

Technische Voraussetzungen für den Einsatz von Hochspannungskabeln in elektrischen Netzen

Redzo Muratovic¹, Ernst Schmutzner², Rudolf Woschitz³, Wolfgang Emmer⁴,
Klemens Reich⁵, Michael Klein⁶, Georg Svejda⁷

Kurzfassung: In zunehmendem Maß müssen Betreiber von Übertragungs- und Verteilernetzen überlegen, ob für den Transport elektrischer Energie Hochspannungskabelsysteme anstatt von Freileitungen eingesetzt werden können oder müssen. Unabhängig von der Frage der Investitions- bzw. Lebenszykluskosten ist eine Reihe von technischen Fragestellungen zu klären, um einen sicheren und einen, im Vergleich zu Freileitungen, zuverlässigen Betrieb von Kabelsystemen gewährleisten zu können.

Im folgenden Beitrag werden grundsätzliche technische Voraussetzungen für die Errichtung von 380-kV-Höchstspannungsfreileitungs- und Höchstspannungskabelsystemen dargestellt und die Besonderheiten bei der Errichtung von Höchstspannungskabelanlagen beschrieben. Dazu gehören die Übertragungseigenschaften, das Impedanzverhalten, thermische Aspekte sowie der Einfluss von Parametern wie spezifischer Bodenwiderstand, Verlegearten, Schirmbehandlung auf die wechselseitige induktive und ohmsche Beeinflussung sowie die Beeinflussung anderer technischer Systeme im Umfeld dieser Kabel.

Keywords: 400-kV-Kabelsysteme, induktive Beeinflussung, Crossbonding-Fehler, thermische Auswirkungen, Grenztemperatur, magnetisches Feld, Erdausbreitungswiderstand

¹Redzo Muratovic, Institut für Elektrische Anlagen/TU Graz, Inffeldgasse 18, 8010 Graz, Tel.: 0316/873-7556, Fax.: 0316/873-7553, redzo.muratovic@tugraz.at, <http://www.ifea.tugraz.at/>

²Ernst Schmutzner, Institut für Elektrische Anlagen/TU Graz, Inffeldgasse 18, 8010 Graz, Tel.: 0316/873-7551, Fax.: 0316/873-7553, schmutzner@tugraz.at, <http://www.ifea.tugraz.at/>

³Rudolf Woschitz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement/TU Graz, Inffeldgasse 18, 8010 Graz, Tel.: 0316/873-7410, Fax.: 0316/873-7408, woschitz@tugraz.at, <http://www.hspt.tugraz.at/>

⁴Wolfgang Emmer, Institut für Elektrische Anlagen/TU Graz, Inffeldgasse 18, 8010 Graz, Tel.: 0316/873-8065, Fax.: 0316/873-7553, emmer@tugraz.at, <http://www.ifea.tugraz.at/>

⁵Klemens Reich, Austrian Power Grid AG, Wagramer Straße 19, IZD Tower, A-1220 Wien, Tel.: 050/320-56368, Fax.: 050/320-156368, klemens.reich@apg.at, <http://www.apg.at>

⁶Michael Klein, Wiener Netze GmbH, Erdbergstraße 236 A-1110 Wien, Tel.: 01/90190-32215, Fax.: 01/90190-9932215, michael.klein@wienernetze.at, www.wienernetze.at

⁷Georg Svejda, Gerichtssachverständiger für 110-kV- und 380-kV-Kabelanlagen, Gogolgasse 56, 1130 Wien, Tel.: 0660/6232626, georg.svejda@gmx.at

1 Einleitung und Grundlagen

1.1 Einleitung

Die elektrische Energie, die aus diversen Primärenergiequellen gewonnen wird, muss zu den Verbrauchern transportiert werden. Die Stromverbraucher findet man global betrachtet vielfach in geografisch konzentrierten Ballungsräumen, wohingegen große Stromerzeugungsanlagen häufig von den Lastschwerpunkten entfernt verortet zu finden sind. Zur Übertragung großer Mengen elektrischer Energie sind physikalische Verbindungen zwischen Stromerzeugern und Stromverbrauchern notwendig. Dafür werden heute üblicherweise elektrisch leitfähige metallische Materialien (Leiter) in Freileitungen und Kabeln verwendet.

Die Übertragung der elektrischen Energie verursacht dabei strom- und spannungsabhängige Verluste, die in kW/km angegeben werden. Die stromabhängigen Verluste sind bei den heute in Europa angewandten Spannungen und bei derzeit zur Verfügung stehenden Übertragungstechnologien um ein Vielfaches höher als die spannungsabhängigen Verluste. Bei 400-kV-Systemen liegen die stromabhängigen Verluste bei z.B. VPE-Kabeln (vernetztes Polyethylen – englische Bezeichnung: XLPE) je nach Querschnittsfläche und Leiteraufbau um ein 10- bis 20-faches höher als die spannungsabhängigen Verluste.

Bei Freileitungen kann dieser Faktor zwischen strom- und spannungsabhängigen Verlusten über dem 100-fachen liegen und bei Gas isolierten Leitungen (GIL) noch höher, wobei festgehalten werden kann, dass zu den spannungsabhängigen Verlusten der GIL derzeit in der Literatur kaum Angaben existieren und die stromabhängigen Verluste der GIL in der Größenordnung der Verluste von Kabeln liegen.

Die Verlustleistung P_V einer Leitung ist quadratisch von der übertragenen Scheinleistung bzw. vom über die Leitung fließenden Strom abhängig. Aus diesem Grund versucht man in der Praxis die elektrische Spannung soweit wie technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll zu erhöhen, um bei gleichbleibender Übertragungskapazität einer Leitung den Strom und damit auch die Verlustleistung zu verringern. Ein Vergleich der verschiedenen Stromübertragungsmöglichkeiten liefert für jede der heute üblichen Ausführungsformen (HGÜ⁸, GIL, Freileitung, Kabel) Vor- bzw. Nachteile.

Im Gegensatz zu Hochspannung-Freileitungssystemen, bei denen es in den letzten Jahrzehnten zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Technologie und dem Einsatz im Netz gekommen ist, sind bei Kabelsystemen noch eine Reihe von Aufgaben in Wissenschaft und Praxis für einen vergleichbaren zuverlässigen und sicheren Betrieb im Übertragungsnetz unter Berücksichtigung ökonomischer Randbedingungen zu lösen. In der vorliegenden Publikation werden einige wichtige technologische Herausforderungen, die beim Einsatz von Hochspannungskabeln in deren Umfeld auftreten, zusammenfassend beschrieben und Lösungsansätze aufgezeigt.

