

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 104 (2013)
Heft: 12

Artikel: Erhöhung der Übertragungskapazität durch hybride AC/DC-Freileitungen
Autor: Pfeiffer, Martin
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856562>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 11.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Erhöhung der Übertragungskapazität durch hybride AC/DC-Freileitungen

Potenzial und Machbarkeit in der Schweiz

Das Schweizer Stromübertragungsnetz stösst an seine Leistungsgrenzen. Durch eine Konvertierung von bestehenden 380-kV-Wechselstromtrassen zu Übertragungswegen, auf denen Wechsel- und Gleichstromsysteme parallel auf dem gleichen Mast geführt werden, liesse sich die Übertragungskapazität deutlich erhöhen. Der Neubaubedarf könnte reduziert werden. Ist eine derartige Umwandlung aber technisch machbar? Können Schweizer Vorschriften eingehalten werden? Ein Projekt der ETH Zürich und Swissgrid hat damit begonnen, diese Fragen zu beantworten.

Martin Pfeiffer et al.

Das Streben nach einer nachhaltigen Energieversorgung wird künftig mit einem erhöhten Bedarf an elektrischer Energie einhergehen, der zunehmend durch erneuerbare Energiequellen gedeckt werden wird. Um die stochastischen Erzeugungsprofile dieser Quellen zu beherrschen und die durch Netzengpässe bedingte Nichtlieferung (Englisch: Curtailment) von Energie zu verhindern, sind Erhöhungen der Energiespeicher- und Übertragungskapazitäten nötig. Davon betroffen ist auch die Schweiz, die für den Stromtransit und die Energiespeicherung in der Zukunft eine noch bedeutendere Rolle spielen dürfte.

Als Bindeglied zwischen Produktion und Verbrauch ist das Übertragungsnetz eines der wichtigsten Elemente des Energieversorgungssystems. Für die Erneuerung und Weiterentwicklung des Übertragungsnetzes ist die Zusammenarbeit zwischen Industrie und wissenschaftlicher Forschung von zentraler Bedeutung. Die Kooperation von Swissgrid und der ETH Zürich ermöglicht es, wichtige Erfahrungen und Erkenntnisse bezüglich neuer Technologien in die Praxis umzusetzen, um ein nachhaltiges und effizientes Netz sicherzustellen.

Da die Gesellschaft dem Neubau von Freileitungstrassen kritisch gegenübersteht, stellt sich die Frage nach Möglichkeiten, die Kapazität bestehender Übertragungswege zu erhöhen. Eine interessante Option ist die Umwandlung von Drehstrom (AC) zu Hochspannungs-

Gleichstrom (HGÜ, englisch HVDC) [1, 2]. Das Potenzial ist erheblich: Durch niedrigere ohmsche Verluste und eine höhere effektive Spannung bei gleichen Isolationsabständen wie AC kann laut einer Studie über die Machbarkeit der Umwandlung von AC-Leitungen zu hybriden AC/DC Leitungen [1] die Konvertierung eines 420-kV-AC-Systems zu einem ±450-kV-DC-System die maximale Übertragungskapazität mehr als verdoppeln.

Um die Anbindung existierender AC-Knotenpunkte zu gewährleisten, ist in einem ersten Schritt allerdings nur die Umwandlung von einem der zwei Dreiphasen-

systeme, die normalerweise auf Schweizer Höchstspannungsmasten aufgespannt sind, denkbar. Auch in diesem Fall beträgt der Gewinn an maximaler Übertragungskapazität der Trasse immer noch 54%. Aufgrund der Unterschiede im Betrieb von AC- und DC-Leitungen ist die effektive Erhöhung der Energie, die übertragen werden kann, allerdings noch deutlich höher.

