

Blitzeinschlagsanalyse für rückwärtige Überschläge einer Hybridleitung

Matthias Nilges, Andrzej Mackow und Mustafa Kizilcay
Universität Siegen
Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung
Siegen, Deutschland
matthias.nilges@student.uni-siegen.de

Abstract—A new method to transfer energy over short and long distances is to use hybrid lines. In this paper a lightning surge analysis for backflashovers on overhead transmission lines with one DC and three AC systems on the same tower is considered. Lightning strikes are the most common source of failures on transmission systems and are not considered for hybrid lines. The main aim is to get essential information about the behavior of the HVDC system due to a backflashover. We simulate a lightning stroke into a hybrid line using EMTP-ATP. The results clearly show that the 110-kV AC systems provide protective effects for the HVDC system. Therefore, it is concluded that the backflashover performance of HVDC systems is better on AC/DC hybrid lines, compared to identically constructed towers with just one HVDC system installed.

Index Terms—backflashover, lightning surge analysis, hybrid line, transmission tower model, EMTP-ATP

I. EINLEITUNG

Durch den stetig wachsenden Energiebedarf und eine Verschiebung der Energieerzeugung von fossilen hin zu erneuerbaren Energieressourcen ist eine Umstrukturierung der Energieversorgungsnetze unumgänglich. Dabei müssen nicht nur viele neue Erzeuger angeschlossen, sondern auch immer größere Transportwege abgedeckt werden. Da dies mit der herkömmlichen Wechselstromübertragung nur bedingt möglich ist, wird immer häufiger Gleichstromübertragung eingesetzt. Besonders in dicht besiedelten Gebieten stellt der Bau neuer Trassen Probleme dar. Hier können Hybridleitungen Abhilfe schaffen, bei denen sowohl Wechselstrom- als auch Gleichstromsysteme auf einem Mast angebracht sind. Auch in Deutschland werden derzeit mehrere Gleichstromtrassen entwickelt, um die im Norden des Landes produzierte Windenergie in den Süden zu transportieren. Eine dieser Trassen soll in großen Bereichen auf bestehenden Masten mit Wechselstromsystem angebracht werden [1]. Das bedeutet, es werden nicht nur vorhandene Masten, sondern auch bereits installierte, teilweise abgeschaltete Leitungssegmente verwendet, die zuvor zur Stromübertragung auf der 380-kV-Ebene vorgesehen waren. Abb. 1 zeigt solch einen Mast, bei dem ein 380-kV-System durch ein HGÜ-System ersetzt wurde.

Aufgrund der unerwarteten, hohen Überspannungen zählen bereits bei herkömmlichen Übertragungsstrecken Blitzeinschläge zu den Hauptursachen von Netzausfällen. Daher wer-

den regelmäßig neue Studien zu unterschiedlichen Einschlags-Szenarien durchgeführt. Durch die relativ langen Übertragungsstrecken und den typischerweise hohen Mastaufbau von Hybridleitungen steigt die Wahrscheinlichkeit von Blitzeinschlägen weiter an und macht deren Berücksichtigung bei der Planung von Hybridleitungen unumgänglich. Der Fokus von Blitzeinschlags-Analysen in der Höchstspannungsebene liegt vor allem in der Betrachtung rückwärtiger Überschläge aufgrund von Blitzeinschlägen in die Spitzen der Masten. Die Wahrscheinlichkeit direkter Einschläge in Leiterseile ist für diese Ebene vergleichsweise klein, da die Übertragungssysteme im Allgemeinen durch Erdseile geschützt sind.

Vor allem für den gewitterreichen asiatischen Raum existieren bereits viele Studien zu rückwärtigen Überschlägen auf der Hochspannungsebene [2], [3], diese behandeln jedoch keine Hybridleitungen. Die in [4] vorgestellte Blitzeinschlaganalyse einer Hybridleitung behandelt das Thema zwar intensiv, aufgrund des stark abweichenden Mastaufbaus lassen sich die Ergebnisse jedoch nicht auf die in Deutschland verwendeten Masten übertragen.