⁸ HGÜ: Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung

1.2 Grundlagen

Jeder elektrische Leiter, der von einem Strom durchflossen wird, ist von einem magnetischen Fluss umgeben. Handelt es sich dabei um einen Wechselfluss und befinden sich mehrere elektrische Leiter in unmittelbarer räumlicher Nachbarschaft zueinander, so sind sie miteinander magnetisch gekoppelt und man spricht von induktiver wechselseitiger Beeinflussung. Bei elektrischen Übertragungsleitungen tritt durch den Parallellauf der verschiedenen Leiter über mehrere Kilometer hinweg bei Freileitungen eine induktive und kapazitive, bei Kabeln nur eine induktive Kopplung auf, wobei in den beeinflussten Leitern (z.B. Phasenleitern, Erdseilen von Freileitungen, Begleiterdern oder Kabelschirmen) eine Längsspannung eingekoppelt wird. Durch geerdete Reduktionsleiter (Erdseile, Begleiterder und Kabelschirme), die entlang der Leitungstrasse (mehrmals) geerdet werden, wird dabei ein Stromkreis über das Erdreich geschlossen und die eingekoppelte Spannung hat einen Stromfluss in den Erdseilen bzw. Kabelschirmen zur Folge. Im Normalbetrieb und im Fehlerfall (z.B. Kurzschluss, Erdschluss) von Freileitungs- und Kabelsystemen treten aufgrund der Last- und Kurzschlussströme, der eingekoppelten Ströme sowie der eingekoppelten Spannungen charakteristische elektromagnetische, ohmsche, induktive und kapazitive Beeinflussungen auf, die hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Personen- und Betriebsmittelsicherheit untersucht werden müssen.

2 Beeinflussende Faktoren der induzierten Größen

Die Höhe der induzierten Größen, d.h. der Spannungen und Ströme hängt bei 400-kV-Kabelsystemen von den im Folgenden angeführten Faktoren ab:

- Abstände zwischen den Leitung-Systemen sowie zwischen den einzelnen Phasenleitern eines Systems
- Anzahl der Kabel-Abschnitte (abhängig von der Gesamtleitungslänge und der lieferbaren Kabellänge einer Trommel)
- Anzahl der Kabelsysteme bzw. der Leiter
- Ströme in den unterschiedlichen Betriebszuständen (aktuelle Belastung, Normalbetrieb, Grenzlast, Fehlerfall)
- Elektrische Symmetrie der Kabelsysteme (System-, Crossbonding- Hauptabschnitts- und -Unterabschnittslänge)
- Erdungsbehandlung der Kabelschirme, Begleiterder, Reserveadern (Schirme und Phasen)
- Erdungswiderstände im Muffen- bzw. Endverschlussbereich
- Auswirkung der Alterung bzw. Korrosion von Erdungsanlagen und Erdungsverbindungen
- Spezifischer Bodenwiderstand
- Verdrillungskonfigurationen (Crossbonding)
- Verlegearten (Dreieck, flach [horizontal, vertikal])
- Verlegetiefe
- Querschnittsfläche der Leiter, der Schirme und Reduktionsleiter
- Leiterform (Kabelschirm: Hohlleiter; Phase: Rundleiter)
- Leiter- und Isoliermaterialien
- Leitergeometrie

Die Höhe der induzierten Spannungen und eingekoppelten Ströme muss bekannt sein, um eine eventuelle potentielle Gefahr für das Betriebs- bzw. Wartungspersonal durch Maßnahmen verringern zu können. Weiters sorgen die induzierten Spannungen (speziell im Fehlerfall) für zusätzliche Beanspruchungen von technischen Betriebsmitteln wie beispielsweise die Spannungsbeanspruchung des äußeren Kabelmantels.

3 Grundsätzliches zur Belastbarkeit von Freileitungsseilen und Kabeln

Freileitungsseile werden im Gegensatz zu den in Erde liegenden und isolierten Kabeln durch die umgebende Luft gut gekühlt und sind daher bei gleicher Querschnittsfläche und gleichem Material wesentlich höher belastbar, da bei Freileitungen das Leiterseil durch Strahlung und Konvektion an die Luft besser gekühlt wird als der isolierte Kabelleiter. Kabel werden meist direkt in Erde oder in Rohren verlegt, was die Wärmeabgabe zusätzlich erschwert – eine Verlegung in Luft (z.B. Tunnel, Kabelgang und ähnliches) verbessert die Wärmeabgabe an die Umgebung, erreicht dennoch nicht das Niveau von Freileitungen bedingt durch die Kabelisolierung.

Die Verlustleistung P_V , die aufgrund des ohmschen Widerstandes des Leiters R und des Stroms I auftritt, kann dabei mit $P_V = 3 \cdot I^2 \cdot R$ bestimmt werden. Durch die erschwerte Wärmeabgabe bei Kabeln müsste die Querschnittsfläche des Kabels um ein Vielfaches höher sein als der Leiterquerschnitt des Freileitungsseiles, um ein Kabelsystem mit dem gleichen Strom wie ein Freileitungssystem beaufschlagen zu können. Ab einer bestimmten Querschnittsfläche ist eine Erhöhung jedoch aufgrund des sogenannten Skin效ektes (Stromverdrängung innerhalb eines Leiters durch das innere magnetische Wechselfeld des eigenen Stromes) nicht mehr zielführend. Die Eindringtiefe eines Stromes kann für elektrische Leiter mit der nachfolgenden Formel näherungsweise berechnet werden:

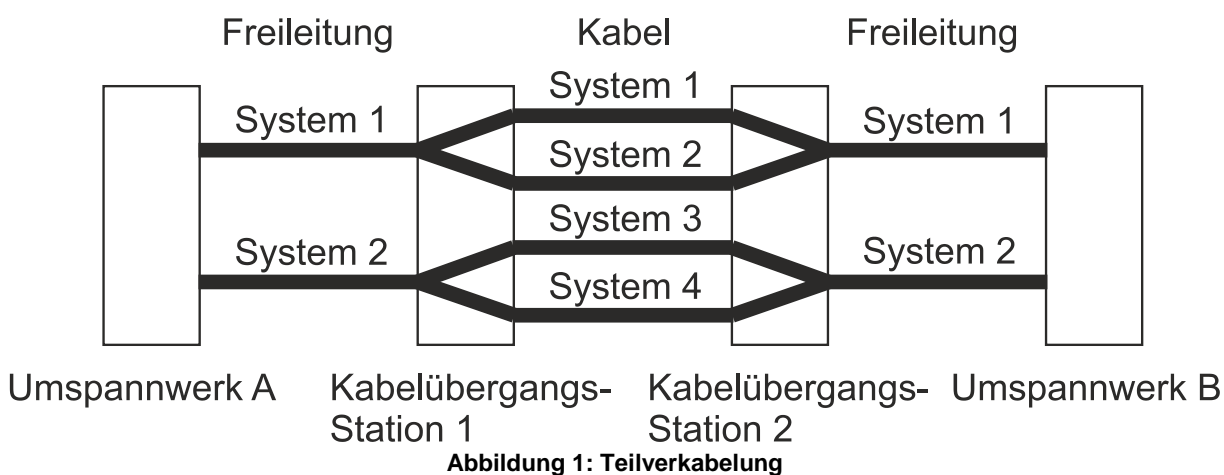
$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

Formel 1

Man erkennt, dass die Eindringtiefe δ zum einen vom Leitermaterial (μ ...Permeabilität des Leiters und ρ ...spezifischer Widerstand des Leiters) und zum anderen von der Frequenz (ω ...Kreisfrequenz ($2\pi f$)) des fließenden Stromes abhängig ist. Bei Kupfer liegt die Eindringtiefe bei der Netzfrequenz von 50 Hz (Leitertemperatur vernachlässigt) bei ca. 10 mm. Dies ergibt eine wirksame Querschnittsfläche von ca. 314 mm^2 . Bei Leitern mit größeren Querschnittsflächen tritt der Skin效ekt ein und es kommt zu einer Stromverdrängung nach außen. Eine Erhöhung der Querschnittsfläche ohne weitere Maßnahmen würde die Strombelastbarkeit nicht im selben Ausmaß erhöhen, wie es durch die alleinige Erhöhung des Querschnitts erwartet werden könnte. Um den Skin- und den Proximityeffekt (Stromverdrängung innerhalb eines Leiters durch das äußere magnetische Wechselfeld des Stromes eines benachbarten Leiters) zu beherrschen werden elektrische Leiter in der Regel ab einer bestimmten Querschnittsfläche als Segmentleiter ausgeführt. Zusätzlich werden spezielle weitere Lösungen angeboten (z.B. lackierte, oxidierte Drähte).

4 Teilverkabelung von Freileitungssystemen

Im Übertragungsnetz ist es üblich, dass man aus Gründen der Versorgungssicherheit und der Zuverlässigkeit bei 400-kV-Leitungen meist zweisystemige Freileitungen errichtet. Möchte man eine zweisystemige 400-kV-Freileitung in einem Abschnitt durch ein Kabel ersetzen (Teilverkabelung, siehe Abbildung 1), so sind dafür aufgrund von technologischen und Umgebungsbedingungen sowie abhängig von der erforderlichen Übertragungsleistung meist doppelt so viele Systeme mit größeren Leiterquerschnittsflächen notwendig.



Die Anzahl an Leitern beim Einsatz von Kabelsystemen ist dementsprechend um ein Vielfaches höher im Vergleich zu Freileitungen.

Freileitung: $2 \cdot 3$ Phasen + 1 (2) Erdseile = 7 (8) Leiter

Kabel: $4 \cdot 3$ Phasen + $4 \cdot 3$ Kabelschirme + 1 (2) Begleiterder = 25 (26) Leiter

Aus den oben dargestellten Gründen (mehr Systeme, größere Querschnittsflächen) weisen Kabel wesentlich geringere System-Impedanzen als Freileitungen auf, was zu einem unterschiedlichen Betriebsverhalten im Netz führt. Letztlich kann man die zum Teil sehr unterschiedlichen Betriebseigenschaften bzw. Leitungsparameter zwischen Freileitungen und Kabeln im Wesentlichen auf die unterschiedlichen Isolierstoffe und den unterschiedlichen geometrischen Aufbau zurückführen. Die Spannungen in den Umspannwerken (Netzknoten), in denen 400-kV-Kabelsysteme angeschlossen sind, sind durch das Netz vorgegeben und können in gewissen Grenzen durch sogenannte Phasenschiebertransformatoren in Betrag und Winkel verändert werden. Diese Spannungen (Amplitude und Phase) und die Leitungsimpedanzen geben die Stromverteilung bzw. die Lastflussverteilung vor. Durch die geringeren Leitungsimpedanzen kommt es zu einer Konzentration des Lastflusses im Bereich der Kabel. Höherimpedante parallele Leitungszüge mit Freileitungen werden hingegen entlastet. Dies führt sowohl für den Normalbetrieb als auch für den Fehlerfall zur Notwendigkeit einer Überarbeitung des Energieübertragungs- und des Schutzkonzeptes. Eine Überlastung der Kabelsysteme kann man z.B. mit Hilfe einer (kostenintensiven) Reaktanz- bzw. Impedanzanpassung durch den Einsatz von Drosselspulen verhindern (Kompensation der Kabelkapazität zur Vermeidung von Überspannungen sowie Blindleistungskompensation zur Erhöhung der Übertragungsfähigkeit). Eine weitere Möglichkeit der Vermeidung von Überlastung von Kabeln im vermaschten Höchstspannungsnetz ist entweder der Einsatz eines

konventionellen Schräg- oder Querreglers oder der Einsatz von sogenannten FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System). Mit FACTS kann man unter anderem den Lastflusswinkel anpassen und damit die Lastaufteilung auf parallelen Leitungen regeln.