Eine solche Umrüstung hat aber auch eine Reihe von weiteren Konsequenzen. Neben einer Veränderung des elektromagnetischen Feldes in der Umgebung der Freileitungstrasse kommt es auch zu Kopplungseffekten zwischen dem AC- und dem DC-System. Markante Folgeerscheinungen sind insbesondere aufgrund der Korona-Entladungen an den DC-Leitern zu erwarten. Im Unterschied zu einem AC-Feld können die durch Korona entstehenden Raumladungen im hybriden Feld bis auf die Erde oder auch auf andere Leiterseile transportiert werden. Es entstehen Ionenströme, deren Konsequenz ein Gleichstromanteil im Wechselstromsystem oder eine Änderung des elektrischen Feldes in der Trasse sein kann. Auch die Geräuschemission und Radiointerferenz einer Freileitung kann durch eine Umrüstung beeinflusst werden [3]. Eine sorgfältige Evaluierung aller Effekte ist deshalb notwendig.

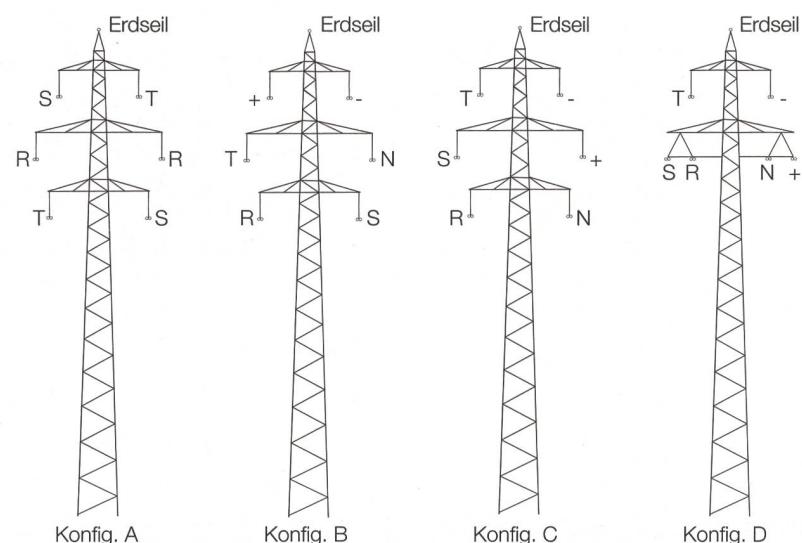
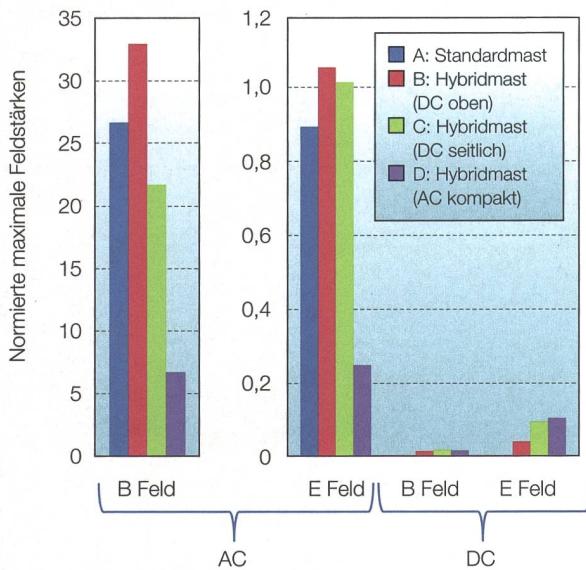


Bild 1 Betrachtete Mastkonfigurationen. [5]



Viele Mast-Geometrien denkbar

Die Platzierung der Leiter (3x AC-Phasen, 2x DC-Pole, 1x Neutralleiter) auf dem Mast stellt ein komplexes Optimierungsproblem dar, da sie in unterschiedlicher Weise auf verschiedene Umwelt- und Kopplungseffekte Einfluss nimmt. Ausgehend vom Status quo (Konfiguration A in **Bild 1**), ist zum Beispiel eine Geometrie, in der die DC-Pole an der Spitze des Mastes sind (Konfiguration B), von Vorteil im Hinblick auf die DC-Feldkomponenten und Ionenströme auf der Erde. Gleichzeitig weist diese Anordnung allerdings deutlich Nachteile in Bezug auf mögliche DC-Ionenstrom-Einkopplungen in die AC-Phasen und AC-Feldkomponenten am Boden auf [4]. Vergleichbare Kompromisse müssen auch für andere Umwelteinflüsse eingegangen werden.