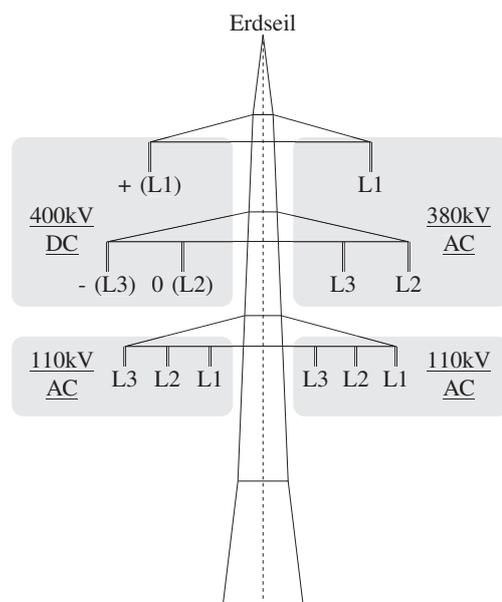


Abbildung 1. Aufbau eines Beispielmastes

Die Zielsetzung dieses Papers besteht daher darin, grundlegende Aussagen bezüglich des Blitzeinschlagverhaltens von deutschen Hybridleitungen mit vier und mehr Systemen zu erhalten. Grundlage hierfür ist die Nachbildung eines Freileitungsstücks mit EMTP-ATP (ElectroMagnetic Transients Program, Version Alternative Transients Program [5]), welches einem in Deutschland neu geplanten Hybridleitungs-Abschnitts entspricht. Der grundsätzliche Aufbau der Masten entspricht dabei dem des Beispielmastes aus Abb. 1 und wird entsprechend auf Grundlage der bereits vorhandenen Infrastruktur realisiert. Zusätzlich weisen die Masten Verlängerungen von bis zu 10m auf. Die Spannweite zwischen den Masten variiert zwischen 250m und 350m. Anhand eines beispielhaften Leitungsabschnitts wird für die einzelnen Systeme der minimale Blitzstoßstrom ermittelt, der über den Isolatoren einen rückwärtigen Überschlag hervorruft.

II. MODELLIERUNG

Um bei der Simulation die größtmögliche Beanspruchung für die Isolatoren durch einen rückwärtigen Überschlag hervorzurufen, müssen Blitzeinschläge in die Mastspitzen angenommen werden. Bei einem Einschlag in das Erdseil teilt sich der Blitzstrom in nahezu gleiche große Ströme auf, die von der Einschlagstelle zu den beiden benachbarten Masten laufen. Während die Welle zum Mast läuft, treten bereits erste Einkopplungen in die benachbarten Systeme auf, welche die Spannungsdifferenz über den Isolatoren frühzeitig vermindert.

Die Blitzeinschläge in die Spitze der Freileitungsmasten werden in diesem Paper mithilfe von EMTP-ATP simuliert. In Abb. 2 ist ein vereinfachtes Modell des entsprechenden Simulationsaufbaus dargestellt. Die Position der Blitzstromquelle variiert abhängig vom untersuchten Mast. In Abb. 2 ist ein Einschlag in Mast 9 nachgebildet.

Da die Welle des Blitzstoßstroms am Erdungswiderstand mit negativem Vorzeichen reflektiert wird und somit beim

Zurücklaufen die Spannung begrenzt, spielt die Höhe des Mastes eine entscheidende Rolle für die maximale Spannung auf den Traversen. Die Laufzeiten der Wellen über das Erdseil zu den Nachbarmasten liegen jedoch deutlich über den Laufzeiten entlang der Masten. Eine bedeutende Beeinflussung des Überschlagverhaltens aufgrund zurücklaufender Wellen über das Erdseil kann daher ausgeschlossen werden. Somit ist die Betrachtung einzelner Masten mit jeweils abweichender Masthöhe ausreichend für die Beurteilung des Überschlagverhaltens einer Freileitungsstrecke. In Tab. I sind die Masten der hier betrachteten Freileitungsstrecke zusammengefasst, in deren Mastspitzen ein Blitzeinschlag simuliert wird.

A. Mastnachbildung

Zur Ermittlung der Spannungen auf den Traversen bei einem Blitzeinschlag in einen Freileitungsmast ist die elektrische Nachbildung des Mastes notwendig. Hierfür sind mehrere Modelle entwickelt worden [6]–[12]. Für die in diesem Paper durchgeführten Untersuchungen kommt das in Abb. 3 dargestellte Multistory Tower Model nach [12] zum Einsatz, da dieses besonders für hohe Masten sehr gut geeignet ist [2]. Bei diesem Modell wird jeder Mastabschnitt mithilfe eines einfachen Wanderwellenmodells und einer R-L-Parallelschaltung zur Dämpfungsnachbildung modelliert. Zur Bestimmung der Elemente werden nach [3] für die Wanderwellenwiderstände

TABELLE I. BEI DER BLITZEINSCHLAGSANALYSE BETRACHTETE MASTEN

Mastrnr.	Masttyp	Höhe
1	Tragmast	57, 25m
5	Tragmast	62, 25m
7	Abspannmast	56, 25m
10	Tragmast	62, 25m
15	Tragmast	67, 25m

