Potentialverlauf an der Erdoberfläche folgt einer flacheren Kurve.

Zur Berechnung des maximalen Abstands zwischen den Muffengruben bei unterschiedlichen Bodenverhältnissen, wird der spezifische Bodenwiderstand  $\rho$  nach Tabelle 1 variiert und mit OBEIN<sup>2</sup> der Erdungswiderstand der jeweiligen Konfiguration berechnet.

Tabelle 1: Erdausbreitungswiderstände der Muffenbauwerke  $R_{E,Mg}$  bei unterschiedlichen Erdausbreitungswiderständen  $\rho$

	Ohne ECC	Mit ECC
$\rho$	$R_{E,Mg}$	$R_{E,Mg}$
$\Omega\text{m}$	$\Omega$	$\Omega$
100	3,66	3,61
300	10,98	10,84
1000	36,66	36,14

Die in Tabelle 1 eingetragenen Ergebnisse von  $R_{E,Mg}$  zeigen, dass erstens dieser vom spezifischen Bodenwiderstand  $\rho$  linear abhängt und zweitens, dass trotz erdfühleriger Verlegung des ECCs und vermaschten Integration dieses in die Erdungsanlage der Muffengrube der Erdungswiderstand der Muffengrube nur geringfügig kleiner wird. Dies hat einen wesentlichen Einfluss auf die Spannungsverteilung entlang des Kabelschirmes und somit auch auf die Differenzspannung zwischen Kabelschirm und umgebenden Bezugspotential (ferne Erde). Diese Differenzspannung ist maßgebend für die notwendige Spannungsfestigkeit des Isoliermaterials des Kabels, das zwischen Kabelschirm und umgebenden Erdreich liegt.

### 1.3 Fehlerfälle

Aufgrund von elektromagnetischen Beeinflussungen und Reflexionseffekten steigt bei transienten Vorgängen die Schirm-Erde-Spannung  $U_{Sch}$  an. Solche transienten Vorgänge können zum einen im Normalbetrieb der elektrischen Anlage und zum anderen im Fehlerfall auftreten. Mit dem gegenständlichen Modell werden für die in Kapitel 1.2 definierten Szenarien folgende transienten Vorgänge (Fehlerfälle) untersucht:

- 1) Blitzeinschlag an einer MMC-Station mit einer Blitzstoßspannung (1,2  $\mu\text{s}$  / 50  $\mu\text{s}$ , Scheitelwert  $\hat{U} = 1,5$  MV)
- 2) Schalthandlung an einer MMC-Station mit einer Schaltstoßspannung (250  $\mu\text{s}$  / 2500  $\mu\text{s}$ , Scheitelwert  $\hat{U} = 1,1$  MV)
- 3) Kurzschluss Innenleiter-Schirm-Erdreich zwischen zwei Muffengruben bei Nennlast (2 GW)
- 4) Direkter Blitzeinschlag in das Erdreich im Bereich der Kabeltrasse (Variation des Scheitelwerts des Blitzstoßstromes, Kurvenform: 1,2  $\mu\text{s}$  / 50  $\mu\text{s}$ )

Bei den Fehlerfällen 1, 2 und 3 wird die maximal zulässige Schirm-Erde Spannung  $U_{Sch}$  mit 15 kV festgelegt, welcher in einem Bereich liegt, der oftmals von Kabelherstellern vorgegeben wird. Bei Fehlerfall 4 ergibt sich der maximale Blitzstoßstrom, der den Kabelmantel nicht perforiert, durch die Isolationsfestigkeit des äußeren Kabelmantels. Bei dem modellierten

---

<sup>2</sup> Programm zur Berechnung der ohmschen Beeinflussung von Erdungsanlagen  
Eigenentwicklung des Instituts für Elektrische Anlagen und Netze der Technischen Universität Graz, 2020

Kabel besteht der äußere Kabelmantel aus VPE (Vernetztes Polyethylen) mit einer Materialstärke von rund 5 mm. Aufgrund von am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz durchgeführten Versuche im Bereich der Isolationsfestigkeit von VPE bei Blitzeinschlägen kann die Blitzstoßspannungsfestigkeit mit  $50 \text{ kV/mm}$  angenommen werden, wodurch sich für den äußeren Kabelmantel eine Blitzstoßspannungsfestigkeit von  $250 \text{ kV/mm}$  ergibt.

## 2 Berechnungsergebnisse

### 2.1 Schalthandlungen in einer MMC-Station

Tritt in einer MMC-Station eine Schaltüberspannung auf, so wird im Kabelschirm eine Spannung induziert. Hierzu wird bei Nennlast eine Schaltstoßspannung am Pluspol (DC+) des MMC überlagert und die Schirm-Erde-Spannung berechnet. Die höchsten Spannungswerte treten hierbei unmittelbar nach der MMC-Station auf, somit ist der Abstand zwischen den Muffenbauwerken kaum von Bedeutung.