Von den insgesamt 720 möglichen Konfigurationen bleiben bei genauerer Betrachtung 30 elektromagnetisch unterschiedliche Anordnungen übrig. Zwei beispielhafte Kombinationen sind in **Bild 1** mit B und C gekennzeichnet. Die Mastgeometrie D stellt eine kompaktere Konfiguration dar, in der die auf dem untersten Niveau befindlichen Leiter auf das mittlere Niveau angehoben werden. Die exakten Dimensionen basieren auf dem niedrigsten in der Schweiz üblichen Hochspannungsmast (Gesamthöhe knapp über 42 m). Für die kompakte Konfiguration D wurden die Positionen der Leiter R und N so gewählt, dass die Isolationsabstände prinzipiell

gewährleistet sind. Eine genauere Prüfung unter Berücksichtigung besonderer Eventualitäten ist allerdings noch ausstehend.

Situation in der Schweiz

Für eine komplette Analyse muss die Gesamtheit der oben genannten Umwelt- und Kopplungsauswirkungen untersucht werden. Teilweise besteht hier noch grosser Forschungsbedarf. Im Vergleich mit anderen Ländern ist in der Schweiz insbesondere der sehr niedrige Grenzwert für das AC-Magnetfeld («AC B-Feld») zu beachten.

Laut der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) darf an Orten, an denen sich Menschen aufhalten können, das AC-Magnetfeld den Wert von 100 µT nicht überschreiten. Zudem gibt es einen zweiten, wesentlich niedrigeren Grenzwert von 1 µT, der an Orten mit empfindlicher Nutzung gilt. Dies beinhaltet zum Beispiel alle Orte, an denen Menschen wohnen oder arbeiten. Als Grundlage der Feldberechn-

nung muss hierbei laut NISV der maximal zulässige Dauerstrom betrachtet werden (und nicht etwa das Jahresmittel). Dieser im Vergleich zum Ausland besonders niedrige Grenzwert schränkt die Zahl der möglichen Konfigurationen weiter ein. Zudem müssen die im Ausland durchgeföhrten Untersuchungen an potenziellen Hybridleitungen im Schweizer Kontext neu bewertet werden.

Da eine Umwandlung zu einem hybriden Mast das AC-Magnetfeld stark beeinflusst (siehe nächster Abschnitt), liegt in dieser Arbeit der Fokus auf der Machbarkeit der Umrüstung im Schweizer Kontext, d.h. in Bezug auf die Einhaltung des 1-µT-Grenzwertes. Dies bedeutet jedoch nicht, dass andere Auswirkungen einer Umrüstung unkritisch sind. Ein grosser Forschungsbedarf besteht insbesondere auf dem Gebiet der DC-Korona-Produktion und bezüglich der resultierenden Ionenströme. Im Vergleich zur Berechnung des AC-Magnetfeldes lassen sich diese Fragestellungen allerdings noch nicht mit Standardmethoden beantworten.

Simulationsergebnisse

Bilder 2 bis 4 zeigen Ergebnisse elektrostatischer (E-Feld) und magnetostatischer (B-Feld) Simulationen für die beschriebenen Mast-Geometrien [5]. Die angenommene Betriebsspannung beträgt 380 kV (verkettete Wechselspannung) beziehungsweise ±400 kV Gleichspannung. Diese etwas niedrigere Gleichspannung wurde im Bezug auf die Beherrschung von Koronaeffekten als realistischer eingeschätzt als ±450 kV. Die angenommenen Ströme betragen 1920 A (Wechselstrom-Effektivwerte) beziehungsweise 2000 A (Gleichstrom).