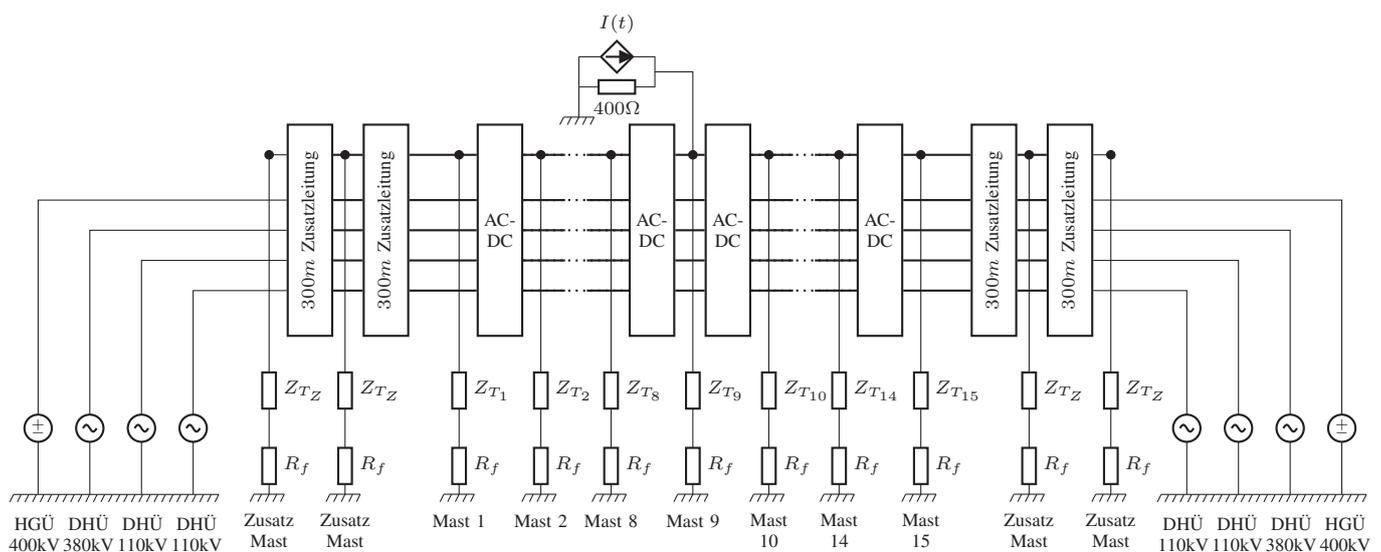


Abbildung 2. Simulationsaufbau

die in Tab. II dargestellten Erfahrungswerte herangezogen und die Widerstände und Induktivitäten wie folgt berechnet:

$$R_i = \Delta R_i \cdot x_i \quad , \quad (1)$$

$$L_i = 2 \frac{h}{c_0} R_i \quad , \quad (2)$$

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \frac{2Z_i}{h - x_4} \cdot \ln\left(\frac{1}{\alpha}\right) \quad , \quad (3)$$

$$\Delta R_4 = \frac{2Z_4}{h} \cdot \ln\left(\frac{1}{\alpha}\right) \quad . \quad (4)$$

Der Blitzdämpfungsfaktor α liegt bei diesem Modelltyp bei $\alpha = 0,89$. c_0 ist die Lichtgeschwindigkeit, mit der sich die Welle auf dem Mast ausbreitet. Die Erdungswiderstände der Masten werden jeweils mit 10Ω angenommen.

B. Überschlagsmodell

Auch zur Bestimmung von Überschlügen existieren bereits mehrere Modelle [13]–[17]. In diesem Paper kommt als Überschlagsmodell die Leader-Development-Methode von Motoyama [17] zum Einsatz, da sich diese nach [18] für lange Isolatoren als gut geeignet herausgestellt hat. Diese Methode betrachtet den gesamten zeitlichen Entstehungsprozess eines Leaders (Lichtbogen der aufgrund eines Überschlags entsteht), bis dieser vollständig durchgeschlagen ist oder aufgrund zu niedriger Spannung zusammenbricht.

Der Entstehungsprozess beginnt mit dem Aufbau eines Feldes aufgrund der anliegenden Spannung über dem Luftspalt der Länge D . Nachdem ein ausreichendes Feld mit

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} U(t) dt > \begin{cases} 400 \frac{kV}{m} \cdot D + 50kV & I > 0 \\ 460 \frac{kV}{m} \cdot D + 150kV & I < 0 \end{cases} \quad . \quad (5)$$

aufgebaut ist, beginnt der Leader mit der Geschwindigkeit

$$v_{L_{ave}} = 2,5 \frac{m^2}{Vs} \left(\frac{U(t)}{D - 2x_{L_{ave}}} - 750 \frac{kV}{m} \right) \quad (6)$$

von beiden Endpunkten jeweils auf die Länge

$$x_{L_{ave}} = \int v_{L_{ave}} dt \quad (7)$$

zu wachsen. Treffen die beiden Teile des Leaders bei der Hälfte des Luftspalts aufeinander, ist der Durchschlag erfolgt:

$$x_{L_{ave}} > \frac{D}{2} \quad . \quad (8)$$

TABELLE II. EMPFOHLENE WERTE FÜR BLITZEINSCHLAG ANALYSEN IN JAPAN

Systemspannung [kV]	Blitzstrom [kA]	Wellenimpedanz [Ω]		Erdungswiderstand [Ω]
		Z_{1-3}	Z_4	
1100	200	130	90	10
500	150	220	150	10
275	100	220	150	10
154(110)	60	220	150	10
77(66)	30,40	220	150	10-20