#### 2.1.1 Schalthandlung in einer MMC-Station, ohne ECC

Wie jede elektrische Energieversorgungsanlage besitzt auch die MMC-Station eine Erdungsanlage, deren Wirksamkeit über den Erdungswiderstand  $R_{E,MMC}$  beschrieben wird. Die Anforderungen an solche elektrischen Anlagen hinsichtlich der Erdung sind sehr hoch (siehe zB ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 [2]), wodurch der Erdungswiderstand sehr nieder sein muss. Bei den gegenständlichen Untersuchungen wird, wie in Tabelle 2 dargestellt,  $R_{E,MMC}$  kontinuierlich gesteigert, bis der vorgegebene Grenzwert von  $U_{Sch} = 15 \text{ kV}$  überschritten wird.

Tabelle 2: Maximale Schirm-Erde-Spannungen (DC+ und DC-) bei Schaltstoßspannung an DC+ in Abhängigkeit des Erdungswiderstandes des MMC ( $R_{E,MMC}$ ), ohne ECC

$R_{E,MMC}$	$U_{Sch, DC+}$	$U_{Sch, DC-}$
$\Omega$	kV	kV
0,1	3,54	3,67
0,2	7,06	7,19
0,3	10,61	10,63
0,4	13,85	13,99
<b>0,5</b>	<b>17,08</b>	<b>17,20</b>

Beträgt  $R_{E,MMC} = 0,5 \Omega$ , so kommt es zu einer Überschreitung der zulässigen Schirm-Erde Spannung von 15 kV; der zeitliche Verlauf der Schirmspannung ist für diesen Fall in Abbildung 4 dargestellt.

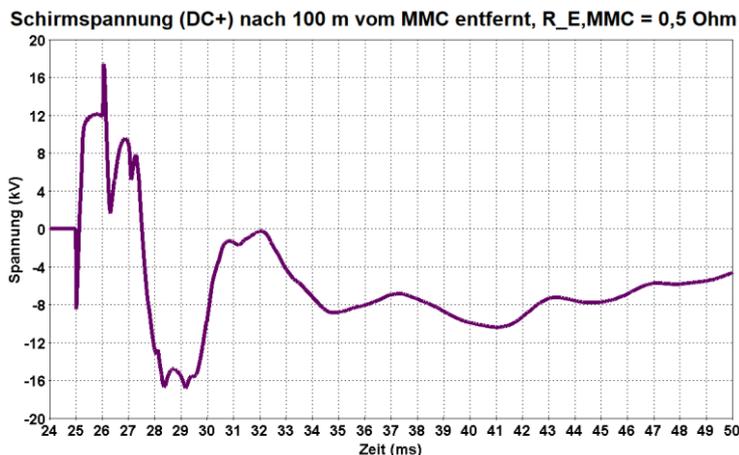


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf von  $U_{Sch}$  bei einer Schaltstoßspannung an DC+, 100 m nach MMC-Station,  $R_{E,MMC} = 0,5 \Omega$ , ohne ECC

Betrachtet man Abbildung 4, so tritt die Schalthandlung bei 25 ms auf, der Maximalwert der Schirmspannung tritt bei 100 m Entfernung von der MMC-Station nach 26,1 ms ein.

### 2.1.2 Schalthandlung an einer MMC-Station, mit ECC

Nun wird der Kabelstrecke ein Begleiterder (ECC) beigelegt und dieselbe Schaltstoßspannung wie in Kapitel 2.1.1 dem Pluspol (DC+) an einer MMC-Station überlagert. Die Ergebnisse der Schirmspannungen bei unterschiedlichen Erdungswiderständen der MMC-Station gibt Tabelle 3 wieder.

Tabelle 3: Maximale Schirm-Erde-Spannungen (DC+ und DC-) bei Schaltstoßspannung an DC+ in Abhängigkeit des Erdungswiderstandes des MMC ( $R_{E,MMC}$ ), mit ECC

$R_{E,MMC}$	$U_{Sch, DC+}$	$U_{Sch, DC-}$
$\Omega$	kV	kV
0,1	3,53	3,66
0,2	7,05	7,18
0,3	10,60	10,48
0,4	13,82	13,94
<b>0,5</b>	<b>16,54</b>	<b>17,03</b>

Ebenso wird nach 100 m von der MMC-Station entfernt wieder für den hier gewählten höchsten Erdungswiderstand der MMC-Station ( $R_{E,MMC} = 0,5 \Omega$ ) die Schirmspannung in Abhängigkeit der Zeit mit nachfolgender Abbildung 5 dargestellt:

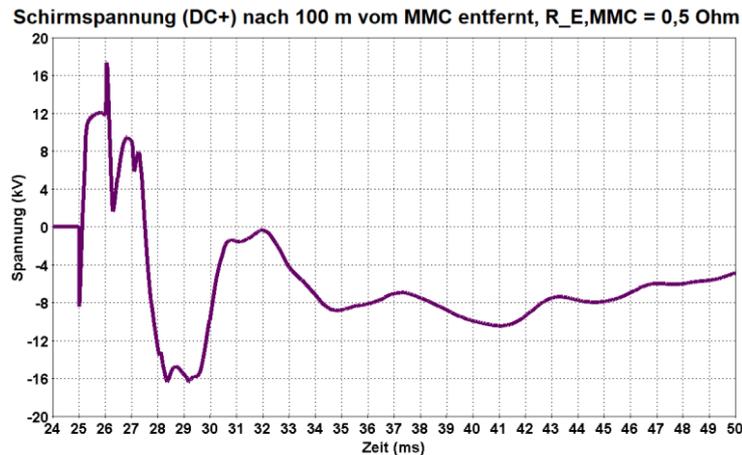


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf von  $U_{Sch}$  bei einer Schaltstoßspannung an DC+, 100 m nach MMC-Station,  $R_{E,MMC} = 0,5 \Omega$ , mit ECC