Dass das AC-Magnetfeld den kritischsten Faktor darstellt, verdeutlicht **Bild 2**, das die auf die jeweiligen Grenzwerte normierte maximale am Boden

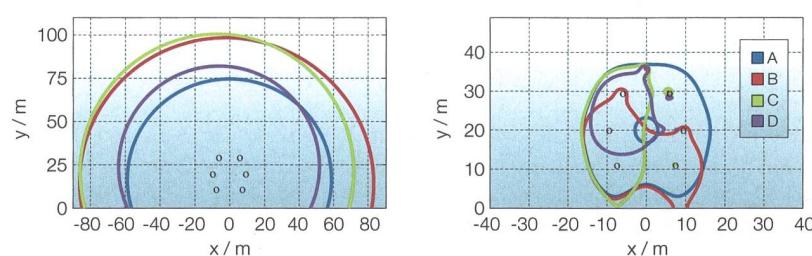


Bild 3 Links: AC B-Feld-Isolinien für 1-µT-Grenzwert. Rechts: AC E-Feld-Isolinien für 5-kV/m-Grenzwert.

auftretende Feldstärke aufzeigt. Während der Grenzwert für das AC E-Feld nur von den Konfigurationen B und C knapp überschritten wird, wird er für das AC B-Feld von allen Konfigurationen deutlich überschritten. Es gibt also einen Bereich in der Trasse, in der Menschen nicht arbeiten oder wohnen dürfen.

Da es für HGÜ in der Schweiz derzeit noch keine Grenzwerte gibt, beziehen sich die DC-Werte auf internationale Richtlinien aus Referenzen [6, 7]. Es muss zusätzlich erwähnt werden, dass die Werte für DC E-Felder unter Vernachlässigung von Raumladungen berechnet wurden. Je nach Korona-Intensität kann das raumladungsbeschwerte Feld die hier angegebenen Werte um ein Mehrfaches überschreiten.

Bild 3 veranschaulicht die räumliche Ausbreitung der Bereiche, in denen die jeweiligen AC-Grenzwerte überschritten werden. Das bedeutendste Merkmal ist die Breite des Korridors, in dem der 1- μ T-Grenzwert für Konfigurationen B und C überschritten wird (linke Seite). Der Bereich, in dem der E-Feld-Grenzwert von 5 kV/m überschritten ist, ist verhältnismässig klein (rechte Seite).

Die durch eine Umwandlung bedingte Verbreiterung des Bereichs, in dem 1- μ T überschritten werden, lässt

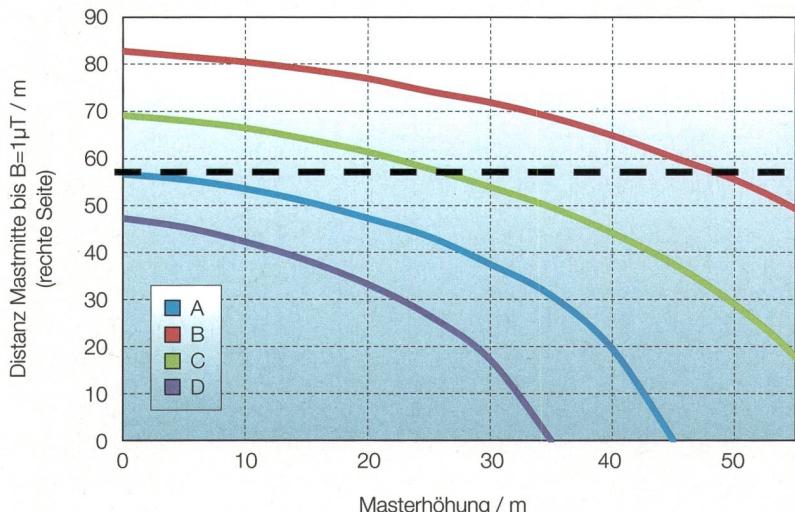


Bild 4 Distanz von Mastmitte bis $B=1 \mu\text{T}$ (1 m über Boden, rechte Seite) als Funktion der Masterhöhung.