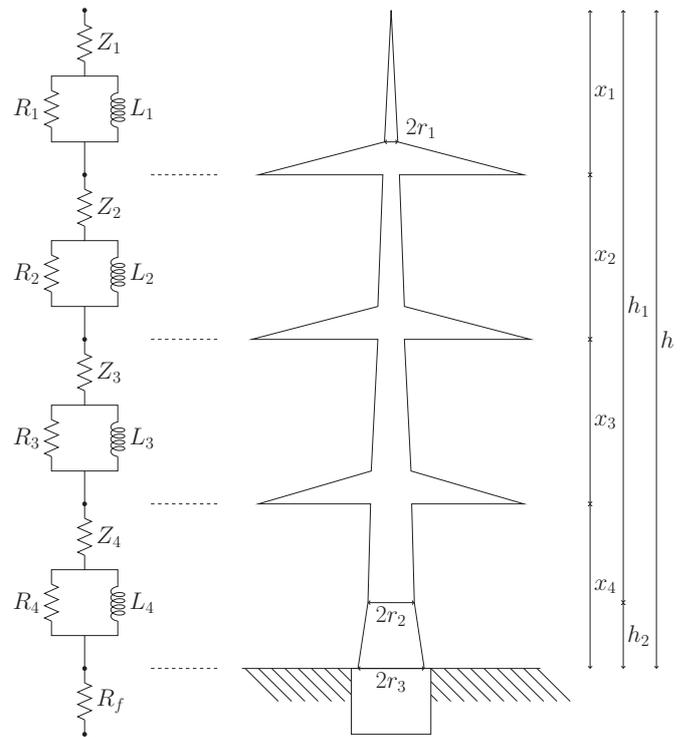


Abbildung 3. Multistory Transmission Tower Model

Fällt hingegen während des Leaderaufbaus die Spannungsdifferenz über dem Luftspalt unter den Grenzwert

$$U(t) < 750 \frac{kV}{m} \cdot (D - 2x_{L_{ave}}) \quad , \quad (9)$$

bricht der Lichtbogen zusammen.

Diese Gleichungen werden mithilfe der MODELS-Umgebung in EMTP-ATP implementiert. Der eigentliche Überschlag wird durch einen Kurzschluss mithilfe eines vom Überschlagsmodell gesteuerten Schalters realisiert. In Abb. 4 ist dieser Aufbau dargestellt. Die Länge des Luftspalts, d.h. die Schlagweite der Isolatoren können Tab. III entnommen werden.

C. Blitznachbildung

Zur Blitznachbildung wird das Blitzstrommodell nach CIGRE-Empfehlung verwendet [16], [19]. Die Anstiegs- und Rückenhalbwertszeit ist hierbei von der Amplitude abhängig. Zur einfachen Betrachtung ist bei der in diesem Paper verwendeten Quelle jedoch nur die Amplitude variabel. Alle weiteren Elemente sind gemäß Tab. IV fest vorgegeben.

Für den Blitzstrom werden im Folgenden nur negative Ströme betrachtet. Zum einen, weil negativ geladene Blitze

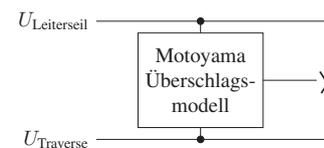


Abbildung 4. Modell zur Nachbildung eines rückwärtigen Überschlags

TABELLE III. LÄNGE UND SCHLAGWEITE DER ISOLATOREN

	System	Länge	Schlagweite
Tragmast	HGÜ	4200mm	2940mm
	380kV	4200mm	2940mm
	110kV	2370mm	965mm
Abspannmast	HGÜ	7200mm	3400mm
	380kV	7200mm	3400mm
	110kV	3200mm	1150mm

mit hoher Amplitude häufiger als positive geladene Blitze mit gleicher Amplitude auftreten. Zum anderen befindet sich der positive Pol der HGÜ-Leitung auf der obersten Traverse. Da auf der obersten Traverse aufgrund längerer Laufzeiten und Dämpfungen höhere Spannungen als auf der mittleren Traverse erreicht werden, erhält man bei einem negativen Blitzstoßstrom eine höhere Spannungsdifferenz auf der kritischeren obersten Traverse.

D. Leitungsmodell

Die Leitungen werden mithilfe des in EMTP-ATP integrierten Bergeron-Modells nachgebildet [20]. Dabei werden die Modelldaten für eine Frequenz von 400kHz ermittelt. Da gemäß Tab. I auch Einschläge in die Masten 1 und 15 simuliert werden, sind auf beiden Seiten der Simulationsstrecke zwei zusätzliche Leitungsabschnitte und Masten angefügt. Diese gewährleisten bei der Simulation eines Einschlags in Mast 1 bzw. 15 einen korrekten Spannungs- und Stromverlauf entlang des Erdseils zu den beiden benachbarten Masten. Die exakten Aufbauten der Zusatzleitungen und -masten spielen für den korrekten Verlauf keine erhebliche Rolle, sofern diese den Größenordnungen des Simulationsabschnitts entsprechen.