Vergleicht man die zwei Kurvenverläufe der Schirmspannung an DC+ nach 100 m für  $R_{E,MMC} = 0,5 \Omega$  (einmal ohne ECC, Abbildung 4 und einmal mit ECC, Abbildung 5) so haben sie nahezu den identen Verlauf, jedoch mit dem Unterschied, dass die Schirmspannung bei Beilegung eines ECCs geringfügig kleiner ist. Selbiges gilt für die Schirmspannungen bei den geringeren Erdungswiderständen der MMC-Station (vergleiche Tabelle 2 mit Tabelle 3). Da die Kurvenform der Schirmspannung mit ECC nahezu ident mit jener ohne ECC ist und die Maximalwerte der Schirmspannung sich mit ECC nur geringfügig reduzieren, kann daraus geschlossen werden, dass der ECC bei Schalthandlungen in einer MMC-Station kaum eine reduzierende Wirkung der Schirmspannung besitzt. Primären Einfluss auf die Schirmspannung hat bei diesem Fehlerfall der Erdungswiderstand der MMC-Station.

### 2.1.3 Blitzeinschlag an einer MMC-Station

Ein Blitzeinschlag stellt eine höhere transiente Belastung des Kabelschirms als die Belastung durch eine Schalthandlung an einer MMC-Station dar. Zum einen ist bei diesen Untersuchungen der Maximalwert der Spannung um 0,4 MV höher (vgl. Kapitel 1.3) und zum anderen die Stirnzeit und die Rückenhalbwertszeit kürzer. Nachfolgend wird eine Blitzstoßspannung (Charakteristika siehe Kapitel 1.3) bei Nennlast der Übertragungsstrecke DC+ überlagert, der Erdungswiderstand der MMC-Station variiert und die Schirmspannung mit und ohne einer Beilegung eines ECCs untersucht.

### 2.1.4 Blitzeinschlag an einer MMC-Station, ohne ECC

Wird kein ECC entlang der Kabelstrecke gelegt, so überschreitet die Schirmspannung, wie in Tabelle 4 ersichtlich, den zulässigen Wert von 15 kV bereits bei einem Erdungswiderstand der MMC-Station von  $R_{E,MMC} = 0,4 \Omega$  deutlich nach 100 m Kabelstrecke.

Tabelle 4: Maximale Schirm-Erde-Spannungen (DC+ und DC-) bei Blitzstoßspannung an DC+ in Abhängigkeit des Erdungswiderstandes des MMC ( $R_{E,MMC}$ ), ohne ECC

$R_{E,MMC}$ $\Omega$	$U_{Sch, DC+}$ kV	$U_{Sch, DC-}$ kV
0,1	-4,74	-5,02
0,2	-9,52	-9,80
0,3	-14,18	-14,46
<b>0,4</b>	<b>-18,72</b>	<b>-19,00</b>

Erhöht man den Erdungswiderstand der MMC-Station auf  $0,5 \Omega$ , um Vergleiche mit der Schalthandlung zu ziehen, so ergibt sich für die Schirmspannung der Spannungsverlauf nach Abbildung 6:

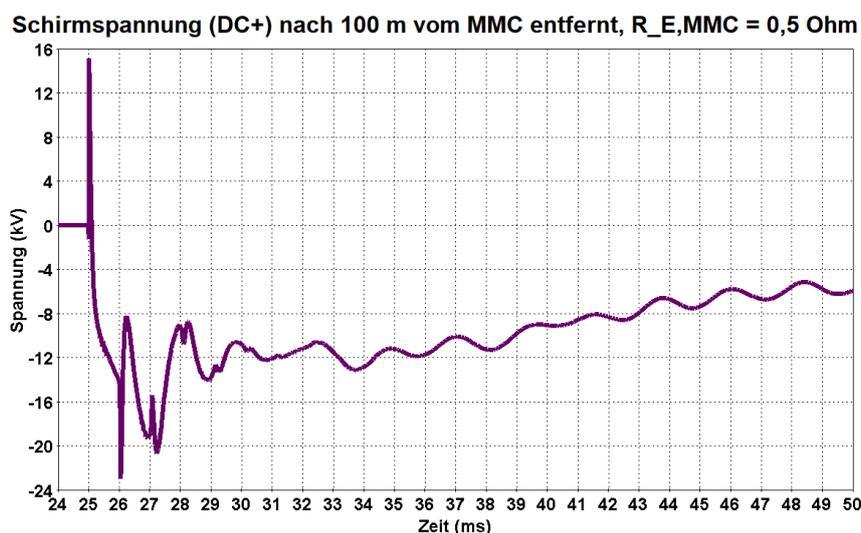


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf von  $U_{Sch}$  bei einer Blitzstoßspannung an DC+, 100 m nach MMC-Station,  $R_{E,MMC} = 0,5 \Omega$ , ohne ECC

Die Schirmspannung nimmt ihren Höchstwert nach etwas über 1 ms (Fehlereintritt bei 25 ms) an und beträgt nahezu -24 kV und ist somit ca. 9 kV (absolut) höher als bei einer der Überlagerung der Schaltstoßspannung. Dies bekräftigt die Aussage, dass eine Blitzstoßspannung eine höhere transiente Beanspruchung der Kabelisolierungen bedeutet.