Der häufigste Fehler im elektrischen Netz ist der einpolige Erdschluss bzw. im Übertragungsnetz der Erdkurzschluss. Tritt dieser Fehler auf einer Freileitung auf, so kann er in der Regel aufgrund der selbstheilenden Eigenschaft des Isolierstoffes Luft durch eine Kurzunterbrechung behoben werden. Auch bei wiederholter Schutzauslösung gestaltet sich die Fehlersuche und die anschließende Fehlerbehebung bei Freileitungen im Vergleich zu Kabeln relativ einfach, da die Komponenten einer Freileitung zugänglich sind. Bei einem Erdschluss im Kabelsystem muss der Kabelschirm, in dem ein Großteil des Fehlerstromes zur Quelle zurückfließt, bis zur Schutzauslösung sehr hohen Strömen standhalten. Dies muss bei der Dimensionierung der Kabelschirm-Querschnittsfläche berücksichtigt werden und die Schutzauslösung muss dabei so schnell erfolgen, dass der eingesetzte Kabelschirm diesem Strom ohne Schaden standhält. Jedoch sind bei Kabelsystemen die Fehler im Gegensatz zu Freileitungssystemen nicht selbstheilend, sodass jeder Fehler aufgrund der relativ aufwendigen Lokalisierung des Fehlerortes (bei einer Kabellegung direkt in Erde oder in Rohren) und der sehr langwierigen Fehlerbehebung zu längeren Ausfallsdauern führt.

5 Verlegung von 400-kV-Kabelsystemen

Es gibt unterschiedliche Arten 400-kV-Kabelsysteme zu verlegen. Als Beispiel wird eine Verlegung direkt in Erde wie in der Abbildung 2 dargestellt, angenommen. Gegebenenfalls werden zusätzlich zu den Kabelschirmen die Phasenleiter ebenfalls verdrillt. Das Auskreuzen (Verdrillen) von Kabelschirmen entlang einer Kabeltrasse erfolgt in der Art und Weise, dass jeder Kabelschirm jedem der drei Phasenleiter innerhalb eines Hauptabschnittes einmal zugeordnet wird und wird als Crossbonding bezeichnet. Üblicherweise werden die Kabelschirme in jeder dritten Muffe (siehe Abbildung 2: M03, M06 und M09) direkt geerdet. In den Muffen dazwischen sind die Kabelschirme über Überspannungsableiter mit der Erdungsanlage an den Muffenstellen verbunden und sind im Normalbetrieb dadurch von der Erdungsanlage isoliert. Die Überspannungsableiter werden eingesetzt um den Kabelmantel vor einer Spannungsüberbeanspruchung zu schützen. Diese könnte zum Beispiel bei einem Kurzschluss im Netz durch hohe induzierte Kabelschirmspannungen gegenüber der Erde auftreten. In diesem Fall würde der Überspannungsableiter zünden und den Kabelschirm mit der Erdungsanlage niederohmig verbinden und eine Überspannungsbeanspruchung verhindern. Bei den in die Kabelschirme je Crossbonding-Unterabschnitt induzierten Längsspannungen handelt es sich um Spannungen, bei denen sowohl die Amplitude als auch der Phasenwinkel zu beachten ist. Durch die Auskreuzung der Kabelschirme erreicht man im fehlerfreien Normalbetrieb eine Reduktion der in die Kabelschirme induzierten Gesamtlängsspannung (vektorielle Addition der Spannungen) eines Crossbonding-Hauptabschnittes (Hauptabschnitte bestehen aus drei Unterabschnitten: siehe Abbildung 2). Dadurch kann jeder Crossbonding-Hauptabschnitt am Anfang und am Ende niederohmig geerdet werden, ohne dass die, durch die nun reduzierten in den Schirmen fließenden Ströme verursachten Schirm- bzw. Zusatzverluste sehr hoch werden.

Kommt es während des Normalbetriebs zu einem unerwünschten Kontakt der Kabelschirme an einer beliebigen Stelle der Leitungstrasse mit der Erde, zum Beispiel durch

- das Zünden eines Überspannungsableiters (Ü-Abl. werden i.d.R. nicht überwacht),
- eine Beschädigung des Kabelmantels oder der Crossbonding-Kabel (Beschädigung durch Dritte, Durchscheuern des Kabelmantels z.B. durch einen spitzen Stein),
- einen Wassereintritt in eine der Crossbonding-Boxen,

so entspricht dies einer direkten Erdung des betroffenen Kabelschirmes.

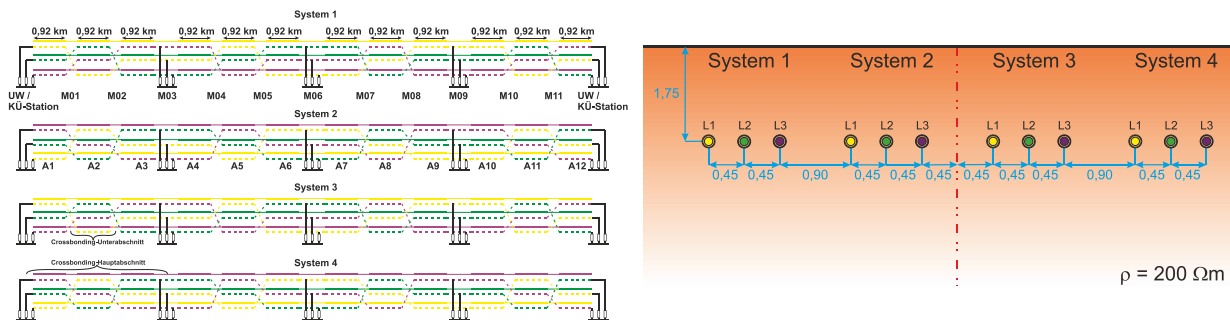


Abbildung 2: Längs- und Querverlegeprofil von 400-kV-Kabelsystemen

Dieser als Crossbonding-Fehler bezeichnete Zustand führt zu einem Stromanstieg im betroffenen Kabelschirm und damit zu erhöhten Zusatzverlusten. Ob der Stromanstieg links oder rechts vom Fehlerort höher ausfällt, hängt im Wesentlichen vom Fehlerort und den dabei auftretenden Leitungsunsymmetrien selbst ab. Durch den zusätzlichen Kabelschirmstrom können die Wärmeverluste von der Phase schlechter abgeführt werden und die Zusatzverluste bewirken im Endeffekt einen Leitererwärmungsanstieg. Je nach Vorbelastung bzw. je nach vorherrschender Leitererwärmung (vorhandenes Temperatur-Monitoring über die gesamte Leitungstrasse), kommt es zu einer Reduktion der Übertragungskapazität des 400-kV-Kabelsystems. Existiert ein Temperatur-Monitoring-System nicht, kann der Crossbonding-Fehler in der Regel erst bei der nächsten regelmäßigen Durchführung einer Überprüfung (Intervall zwischen 2 und 5 Jahren) des Kabelsystems messtechnisch erfasst werden, da die Kabelschirme im Normalbetrieb üblicherweise nicht überwacht werden. Bleibt der Crossbonding-Fehler über eine längere Zeitdauer unbemerkt, so kann dies zu einem Durchschlag führen bzw. durch die erhöhte Kabeltemperatur zur vorzeitigen Alterung des Isolierstoffes und damit zur Verkürzung der Lebensdauer des Kabelsystems führen.