III. SIMULATIONSERGEBNIS

A. 110-kV-Systeme

Die Simulation liefert bei den 110-kV-Systemen für den minimalen Blitzstoßstrom, der einen Überschlag hervorruft, das Ergebnis aus Tab. V. Mit Abstand den höchsten Blitzstoßstrom für einen rückwärtigen Überschlag benötigt der Abspannmast (Mast 7). Dieser hohe Blitzstoßstrom lässt sich jedoch schnell durch die größeren Schlagweiten der Isolatoren auf einem Abspannmast erklären. Es zeigt sich ebenfalls, dass mit steigender Höhe der Masten der minimale Blitzstoßstrom für einen Überschlag niedriger ausfällt. Dieses Verhalten ist jedoch zu erwarten. Durch die längere Laufzeit auf höheren Masten wird die Spannung an den Traversen von der zurücklaufenden Welle

TABELLE IV. DATEN ZUR BLITZSTROMNACHBILDUNG

Amplitude	variabel
Anstiegszeit	$3,6\mu\text{s}$
Rücklaufzeit	$75\mu\text{s}$
maximale Steilheit	$26\text{kA}/\mu\text{s}$

TABELLE V. MINIMALER BLITZSTOSSSTROM DER EINEN ÜBERSCHLAG AN DEN 110-KV-ISOLATOREN HERVORRUFT

Mastnr.	Amplitude	
	System A	System B
1	-77kA	-81kA
5	-74kA	-73kA
7	-88kA	-95kA
10	-73kA	-74kA
15	-71kA	-72kA

erst verzögert begrenzt. Ein kritischer Spannungsverlauf wird somit schon bei niedrigeren Blitzstoßströmen erzeugt.

B. HGÜ-System

Für das HGÜ-System stellt sich das Ergebnis für den minimalen Blitzstoßstrom gemäß Tab. VI ein. Dabei kommt es lediglich zu einem Überschlag auf den positiven HGÜ-Leiter. Überschläge auf die Leiter der mittleren Traverse finden nicht statt, da das Feld nicht die nach (5) benötigte Stärke zum Entstehen eines Leaders erreicht. Die Stoßstromamplituden sind beim HGÜ-System im Vergleich zu den 110-kV-Systemen bedeutend höher. Folglich sind bei den Strömen aus Tab. VI die Überschläge auf die 110-kV-Systeme zeitlich vor dem Überschlag auf den positiven HGÜ-Leiter zu erwarten.

Wie zu erkennen ist, benötigt auch bei der Betrachtung des HGÜ-Systems der Abspannmast mit Abstand den höchsten Blitzstoßstrom für einen rückwärtigen Überschlag. Für die Tragmasten dreht sich jedoch die Reihenfolge des minimalen Blitzstoßstroms in Bezug auf die Amplitude um.

IV. AUSWERTUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE

Wie in Kapitel III beschrieben, ist die Reihenfolge der Masten in Bezug auf die minimalen Blitzstoßströme umgekehrt, obwohl dies wegen der längeren Laufzeiten nicht zu erwarten ist. Der Grund für die unerwartete Reihenfolge ist im Überschlagsverhalten der 110-kV-Systeme begründet. Da gemäß Abb. 5 die Zeitpunkte der Überschläge auf der 110-kV-Ebene, $t_{ü_5}^{110}$ und $t_{ü_{15}}^{110}$, vor dem Zeitpunkt des Überschlags auf den HGÜ-Leiter, $t_{ü_5}^{\text{HGÜ}}$, erfolgen, verursachen sie dabei einen Spannungseinbruch über dem Mast, der sich positiv auf das Überschlagsverhalten des HGÜ-Systems auswirkt.

Um die genauen Auswirkungen der Überschläge auf der 110-kV-Ebene zu klären, muss zunächst betrachtet werden, wann ein Leader gemäß der Leader-Development-Methode zündet bzw. wann er vorzeitig erlischt. Der Vorgang des Zündens des Leaders auf Mast 5 wird in Abb. 6 betrachtet. In dieser ist die Spannungsdifferenz über dem Isolator des

TABELLE VI. MINIMALER BLITZSTOSSSTROM DER EINEN ÜBERSCHLAG AN DEN HGÜ-ISOLATOREN HERVORRUFT

Mastnr.	Amplitude
1	-171kA
5	-176kA
7	-225kA
10	-184kA
15	-195kA

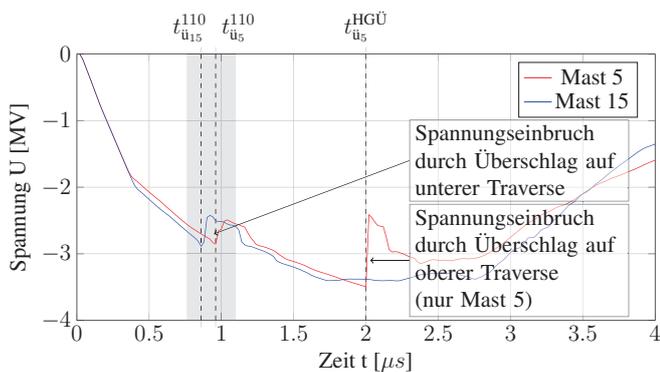


Abbildung 5. Spannungsverläufe an der oberen Traverse von Mast 5 und 15 ($\hat{I} = 180kA$)