### 2.1.5 Blitzeinschlag an einer MMC-Station, mit ECC

Wird wiederum ein ECC der Kabelstrecke beigelegt und wird dieser samt dem Kabelschirm mit der Erdungsanlage der MMC-Station verbunden, so ergeben sich für die Schirmspannung die maximalen Werte 100 m von der MMC-Station entfernt in Abhängigkeit des Erdungswiderstandes der MMC-Station nach Tabelle 5:

Tabelle 5: Maximale Schirm-Erde-Spannungen (DC+ und DC-) bei Blitzstoßspannung an DC+ in Abhängigkeit des Erdungswiderstandes des MMC ( $R_{E,MMC}$ ), mit ECC

$R_{E,MMC}$	$U_{Sch, DC+}$	$U_{Sch, DC-}$
$\Omega$	kV	kV
0,1	-4,72	-5,02
0,2	-9,48	-9,77
0,3	-14,05	-14,31
<b>0,4</b>	<b>-18,63</b>	<b>-18,97</b>

Wie bei keiner Beilegung eines ECCs (siehe Tabelle 4), beträgt der maximal zulässige Erdungswiderstand der MMC-Station  $R_{E,MMC} = 0,3 \Omega$ ; hierbei wird die Schirmspannung von 15 kV (absolut) noch unterschritten. Der Worst-Case hinsichtlich der Schirmspannung tritt wieder bei  $R_{E,MMC} = 0,5 \Omega$  auf und ist zeitlich in Abbildung 7 dargestellt:

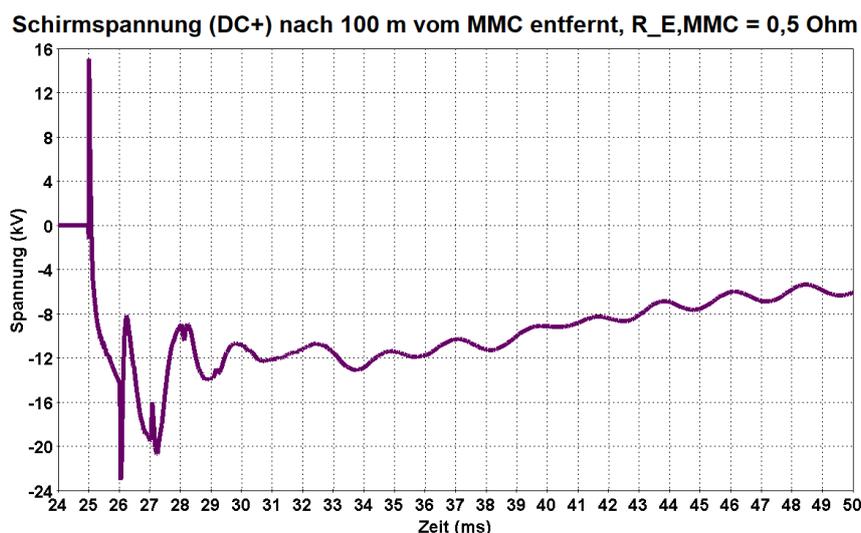


Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf von  $U_{Sch}$  bei einer Blitzstoßspannung an DC+, 100 m nach MMC-Station,  $R_{E,MMC} = 0,5 \Omega$ , mit ECC

Abbildung 7 zeigt, dass die zulässige Schirmspannung wiederum um 9 kV überschritten wird; der ECC hat wie bei einer Schalthandlung kaum eine Reduktionswirkung auf die Schirmspannung. Primär ist die Höhe der Schirmspannung (Absolutwert) abhängig von dem Erdungswiderstand der MMC-Station.

## 2.2 Direkter Blitzeinschlag in das Erdreich der Kabeltrasse

Atmosphärische Entladungen schlagen regelmäßig nicht nur in bauliche Anlagen, sondern auch in den Erdboden oder Bäume ein. Hierbei wird zwar nicht unmittelbar die Hauptisolierung des Kabels gefährdet, aber der äußere Kabelmantel kann perforiert werden. In der Folge schädigt eindringende Feuchtigkeit das innere Isolationssystem und führt so zum Isolationsversagen.

Zur Untersuchung der Auswirkungen durch einen Blitzeinschlag in die Kabeltrasse ist ein numerisches Simulationsmodell für den Erdboden, den äußeren Kabelmantel und Kabelschirm, sowie einen Begleiterder erstellt worden.