Wie hoch der Stromanstieg im betroffenen Kabelschirm und dadurch auch der Temperaturanstieg im Kabelsystem bei einem Crossbonding-Fehler ausfällt, hängt von den nachfolgend aufgezählten Faktoren ab:

- Lage des betroffenen Kabelschirms (Querverlegeprofil)
- Vorbelastung des Kabelsystems
- Höhe der aktuellen Übertragungsleistung (zum Zeitpunkt des Fehlereintrittes)
- Kabelschirmquerschnittsfläche
- Anzahl der Systeme
- Position des Fehlerortes (Längsverlegeprofil)
- Art des Crossbonding-Fehlers (z.B. Crossbonding-Kabel unterbrochen, auf Erde oder kurzgeschlossen)
- Zustand der Erdungsanlage (Höhe des Erdausbreitungswiderstandes)

6 Berechnungsmethode

Untersuchungen, die im Rahmen eines wissenschaftlichen Forschungsprojektes, welches gemeinsam von der Austrian Power Grid AG, der Wiener Netze GmbH, der TenneT TSO B.V. und der Technischen Universität Graz (Institut für Elektrische Anlagen und Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement) durchgeführt wurde, haben gezeigt, dass der Strom, der über den Kabelschirm im Normalbetrieb fließt, nur in geringem Ausmaß von der Querschnittsfläche des Kabelschirms abhängt. Wesentlich mehr Einfluss auf die Kabelschirm-Stromhöhe besitzen die im Vergleich zu den Kabelschirmwiderständen höheren Erdausbreitungswiderstände der Erdungsanlagen entlang einer Kabeltrasse (Umspannwerke [Start- und Endpunkte von 400-kV-Kabelsystemen], die Ausführung der Erdungsanlagen der Muffenbauwerke und Kabelübergangsstationen), die geometrische Anordnung der Leiter, die Länge des Parallellaufs der sich beeinflussenden Leitungen sowie die beeinflussenden Ströme. Die induzierten Ströme in beidseitig geerdeten Kabelschirmen eines Drehstromsystems lassen sich für einen Abschnitt wie nachfolgend in der Formel 2 bzw. Formel 3 angegeben berechnen.

$$\begin{bmatrix} I_{KS1} \\ I_{KS2} \\ I_{KS3} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{S1S1} & Z_{S1S2} & Z_{S1S3} \\ Z_{S2S1} & Z_{S2S2} & Z_{S2S3} \\ Z_{S3S1} & Z_{S3S2} & Z_{S3S3} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} Z_{S1L1} & Z_{S1L2} & Z_{S1L3} \\ Z_{S2L1} & Z_{S2L2} & Z_{S2L3} \\ Z_{S3L1} & Z_{S3L2} & Z_{S3L3} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \end{bmatrix} \quad \text{Formel 2}$$

$$I_{S1,S2,S3} = -[Z_{SS}]^{-1} * [Z_{SL}] * I_{L1,L2,L3} \quad \text{Formel 3}$$

I_{KSi} ... induzierter Strom im Kabelschirm i

I_{Li} ... beeinflussender Strom der Phase i

Z_{SiSk} ... Koppelimpedanz zwischen den Kabelschirmen i und k

Z_{SiSi} ... Selbstimpedanz des Kabelschirmes i

Z_{SiLk} ... Koppelimpedanz zwischen Kabelschirm i und Phase k

Die angeführten Formeln 2 und 3 beinhalten noch nicht die Erdausbreitungswiderstände der Erdungsanlagen am Anfang, in den Muffen M03, M06 und M09 (siehe Abbildung 2, links) sowie am Ende der Kabel. In den im Folgenden dargestellten Berechnungsergebnissen wurden diese Erdungsanlagen zusammen mit den Längsimpedanzen (siehe Formel 2) als Kettenschaltung des obigen Matrizen-Modells eines Kabel-Abschnittes in einem MATLAB-Simulink Model berücksichtigt.

7 Berechnungsergebnisse

7.1 Crossbonding-Fehler bei betrieblich maximalen Dauerstrom (Normalbetrieb)

In der nachfolgenden Tabelle sind die induzierten Kabelschirmströme im fehlerfreien Normalbetrieb (Spalte: Simulation 1) und im Falle eines Crossbonding-Fehlers in

3 verschiedenen Kabelschirmen, jeweils zwischen den Kabel-Abschnitten A1 und A2 (siehe Abbildung 2, links) angegeben. Ausgehend von den Leiterströmen in den 4 Systemen werden die Ströme in den einzelnen Schirmen in den Kabel-Abschnitten A1 und A2 (siehe Abb. 2) berechnet. Den Berechnungsergebnissen liegt die in der Abbildung 2 dargestellte viersystemige Höchstspannungskabelanlage zugrunde (Dauerstrom: 1035 A pro Kabelphase bzw. Grenzlast 1725 A pro Kabelphase).

Tabelle 1: Induzierte Kabelschirmströme im Normalbetrieb mit und ohne Crossbonding-Fehler

Simulation		Simulation 1			Simulation 2			Simulation 3			Simulation 4		
Crossbonding-Fehler		Nein			zw. A1 und A2 im System 1 Kabelschirm 1			zw. A1 und A2 im System 2 Kabelschirm 3			zw. A1 und A2 im System 3 Kabelschirm 1		
Abschnitt			A1	A2		A1	A2		A1	A2		A1	A2
		Leiter	Schirm		Leiter	Schirm		Leiter	Schirm		Leiter	Schirm	
		A	A		A	A		A	A		A	A	
System 1	L1	1035	91	91	1035	309	62	1035	86	86	1035	86	86
	L2	1035	93	93	1035	92	92	1035	90	90	1035	92	92
	L3	1035	94	94	1035	89	89	1035	98	98	1035	90	90
System 2	L1	1035	7	7	1035	11	11	1035	11	11	1035	5	5
	L2	1035	10	10	1035	3	3	1035	13	13	1035	8	8
	L3	1035	7	7	1035	6	6	1035	206	73	1035	16	16
System 3	L1	1035	12	12	1035	10	10	1035	13	13	1035	212	70
	L2	1035	11	11	1035	12	12	1035	9	9	1035	6	6
	L3	1035	9	9	1035	14	14	1035	8	8	1035	13	13
System 4	L1	1035	91	91	1035	93	93	1035	88	88	1035	93	93
	L2	1035	91	90	1035	92	92	1035	89	89	1035	92	92
	L3	1035	90	90	1035	93	93	1035	91	91	1035	93	93

Rot: Kabelschirmströme im Abschnitt A1

Blau: Kabelschirmströme im Abschnitt A2

Man erkennt, dass der Kabelschirmstrom durch einen Crossbonding-Fehler um bis zu 218 A (System 1, Kabelschirm 1) verglichen zum fehlerfreien Normalbetrieb ansteigt. Bei den anderen beiden betroffenen Kabelschirmen liegt der Anstieg bei 200 A.