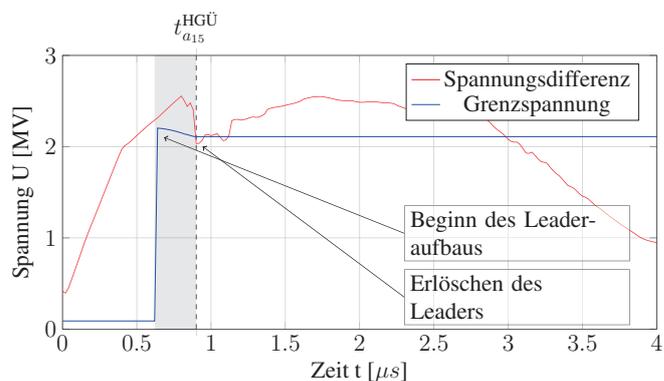


Abbildung 7. Erlöschen des Leaders zwischen der obersten Traverse und dem Leiterseil auf Mast 15 ($\hat{I} = 180kA$)

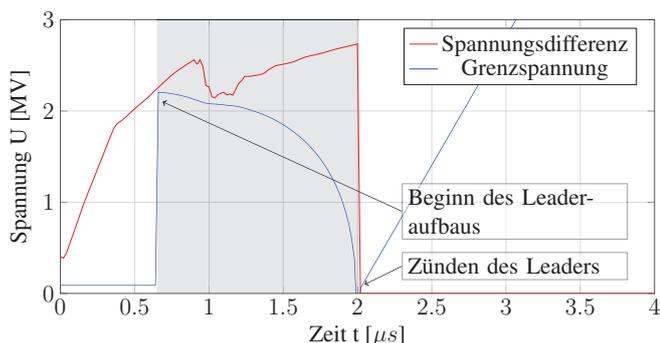


Abbildung 6. Zünden des Leaders zwischen der obersten Traverse und dem Leiterseil auf Mast 5 ($\hat{I} = 180kA$)

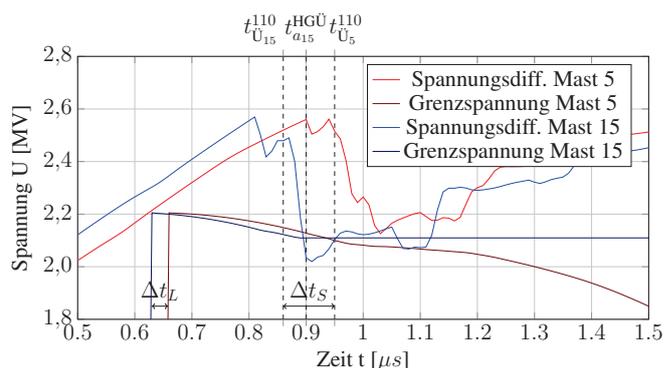


Abbildung 8. Vergleich des Leaderaufbaus auf Mast 5 und 10 ($\hat{I} = 180kA$)

positiven HGÜ-Leiterseils, bzw. der entsprechenden Schlagweite, und die Grenzspannung des Leaders dargestellt. Damit der Leader während des Entstehungsprozesses nicht erlischt, darf die dargestellte Grenzspannung über dem Isolator nicht unterschritten werden. Da diese Grenzspannung von der Leaderlänge abhängig ist, verringert sich diese gemäß (9) mit zunehmender Zeit. Erreicht die Grenzspannung schließlich 0V, hat der Leader die Hälfte des Abstands überschritten und es erfolgt nach (8) der Überschlag. Abb. 7 zeigt im Gegenzug das Erlöschen des Leaders auf Mast 15. Zum Zeitpunkt $t_{a15}^{HGÜ}$ wird hier die Grenzspannung durch einen geringen Spannungseinbruch unterschritten.

In beiden betrachteten Fällen beträgt die Blitzstoßstromamplitude $180kA$ und beschreibt somit die eingangs erwähnte, unerwartet Reihenfolge der minimalen Blitzstoßströme. Abb. 8 zeigt zur genaueren Betrachtung den direkten Vergleich der Spannungsdifferenzen. Hier ist gut erkennbar, dass die Spannungsdifferenz über dem Isolator von Mast 15 in den ersten $0,8\mu s$ die des Mastes 5 übersteigt. Damit verbunden beginnt der Leaderaufbau auf Mast 15 um Δt_L früher als auf Mast 5. Ab ca. $0,8\mu s$ zeigen sich die Auswirkungen der Spannungseinbrüche aus Abb. 5.

Da die Zeitdifferenz Δt_S größer als Δt_L ist, kommt es auf dem höheren Mast zu einem Erlöschen des Leaders, wohingegen der schützende Spannungseinbruch auf Mast 5 zu spät erfolgt.