Die Untersuchungen zeigen, dass Kabelmäntel bei direkten Blitzeinschlägen unmittelbar über dem Kabel sogar bei Blitzströmen unter 20 kA gefährdet sind (Perforation des Kabelmantels), wenn kein Begleiterder verlegt wird. Bei einem solchen Blitzeinschlag sorgt der Begleiterder für eine gleichmäßigere Abstimmung des Potentials an der Trasse und so für eine geringere Spannungsbeanspruchung des Mantels. Entsprechend den Untersuchungen mit Begleiterder wird der äußere Kabelmantel erst von Blitzströmen größer 70 kA spannungsmäßig überlastet und somit perforiert.

Bei einem direkten Blitzeinschlag in die Erde über dem Kabel hat der tatsächliche Wert des spezifischen Bodenwiderstands keinen signifikanten Einfluss auf die Spannungsbeanspruchung des äußeren Kabelmantels. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass der zehnfache Wert des spezifischen Bodenwiderstands nur zu einer dreiprozentigen Erhöhung des Perforationsrisikos führt.

Aus diesen Berechnungen ergibt sich die unbedingte Empfehlung, bei Gefährdung durch Blitzeinschläge in die Kabeltrasse einen Begleiterder über den Energiekabeln vorzusehen.

## 2.3 Kurzschluss entlang der Kabelstrecke

Tritt zwischen zwei Muffengruben bei Nennlast ein Kurzschluss zwischen Innenleiter, Kabelschirm und Erdreich auf, so ist es wünschenswert, dass das Kabel auf einer so geringen Länge wie nur möglich dauerhaft beschädigt wird. Der Kurzschlussstrom teilt sich auf das Erdreich und den Kabelschirm auf; somit wird im Kabelschirm wiederum eine Spannung induziert, welche den zulässigen Wert von 15 kV nicht überschreiten darf. Umso mehr Muffengruben entlang der Kabelstrecke vorhanden sind, in denen der Kabelschirm aufgelegt wird und mit der Erdungsanlage der Muffengruben verbunden ist, desto öfters kann ein Teil des Kurzschlussstromes, welcher im Kabelschirm fließt, in das Erdreich abgeleitet werden. In diesem Kapitel soll gezeigt werden, wie groß die Distanz zwischen den Muffengruben sein darf, ohne dass die maximale Schirmspannung von 15 kV überschritten wird. Weiters wird der Erdungswiderstand der Muffengruben laut Tabelle 1 variiert.

Der ungünstigste Bereich für einen Kurzschluss an einem Kabel liegt genau zwischen zwei Muffengruben, da hier die Distanz bis zur nächsten Schirmauflegung am längsten ist und in weiterer Folge die wirksame Impedanz den höchsten Wert annimmt. Ebenso ist der Fehlerort für eine Worst-Case-Betrachtung nicht unmittelbar nach einer MMC-Station zu definieren, da sonst der geringe Erdungswiderstand der MMC-Station wirkt. Bei den im Folgenden dargestellten Kurzschlussauswirkungen ist  $R_{E,MMC} = 0,1 \Omega$  und der Fehlerort mit 70 km nach einer MMC-Station festgelegt worden.

### 2.3.1 Kurzschluss entlang der Kabelstrecke, ohne ECC

Tritt ein Kurzschluss an DC+ ein, sind die Schirmspannungen unmittelbar im Bereich der Fehlerstelle am höchsten. Wird kein ECC verlegt und die Muffengrube liegt in elektrisch gut leitfähigen Boden ( $\rho = 100 \Omega$ , vgl. Tabelle 1), so ergibt sich unmittelbar neben dem Fehlerort folgender zeitlicher Verlauf der Schirmspannungen (von DC+ und DC-) in Abbildung 8:

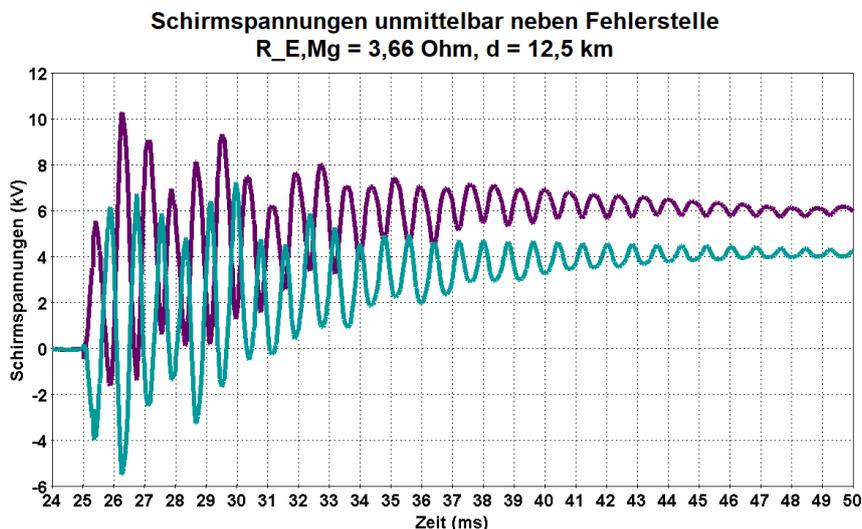


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der Schirm-Erde-Spannungen (violett DC+, türkis DC-) unmittelbar neben der Fehlerstelle bei  $d = 12,5 \text{ km}$  und  $R_{E,Mg} = 3,66 \Omega$ , ohne ECC

Der Fehler tritt nach 25 ms ein und unmittelbar danach steigen die Schirmspannungen an, bis das System eingeschwungen ist und die Spannungen nahezu konstant bleiben.