sich auf den Wegfall eines Kompensationseffektes zurückführen, von dem Trassen mit zwei parallel verlaufenden und gekoppelten Dreiphasensystemen profitieren (z.B. Konfiguration A). Zusätzliche Massnahmen, die dem entgegenwirken können, sind als also erforderlich.

Eine Möglichkeit ist die Erhöhung der Leitermasten. **Bild 4** zeigt die Breite des Bereiches, in dem das B-Feld den 1- μ T-Grenzwert überschreitet, als Funk-

tion einer Masterhöhung. Die gestrichelte schwarze Linie entspricht der derzeitigen Situation. Es ist ersichtlich, dass für Masten B und C massive Erhöhungen notwendig wären, um das derzeitige Niveau beizubehalten (etwa 50 m für Konfiguration B bzw. 27 m für C). Derartige Veränderungen an den Masten sind unter anderem aus ästhetischen Gründen wohl kaum tragbar.

Eine wesentlich erfolgversprechendere Option ist die Kompaktierung der Phasen, wie in Konfiguration D. **Bilder 3 und 4** zeigen, dass damit die Bereiche, in denen die E- und B-Feldgrenzen überschritten werden, im Vergleich zu Konfiguration A sogar verkleinert werden können.

Umsetzung prinzipiell machbar

Diese Ergebnisse zeigen, dass eine deutliche Kapazitätssteigerung durch die Umwandlung von bestehenden AC-Freileitungstrassen zu AC/DC-Hybridleitungen erzielt werden kann. Obwohl eine Umwandlung vielfältige Auswirkungen hat, gibt es vom derzeitigen Standpunkt des Wissens her keine unüberwindbaren technischen Hindernisse. Als kritischer Punkt wurde in diesem Artikel die Vergrösserung des Bereichs, in dem der Schweizer 1- μ T-Grenzwert überschritten ist, identifiziert. Dem kann jedoch durch eine Kompaktierung der Phasen effektiv entgegengewirkt werden.

Grosser Forschungsbedarf besteht weiterhin hinsichtlich DC-Korona-Entladungen und deren Folgeeffekten, wie

Résumé Augmentation de la capacité de transport par des lignes aériennes AC/DC hybrides

Potentiel et faisabilité en Suisse

Le réseau suisse de transport d'électricité atteint ses limites en termes de performances. Une transformation de l'un des systèmes de courant alternatif à 380 kV existants sur le même pylône en une ligne de courant continu (ligne hybride) permettrait d'augmenter considérablement la capacité de transport. Les besoins en nouvelles installations seraient susceptibles d'être réduits de façon radicale. Cette solution serait-elle applicable d'un point de vue technique compte tenu des prescriptions suisses (champs électriques et magnétiques, bruit et prescriptions techniques) ? Un projet mené par l'ETH de Zurich et Swissgrid se consacre à cette question. D'après les premiers résultats, la transformation des lignes aériennes AC existantes en lignes hybrides AC/DC permet d'obtenir une augmentation considérable de la capacité. Bien qu'une transformation entraîne des répercussions diverses, ce processus ne présente aucun obstacle technique insurmontable d'après l'état actuel des connaissances. Un point critique a toutefois été relevé dans cet article : l'agrandissement de la zone dans laquelle la valeur limite valable en Suisse de 1 μ T est dépassée. Néanmoins, un compactage des phases permettrait d'agir efficacement contre cet inconvénient.