Zum einen abhängig von der Kabelschirm-Querschnittsfläche und zum anderen abhängig von den Umgebungsbedingungen (direkte Erdverlegung [flach in einer Ebene oder im Dreieck], Verlegung im Rohr oder im Tunnel (mit oder ohne (Zwangs-)Belüftung), Verlegung im speziellen Bettungsmaterial, Feuchtigkeitsgehalt des Erdreichs, Vorhandensein einer Kühlanlage, Verlegetiefe, Abstand der Leiter sowie der Systeme untereinander), führt dieser zusätzliche Kabelschirmstrom zu einem beachtlichen Temperaturanstieg in Kabelsystemen. Kabelsysteme können in solchen Fällen nicht mit der dimensionierten Nennleistung betrieben werden. Die erhöhte Kabeltemperatur führt zur vorzeitigen Alterung des Isolierstoffes und damit zur Verkürzung der Lebensdauer des Kabelsystems.

Im fehlerfreien Fall (Simulation 1 gemäß Tabelle 1) liegt die maximale Leitertemperatur bei 76,1 °C (System 2 und 3, Phase 2) und bei einem Crossbonding-Fehler des Kabelschirm 1

des Systems 3 (Simulation 4 gemäß Tabelle 1) liegt die maximale Leitertemperatur bei 84,9 °C (System 3, Phase 1). In der nachfolgenden Abbildung 3 sind die Temperaturverhältnisse, die sich bei den oben angegebenen Stromwerten stationär einstellen, dargestellt.

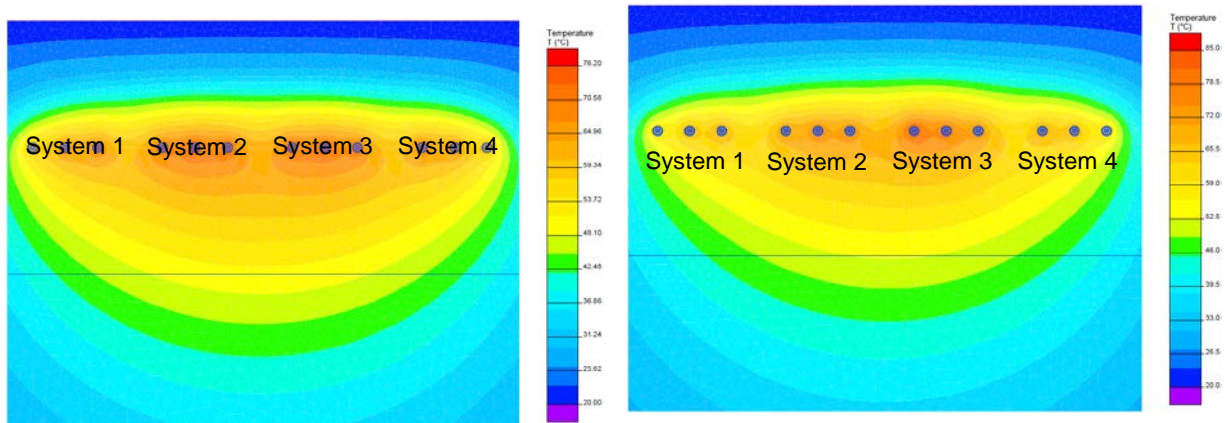


Abbildung 3: Thermographische Ergebnisse bei betrieblich maximalen Dauerstrom: Kein Crossbonding-Fehler: Simulation 1 (links) und Crossbonding-Fehler: Simulation 4 (rechts) (Achtung: unterschiedliche Wärmeskalierungen!)

7.2 Crossbonding-Fehler bei Grenzlast

Betrachtet werden die beiden Worst-Case Szenarien:

- Betrieb aller Kabelsysteme mit Grenzlast (1725 A pro Kabelphase) mit und ohne Crossbonding-Fehler (Simulation 1 und Simulation 2)
- Betrieb von nur zwei Kabelsystemen mit Grenzlast während die beiden anderen außer Betrieb sind mit und ohne Crossbonding-Fehler (Simulation 3 und Simulation 4)

Diese Szenarien ergeben sich durch den Ausfall einer Leitung im umgebenden 400-kV-Netz oder durch den Ausfall von zwei der vier betrachteten Kabelsysteme.

Tabelle 2: Induzierte Kabelschirmströme bei Grenzlast mit und ohne Crossbonding-Fehler

Simulation		Simulation 1		Simulation 2		Simulation 3		Simulation 4	
Crossbonding-Fehler		Nein		zw. A1 und A2 im System 2 Kabelschirm 3		Nein		zw. A1 und A2 im System 2 Kabelschirm 1	
		Leiter	Schirm	Leiter	Schirm	Leiter	Schirm	Leiter	Schirm
		A	A	A	A	A	A	A	A
System 1	L1	1725	151	1725	149	1725	150	1725	144
	L2	1725	151	1725	152	1725	150	1725	145
	L3	1725	151	1725	157	1725	150	1725	147
System 2	L1	1725	14	1725	16	1725	90	1725	281
	L2	1725	14	1725	20	1725	90	1725	100
	L3	1725	14	1725	338	1725	90	1725	90
System 3	L1	1725	18	1725	20	167	43	167	48
	L2	1725	18	1725	14	52	43	52	45
	L3	1725	18	1725	12	34	43	34	45
System 4	L1	1725	150	1725	145	10	4	10	6
	L2	1725	150	1725	148	6	4	6	6
	L3	1725	150	1725	150	7	4	8	8

Rot: Kabelschirmstrom mit und ohne Crossbonding-Fehler

Bei einer Belastung von 1725 A aller Kabelphasen kann das System unter Berücksichtigung der ebenfalls erhöhten Kabelschirmströme gemäß der Abbildung 4 (links) bis zum Erreichen der maximal zulässigen Leitertemperatur 10,5 h lang betrieben werden.