Die in Abbildung 8 betrachtete Konfiguration stellt das Optimum dar, so kann die Distanz zwischen den Muffengruben bei dem besten Erdausbreitungswiderstand der Muffengruben von  $R_{E,Mg} = 3,66 \Omega$  nicht weiter gesteigert werden, ohne dass die Schirmspannung die zulässigen 15 kV überschreitet. Wird kein Begleiterder verlegt, so beträgt die maximal zulässige Strecke zwischen den Muffengruben  $l_{max} = 12,5 \text{ km}$ .

Bei einer Verschlechterung der Erdungsverhältnisse der Muffengruben steigen, wie in Tabelle 6 ersichtlich, einerseits die Schirmspannungen an, aber andererseits sinkt der Strom, welcher durch die Erdungsanlage der Muffengruben vom Schirm in das Erdreich lokal in der zum Fehlerort nächstgelegenen Muffengrube  $I_{E,Mg}$  abgeführt wird.

Tabelle 6: Maximale Distanz zwischen den Muffengruben  $d$  in Abhängigkeit des Erdungswiderstandes der Muffengruben  $R_{E,Mg}$  und maximale Schirmspannungen (Absolutwerte) unmittelbar neben der Fehlerstelle sowie Erdstrom in der Muffengrube  $I_{E,Mg}$ , ohne ECC

$R_{E,Mg}$	$d$	$U_{Sch, DC+}$	$U_{Sch, DC-}$	$I_{E,Mg}$
$\Omega$	km	kV	kV	A
36,66	7,5	14,50	13,40	380
10,98	12,5	11,40	9,30	850
3,66	12,5	10,20	7,10	1440

Für den Worst-Case ( $R_{E,Mg} = 36,66 \Omega$ ) ist der zeitliche Verlauf des Erdstromes in Abbildung 9 dargestellt. Es ist damit zu rechnen, dass sich Personen im Bereich der Muffengrube aufhalten können, somit sind die Schritt- und Berührungsspannungen im Bereich der Muffengruben von

Interesse. Diese dürfen die zulässigen normativ festgelegten Grenzwerte zum Schutz von Personen und Sachgütern nicht überschreiten. Bestimmend für die Schritt- und Berührungsspannungen ist der maximale Erdstrom in der Muffengrube  $I_{E,Mg}$ . Zieht man diesen für den Worst-Case heran und berechnet man 1-m-Differenzspannungen, mit denen im Bereich der Muffengrube die Schritt- und Berührungsspannungen bestimmt werden können, so ergibt sich Abbildung 10.

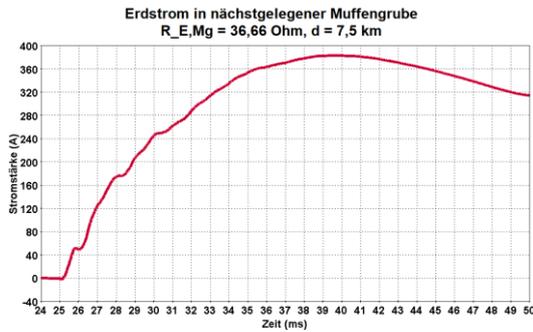


Abbildung 9: Erdstrom bei Kurzschluss entlang der Kabelstrecke in nächstgelegener Muffengrube, Worst-Case, ohne ECC

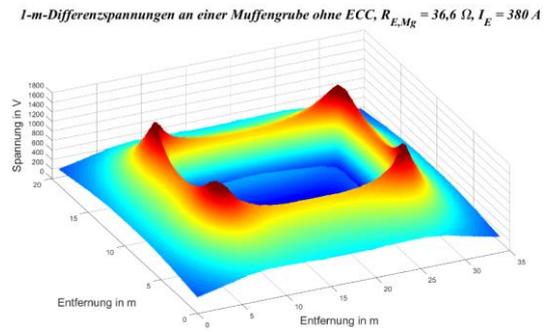


Abbildung 10: 1-m-Differenzspannungen bei Kurzschluss entlang der Kabelstrecke der nächstgelegenen Muffengrube, Worst-Case, ohne ECC

Es zeigt sich, dass die Schritt- und Berührungsspannungen im Bereich der Muffengrube Werte bis zu 1600 V annehmen können. Diese Spannungswerte könnten bei zu langen Fehlerabschaltzeiten laut länderspezifischen Regularien bereits zu hoch sein. Eine Möglichkeit der Reduktion der 1-m-Differenzspannung wäre eine Verbesserung der Erdungsanlage der Muffengrube durch ergänzende Tiefenerder und Steuererder, da somit der Erdwiderstand sinken würde und somit auch die Schritt- und Berührungsspannungen.