Par ailleurs, les besoins en recherche restent importants en ce qui concerne les effets corona DC et leurs conséquences, telles que la présence de courant DC dans les conducteurs AC, les augmentations du champ électromagnétique DC et les courants ioniques vers la terre. D'après les premières recherches, il est possible de maintenir l'ampleur de ces effets à un niveau raisonnable. Cependant une observation plus précise nécessite la mise en œuvre de nouvelles méthodes de simulation, ainsi que la réalisation d'expériences en laboratoire et d'essais sur le terrain supplémentaires.

No

zum Beispiel DC Stromanteile in den AC-Leitern, Erhöhungen des DC E-Feldes und Ionenströme auf die Erde. Erste Recherchen deuten darauf hin, dass das Ausmass dieser Effekte in einem akzeptablen Rahmen gehalten werden kann. Für eine genauere Betrachtung und insbesondere zur Entwicklung von Optimierungsstrategien sind allerdings Simulationsmethoden, welche die Bewegung von Raumladungen im AC/DC-Hybridfeld berechnen können, notwendig. Da jedoch statistische Faktoren wie Witterungsbedingungen und Oberflächenbeschaffenheiten der Leiter eine massgebliche Rolle spielen, sind zusätzlich Laborexperimente und Feldversuche unerlässlich.

Referenzen

- [1] J. Lundkvist, I. Gutman, L. Weimers, Feasibility study for converting 380 kV AC lines to hybrid AC/DC lines, EPRI's High-Voltage Direct Current & Flexible AC Transmission Systems Conference, Westminster, CO, USA (2009).
- [2] Cigré Brochure 425, Increasing Capacity of Overhead Transmission Lines – Needs and Solutions, Working Group B2/C1.19 (2010).
- [3] U. Straumann, C.M. Franck, Discussion of Converting a Double-Circuit AC Overhead Line to an AC/DC Hybrid Line with Regard to Audible Noise, Cigré Symposium, Bologna (2011).
- [4] U. Straumann, C.M. Franck, Ion-Flow Field Calculations of AC/DC Hybrid Transmission Lines, IEEE Trans. Pow. Del. (2012).
- [5] T. Guillod, Simulation of AC/DC Hybrid Overhead Lines, Master Thesis ETH Zürich (2012/13).
- [6] Bundesumweltministerium Deutschland, Verordnung zur Änderung der Vorschriften über elektromagnetische Felder und das telekommunikationsrechtliche Nachweisverfahren (08.05.2013).
- [7] Council of the European Union, Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz), Official Journal of the European Communities (1999).

Angaben zu den Autoren

Martin Pfeiffer, MSc ETH, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im High Voltage Laboratory der ETH.

ETH Zürich, 8092 Zürich, mpfeiffer@ethz.ch

Thomas Guillod, MSc ETH, hat seine Masterarbeit im High Voltage Laboratory geschrieben und ist jetzt wissenschaftlicher Mitarbeiter im Power Electronic Systems Laboratory der ETH.

ETH Zürich, 8092 Zürich, guillod@lem.ee.ethz.ch

Martin Weber, BA FH und BASc FH, ist Gruppenleiter Projektierung Leitungen bei Swissgrid.

Swissgrid AG, 5070 Frick, martin.weber@swissgrid.ch

Christian Franck, Prof. Dr., ist Professor für Hochspannungstechnik an der ETH.

ETH Zürich, 8092 Zürich, cfranck@ethz.ch

Anzeige

... richten Sie Ihre
Fragen an:



www.technik-forum.ch

powered by electrosuisse ➤



a BBC GROUP company

Wir sind der Komplettanbieter für Energieverteil- und Kabelverbindungstechnik im Bereich Mittel- und Niederspannung. Von Beratung bis Unterhalt profitieren Sie vom breiten Know-how unserer Spezialisten und unser Rundum-die-Uhr-Service sorgt für grenzenlose Power. Heute und morgen.

Cellpack Power Systems AG
Schützenhausstrasse 2
5612 Villmergen
Tel. 056 618 18 18
power.systems@cellpack.com

CELLPACK
Power Systems