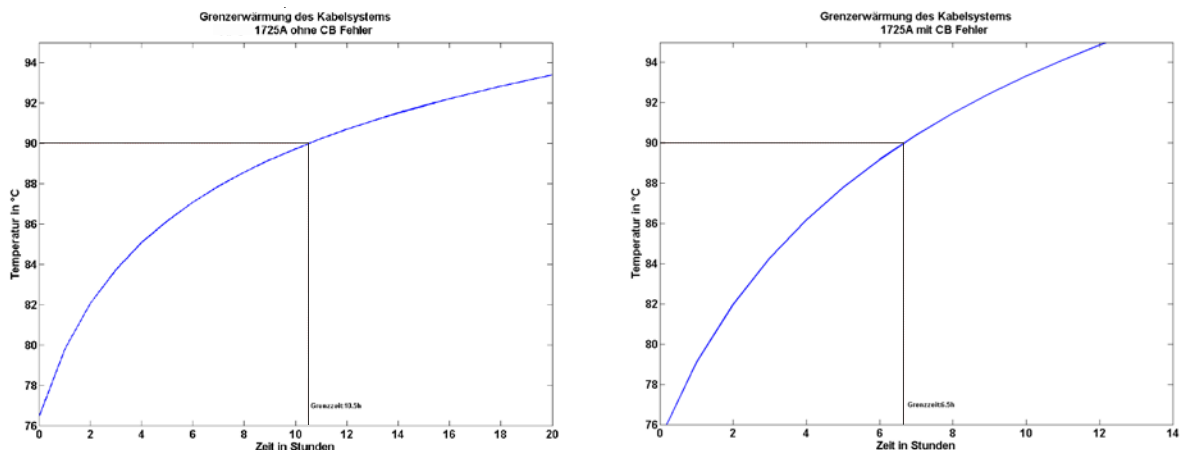


Abbildung 4: Ermittlung der Grenztemperatur: Simulation 1 (links) und Simulation 2 (rechts)

Würde zu diesem Zeitpunkt ein Crossbonding-Ausfall eintreten bzw. seit längerer Zeit unbemerkt bestehen, so reduziert sich die Dauer laut Abbildung 4 (rechts) von 10,5 h auf 6,5 h.

7.3 Auswirkungen eines Crossbonding-Fehlers auf die EMF v. Kabeln

Ein Stromanstieg im Kabelschirm durch einen Crossbonding-Fehler wirkt sich auch auf das magnetische Feld des Kabelsystems aus. Die Auswirkung fällt jedoch im Gegensatz zu den

thermischen Betrachtungen positiv aus und führt zu einer Feldreduktion, insbesondere im unmittelbaren Nahbereich des Kabels.

7.3.1 Elektrisches Feld

Im Gegensatz zu Freileitungen wird die gesamte elektrische Feldstärke bei Kabeln innerhalb der elektrischen Isolation zwischen Phase und Kabelschirm abgebaut. Daher tritt bei Höchstspannungskabeln außerhalb des Kabelschirmes kein relevantes elektrisches Feld auf.

7.3.2 Magnetisches Feld

Die Vornorm ÖVE/ÖNORM E 8850 nennt $100 \mu\text{T}$ als zulässigen Referenzwert für das magnetische Feld für die Allgemeinbevölkerung. In der Praxis versuchen die verantwortlichen Kabelhersteller in Zusammenarbeit mit den späteren Betreibern bzw. Eigentümern schon bei der Planung neuer 400-kV-Kabelanlagen das magnetische Feld auf minimale Werte im Sinne einer umsichtigen Vermeidung zu reduzieren.

7.4 Auswirkungen der Variation von Erdausbreitungswiderständen auf die in Kabelschirme induzierten Spannungen

Im folgenden Abschnitt werden Untersuchungen der Auswirkungen des ungewollten Ausfalls einer Erdungsverbinding an einer ausgewählten, zugänglichen Stelle im Verlauf einer 400-kV-Kabeltrasse dargestellt. D.h., im Folgenden wird der Frage nachgegangen was geschieht, wenn eine Erdungs- bzw. Potenzial-Ausgleichsverbinding aufgrund von Korrosion, Alterung oder Lösung der Schraubverbinding hochohmig wird. Die Untersuchungen wurden in Form von Szenarienrechnungen durchgeführt, indem der Widerstand einzelner Erdungsverbindingen an verschiedenen Orten des Kabelsystems variiert wurde.