### 2.3.2 Kurzschluss entlang der Kabelstrecke, mit ECC

Bei Verlegung eines ECCs entlang der Kabelstrecke nimmt dieser im Kurzschlussfall einen Teil des Fehlerstromes auf (siehe Abbildung 12) und Folge dessen reduziert sich der Kurzschlussstrom im Kabelschirm wodurch schlussendlich die Schirmspannung sinkt. Somit ist es möglich, die maximale Distanz zwischen den Muffengruben zu erhöhen. Als Beispiel ist in Abbildung 11, für den laut Tabelle 1 definierten kleinsten spezifischen Bodenwiderstand ( $\rho = 100 \Omega\text{m}$ ), die Schirmspannung in unmittelbarer Nähe an der Fehlerstelle dargestellt.

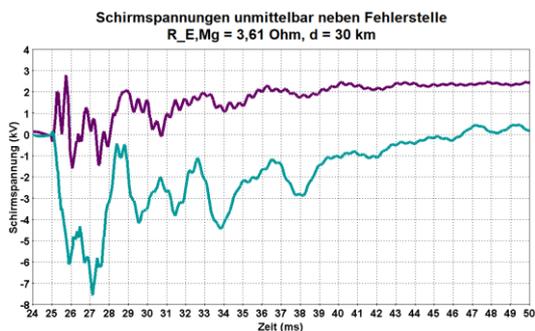


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der Schirm-Erde-Spannungen (violett DC+, türkis DC-) unmittelbar neben der Fehlerstelle bei  $d = 30 \text{ km}$  und  $R_{E,Mg} = 3,61 \Omega$ , mit ECC

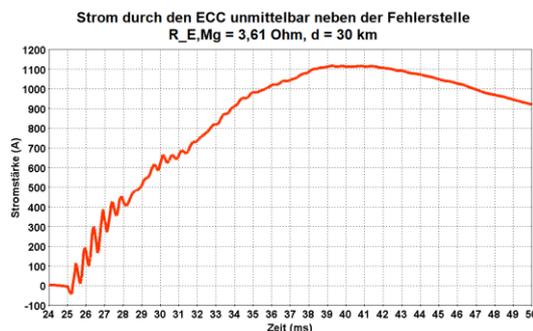


Abbildung 12: Strom durch den ECC, unmittelbar neben der Fehlerstelle

Trotz einer Distanz zwischen den Muffengruben von 30 km beträgt die maximale Schirmspannung ca. 7,4 kV (Absolutwert).

Nachfolgende Tabelle 7 zeigt, dass selbst bei dem Worst-Case ( $R_{E,Mg} = 36,14 \Omega$ ) die Schirmspannung kaum höher ist als bei dem Best-Case ( $R_{E,Mg} = 3,61 \Omega$ ). Die Distanz zwischen den Muffengruben kann theoretisch noch über 30 km gesteigert werden, jedoch aus Wartungsgründen (zB für Messungen) wird sie nicht weiter gesteigert; die maximale Distanz zwischen zwei Muffengruben bei Beilegung eines Begleiterders wird deshalb mit  $l_{max} = 30,0 \text{ km}$  festgelegt.

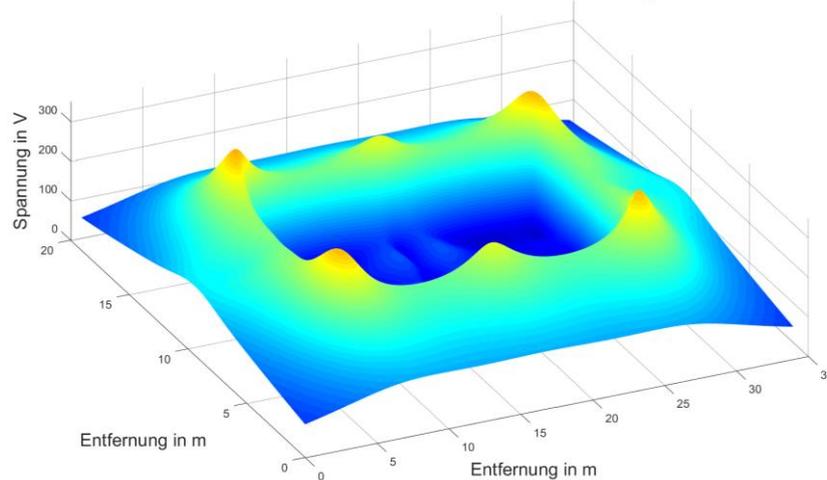
Tabelle 7: Schirmspannungen (Absolutwerte) unmittelbar neben der Fehlerstelle sowie Erdstrom in der Muffengrube  $I_{E,Mg}$ , mit ECC in Abhängigkeit des Erdwiderstandes der Muffengruben  $R_{E,Mg}$  bei  $d = 30 \text{ km}$

$R_{E,Mg}$	$d$	$U_{Sch, DC+}$	$U_{Sch, DC-}$	$I_{E,Mg}$	$I_{ECC}$
$\Omega$	km	kV	kV	A	A
36,14	30	2,80	7,51	95	1120
10,84	30	2,78	7,48	231	1120
3,61	30	2,67	7,41	372	1120

Verglichen mit der Konfiguration ohne ECC (siehe Tabelle 6) wird der Erdstrom bei Mitverlegung eines ECCs durch die Stromaufteilung auf die Erdungsanlage der Muffengrube und den ECC deutlich reduziert; der ECC verteilt den Strom auf die weiter entfernten Muffengruben, wobei ein Teilstrom bis zur MMC-Station zurückgeführt wird.