Die Herkunft des Spannungseinbruchs wird mit Hilfe von Abb. 9 noch einmal bestätigt. $t_{ü}^{110}$ zeigt hier den exakten Zeitpunkt eines rückwärtigen Überschlags von der unteren Traverse auf ein Leiterseil der 110-kV-Systeme. Auf diesen Überschlag folgt ein Spannungseinbruch auf der unteren Traverse. Dieser Spannungseinbruch wandert anschließend entlang des Mastes und erreicht nach den entsprechenden Laufzeiten die mittlere und oberste Traverse. Da die Abstände und somit die Laufzeiten zwischen den Traversen bei allen Masten identisch sind, ist das unterschiedliche Überschlagsverhalten nur von den unterschiedlichen Verlängerungen der Masten abhängig. Der gesamte zeitliche Vorgang für die beiden Beispielmasten 5 und 15 ist noch einmal in Tab. VII in chronologischer Reihenfolge zusammengefasst.

Da der Spannungseinbruch auf der 110-kV-Ebene generell vor dem HGÜ-System auftritt, zeigt sich, dass die 110-kV-Systeme grundsätzlich die Widerstandsfähigkeit des HGÜ-Systems steigern. Fallen bei dem von uns betrachteten Mastaufbau aus Abb. 1 die 110-kV-Systeme weg, fehlt der schützende Spannungseinbruch gänzlich. Bei Masten ohne Verlängerung erfolgt somit ein rückwärtiger Überschlag bereits deutlich früher. Für Masten mit Verlängerung sinkt der minimale Blitzstoßstrom der zum Überschlag führt noch weiter ab. Für diese stellt sich die amplitudenbezogene Reihenfolge gemäß der 110-kV-Systeme aus Tab. V ein.

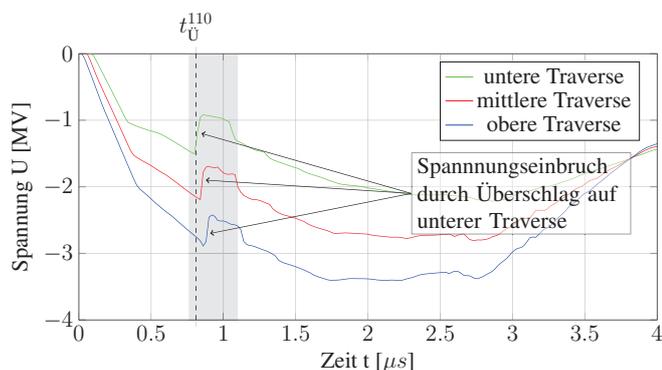


Abbildung 9. Spannungseinbruch auf den Traversen des Mastes 15 aufgrund von Überschlägen auf der unteren Traverse ($I = 180kA$)

TABELLE VII. ZEITLICHE ÜBERSCHLAGS-ABFOLGE BEI ZEITGLEICHEM BLITZEINSCHLAG IN MAST 5 UND 15

0,00μs	Blitzeinschläge mit einer Blitzstoßstromamplitude von 180kA in die Spitzen der Masten 5 und 15
0,63μs	Beginn des Leadaufbaus auf der obersten Traverse von Mast 15
0,66μs	Beginn des Leadaufbaus auf der obersten Traverse von Mast 5
0,80μs	Überschläge der 110-kV-Systeme auf Mast 15
0,88μs	Spannungseinbruch auf der obersten Traverse von Mast 15
0,89μs	Überschläge der 110-kV-Systeme auf Mast 5
0,90μs	Grenzspannung auf der obersten Traverse von Mast 15 wird unterschritten
0,90μs	Erlöschen des Leaders auf Mast 15
0,97μs	Spannungseinbruch auf der obersten Traverse von Mast 5
1,03μs	Grenzspannung auf der obersten Traverse von Mast 5 wird nicht unterschritten
2,00μs	Zünden des Leaders auf Mast 5

V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Paper ist eine Blitzeinschlagsanalyse für rückwärtige Überschläge einer Hybridleitung durchgeführt worden, die das Widerstandsverhalten insbesondere des HGÜ-Systems für rückwärtige Überschläge darstellt. Ziel dieser Untersuchungen ist das Erlangen grundsätzlicher Aussagen über das Verhalten des HGÜ-Systems gewesen, wenn ein Blitzeinschlag in die Spitze eines Mastes erfolgt.

Es hat sich gezeigt, dass die Kombination von 110-kV-mit HGÜ-Systemen positive Auswirkungen auf das Überschlagsverhalten des HGÜ-Systems hat. Durch Überschläge auf der 110-kV-Ebene wird ein Spannungseinbruch erzeugt, der das HGÜ-System schützt. Mit steigender Höhe des Mastes nimmt die Widerstandsfähigkeit des HGÜ-Systems entgegen der Erwartungen sogar weiter zu, da die Überschläge auf der 110-kV-Ebene einen kritischen Spannungsverlauf schneller unterbinden.