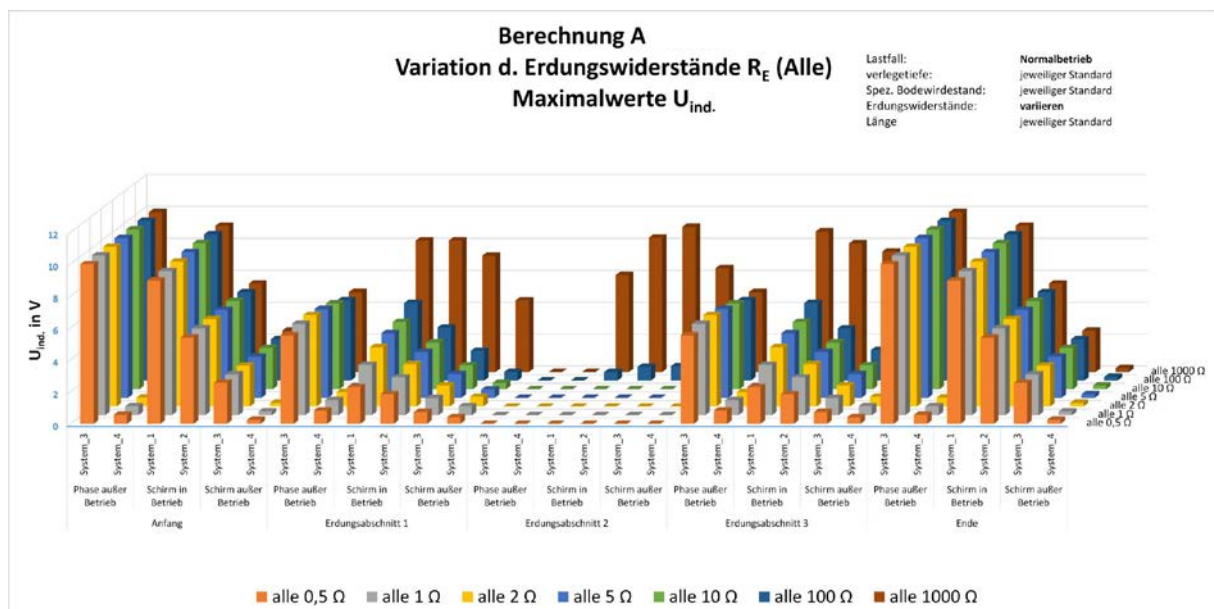


Abbildung 5: Induzierte Spannungen bei geerdeten Kabelschirmen

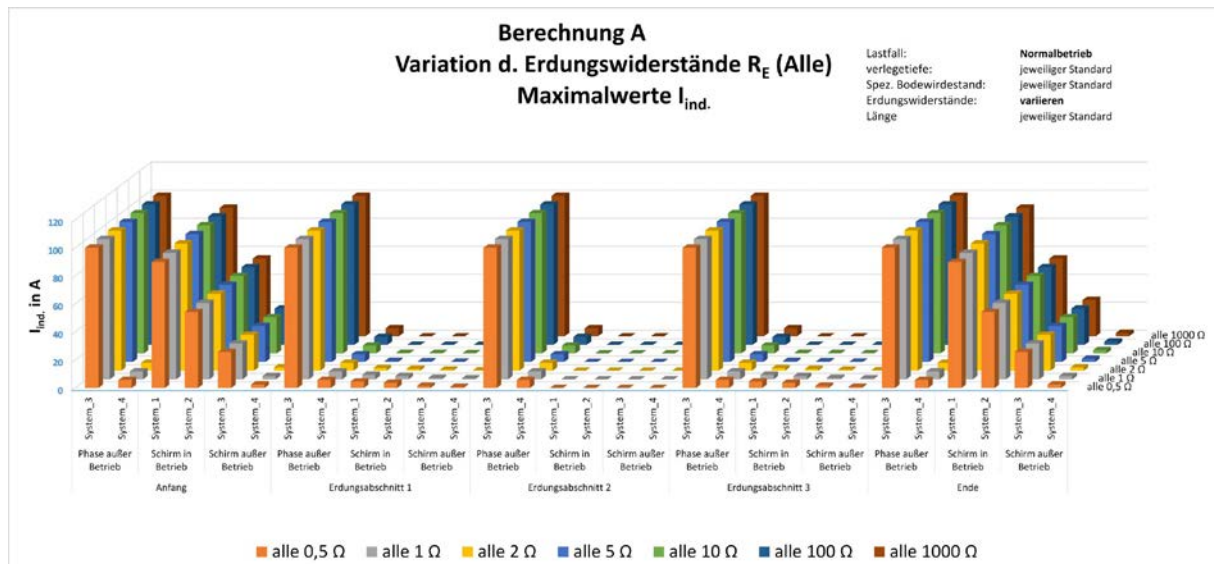


Abbildung 6: Induzierte Ströme bei geerdeten Kabelschirmen

Die Berechnungen haben gezeigt, dass eine hochohmige Erdungsanlage eines Muffenbauwerks bzw. eine lose Erdungsverbindung eines Kabelschirmes zu einem erheblichen Spannungsanstieg sogar in weit entfernten (einige Kilometer) Muffenbauwerken führen kann. Eine weitere wichtige Erkenntnis der Untersuchungen war, dass die Erdungs- und Widerstands-Symmetrie im Kabelsystem eine große Bedeutung hat und Erdungs- und Potentialausgleichsleiter-Unsymmetrien zu hohen Erdungs-, Schritt- und Berührungsspannungen führen können. Auch die Thematik der Messung der Erdungswiderstände sowohl im verbauten als auch nicht verbauten Gebiet ist wesentlich. Ergebnisse der Untersuchung können wertvolle ergänzende Ansätze für die Planung neuer und die Instandhaltung bestehender Kabelanlagen liefern.

8 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse dieses Beitrages zeigen die Bedeutung der Berücksichtigung der elektrischen Beeinflussung beim Einsatz von Höchstspannungskabeln auf. Anhand eines Crossbonding-Fehlers einer 400-kV-Kabelanlage zeigen die Berechnungen der induktiven Beeinflussung nicht zu vernachlässigende Beeinflussungen u.a. hinsichtlich der Berührungsspannung, der thermischen Auswirkungen und der elektromagnetischen Felder. Im Rahmen weiterer Untersuchungen müssen die generellen Auswirkungen von Höchstspannungskabelanlagen auf Schritt-, Berührungsspannungen, die thermische Belastung der einzelnen Kabel selbst und die elektromagnetischen Felder im Detail untersucht werden.

9 Literatur

- [1] Muratovic Redzo, Induktive und ohmsche Beeinflussung von Hochspannungskabelsystemen, Dissertation am Institut für Elektrische Anlagen der technischen Universität Graz, 2016 (in Arbeit).
- [2] Schmutzner Ernst, Die induktive Beeinflussung von Rohrleitungssystemen, Dissertation am Institut für elektrische Anlagen der technischen Universität Graz. 1982.

- [3] Ernst Schmautzer, Die kartografische Aufnahme und Berechnung von induktiven Einfach- und Mehrfachbeeinflussungen durch Hochspannungsfreileitungen und -kabel im Fehlerfall und im Normalbetrieb, Institut für elektrische Anlagen, Graz, Technischer Bericht 1990
- [4] Vornorm ÖVE/ÖNORM E 8850, Ausgabe: 2006-02-01: Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz – Beschränkung der Exposition von Personen
- [5] ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), International Commission on Non-Ionising Radiation Protection, Health Physics 74 (4):494-522; 1998
- [6] ICNIRP: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz). [Richtlinien zur Begrenzung zeitlich variierende elektrische und magnetische Felder (1 Hz - 100 kHz)] Health Physics 99(6):818-836; 2010.
- [7] ÖVE/ÖNORM E 8383, Ausgabe 2000-03-01: Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV
- [8] ÖVE/ÖNORM EN 50522, Ausgabe 2011-12-01: Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV
- [9] IEC 60479-1, Ausgabe 2007-05 Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere - Teil 1: Allgemeine Aspekte