Durch die kleineren Erdströme durch die Erdungsanlage der dem Fehlerort nächstgelegenen Muffengrube und den etwas kleineren Erdwiderstand der Muffengrube reduzieren sich für den Worst-Case ( $R_{E,Mg} = 36,14 \Omega$ ) die 1-m-Differenzspannungen, dargestellt in nachfolgender Abbildung 13, im Vergleich zu der Konfiguration ohne ECC deutlich.

*1-m-Differenzspannungen an einer Muffengrube mit ECC,  $R_{E,Mg} = 36,1 \Omega$ ,  $I_E = 95 A$*



*Abbildung 13: 1-m-Differenzspannungen bei Kurzschluss entlang der Kabelstrecke in nächstgelegener Muffengrube, Worst-Case, ohne ECC*

So erreichen die Schritt- und Berührungsspannungen in der Konfiguration mit ECC Spitzenwerte im Bereich von 200 V, jedoch ohne ECC liegen diese im Bereich um 1600 V.

## 2.4 Ökonomische Vorteile durch einen ECC

Ein Vergleich der Berechnungsergebnisse für die maximalen Distanzen zwischen zwei Muffengruben im Kurzschlussfall (siehe Kapitel 2.3.1 und Kapitel 2.3.2) führt dazu, dass eine Beilegung des ECCs auch die Investitionskosten einer HVDC-Energieübertragungsstrecke reduzieren kann. So wären im besten Falle, bei der Konfiguration ohne ECC entlang der 300 km langen HVDC-Energieübertragungsstrecke, 22 Muffengruben zu errichten und bei Beilegung eines ECCs nur 8.

Weiters müssten bei schlecht leitfähigen Boden die Erdungsanlagen der Muffengruben mit wesentlich höherem Aufwand ausgelegt werden, um die Schritt- und Berührungsspannungen im Fehlerfall zu beherrschen.

Ebenso wird durch den ECC die Ausfallwahrscheinlichkeit der Kabelstrecke bei einem Blitzeinschlag reduziert.

### 3 Zusammenfassung

In dieser Arbeit ist eine 300 km lange HVDC-Energieübertragungsstrecke in der Spannungsebene von 500 kV mittels EMTP-RV nachgebildet worden um die transienten Vorgänge bei verschiedenen Fehlerfällen zu untersuchen.

Mit der Simulation eines Blitzeinschlages und einer Schalthandlung in einer MMC-Station wird verdeutlicht, dass der Erdungsanlage der MMC-Station erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden muss, da sowohl bei Schalthandlungen als auch bei einem Blitzeinschlag in die MMC-Station nicht nur die MMC-Station selbst, sondern auch die DC-Kabel geschützt werden müssen. In beiden Fällen zeigt sich, dass der Erdungswiderstand der MMC-Station entscheidend ist, die Distanz zwischen den der MMC-Station nächstliegenden Muffengruben jedoch nicht; der Erdungswiderstand der MMC-Station sollte sich im Bereich von  $0,1 \Omega$  befinden.

Im Kurzschlussfall kann durch Beilegung eines ECC die

- Distanz zwischen den Muffengruben erhöht werden, da die
- Schirmspannungen reduziert werden und ebenso die
- Schritt- und Berührungsspannungen im Fehlerfall im Bereich der Muffengruben

reduziert werden.

Es zeigt sich auch, dass bei einer HVDC-Energieübertragungsstrecke es durchaus sinnvoll ist einen ECC in die Kabeltrasse beizulegen, da in Relation zu den Kosten des ECCs die Vorteile, welche er im Normalbetrieb und in den Fehlerfällen gegenüber einer Anlage ohne ECC mit sich bringt, überwiegen.

Durch einen ECC wird auch im Falle eines Kurzschlusses entlang der Kabelstrecke der Personen- und Sachgüterschutz im Bereich der Muffengruben erhöht, er bietet einen höheren Schutz bei einem Blitzeinschlag für die Kabel und der Abstand zwischen den Muffengruben kann größer gewählt werden als bei Verzicht auf einen ECC, da die Schirmspannung bei einem Kurzschluss in unmittelbarer Nähe deutlich niedrigere Werte annimmt.

### 4 Literaturverzeichnis

- [1] Zheng Xu, Huangqing Xiao, Liang Xiao, Zheren Zhang, *DC Fault Analysis and Clearance Solutions of MMC-HVDC Systems*, MDPI energies, 2018
- [2] ÖVE/ÖNORM EN 62305-3, *Blitzschutz Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen*, 2012-07-01, *Isolationskoordination, Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen*, 2010-10-01
- [3] Kuchler Andreas, *Hochspannungstechnik, Grundlagen – Technologie – Anwendungen*, 3. Auflage, 2009
- [4] Muratovic Redzo, *Wechselseitige niederfrequente induktive Beeinflussung von Kabelsystemen*, Dissertation, Technische Universität Graz - Institut für Elektrische Anlagen und Netze, 2019