Da HGÜ-Systeme in der Regel an den oberen Traversen der Masten angeordnet sind, stellen die in diesem Paper betrachteten Masten eine Standard-Konfiguration für Hybridleitungen dar. Das Ergebnis lässt sich somit auch auf ähnliche Mast-Konfigurationen übertragen. Weiterführende Studien sind im Bereich des Einflusses unterschiedlicher Erdwiderstände der Masten auf die „Schutzwirkung“ der 110-kV-Systeme möglich, sowie die Berücksichtigung der verän-

derlichen Anstiegszeiten und Steilheiten der Blitzstoßströme auf das Überschlagsverhalten von Hybridleitungen. Auch das Verhalten bei nachfolgenden Blitzeinschlägen wird noch nicht berücksichtigt, obwohl deren Bedeutung nach [21] zunehmend größer wird.

LITERATUR

- [1] „Gesetz über den Bundesbedarfsplan (Bundesbedarfsplangesetz - BB-PIG),“ Juli 2013.
- [2] T. Ito, T. Ueda, H. Watanabe, T. Funabashi, und A. Ametani, „Lightning Flashovers on 77-kV Systems: Observed Voltage Bias Effects and Analysis,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, Nr. 2, S. 545–550, März 2003.
- [3] A. Ametani und T. Kawamura, „A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, Nr. 2, S. 867–875, April 2005.
- [4] S. Wei, L. Qingmin, Z. Liang, Z. Li, und L. Xinchang, „Research on lightning performance of AC/DC hybrid transmission lines on the same tower,“ *Generation, Transmission & Distribution, IET*, Vol. 7, Nr. 2, S. 166–174, Februar 2013.
- [5] „ElectroMagnetic Transients Program, Version Alternative Transients Program.“ [Online]. Available: <http://www.emtp.org/>
- [6] A. Ametani, Y. Kasai, J. Sawada, A. Mochizuki, und T. Yamada, „Frequency-dependent impedance of vertical conductors and a multi-conductor tower model,“ *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 141, Nr. 4, S. 339–345, Juli 1994.
- [7] W. Chisholm, Y. Chow, und K. Srivastava, „Lightning Surge Response of Transmission Towers,“ *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Nr. 9, S. 3232–3242, September 1983.
- [8] T. Hara und O. Yamamoto, „Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis,“ *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 143, Nr. 3, S. 283–289, Mai 1996.
- [9] M. Kawai, „Studies of the surge response on a transmission line tower,“ *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 83, Nr. 1, S. 30–34, Januar 1964.
- [10] M. A. Sargent und M. Darveniza, „Tower Surge Impedance,“ *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Nr. 5, S. 680–687, Mai 1969.
- [11] C. Wagner und A. Hileman, „A New Approach to the Calculation or the Lightning Performance of Transmission Lines III-A Simplified Method: Stroke to Tower,“ *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, Vol. 79, Nr. 3, S. 589–603, April 1960.
- [12] M. Ishii, T. Kawamura, T. Kouno, E. Ohsaki, K. Shiokawa, K. Murotani, und T. Higuchi, „Multistory transmission tower model for lightning surge analysis,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, Nr. 3, S. 1327–1335, Juli 1991.
- [13] Q. Yang, J. Zhao, W.-X. Sima, J. Feng, und T. Yuan, „Lightning Back-Flashover Performance of the Yun-Guang UHV DC Transmission Lines,“ *High Voltage Engineering*, Vol. 34, Nr. 7, S. 004, 2008.
- [14] Y.-X. Han, Y.-X. Lu, H.-x. Chen, und L.-C. Li, „Simulation analysis on lightning intruding overvoltage of the±800 kV converter station,“ *High Voltage Engineering*, Vol. 36, Nr. 1, S. 491–495, 2010.
- [15] International Electrotechnical Commission *et al.*, „Computational Guide to Insulation Coordination and Modelling of Electrical Networks,“ 2004.
- [16] CIGRE WG 33-01, „Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines,“ *Technical Brochure*, Oktober 1991.
- [17] H. Motoyama, „Experimental study and analysis of breakdown characteristics of long air gaps with short tail lightning impulse,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, Nr. 2, S. 972–979, April 1996.
- [18] Y. Han, L. Li, H. Chen, und Y. Lu, „Influence of Modeling Methods on the Calculated Lightning Surge Overvoltages at a UHVDC Converter Station Due to Backflashover,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, Nr. 3, S. 1090–1095, Juli 2012.
- [19] CIGRE WG C 4.407, „Lightning Parameters for Engineering Applications,“ *Technical Brochure*, August 2013.
- [20] L. Prikler und H. K. Høidalen, *ATPDRAW Users' Manual*. EMTP-ATP User Group, 2009.
- [21] S. Visacro, C. R. de Mesquita, R. N. Dias, F. H. Silveira, und A. De Conti, „A Class of Hazardous Subsequent Lightning Strokes in Terms of Insulation Stress,“ *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 54, Nr. 5, S. 1028–1033, Oktober 2012.