

**Zeitschrift:** Bulletin Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik  
**Band:** 106 (2015)  
**Heft:** 5

**Artikel:** Fehler auf DC-Leitungen  
**Autor:** Troitzsch, Constanze  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-856648>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 01.04.2025

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

# Fehler auf DC-Leitungen

## Grundprinzipien für den Entwurf von Schutzkonzepten in vermaschten Hochspannungs-Gleichstromübertragungsnetzen

Weltweit wird der Aufbau von vermaschten HGÜ-Netzen in verschiedenen Projekten vorangetrieben. Ein Hauptaspekt liegt in der Anbindung verbraucherfern regenerativ erzeugter Energie an weit entfernte Lastzentren, um so bestehende Übertragungsnetze zu entlasten. Um die Verfügbarkeit eines solchen Energiesystems zu gewährleisten, ist der Umgang mit Fehlerzuständen und damit der Aufbau eines adäquaten Netzschutzkonzepts von enormer Bedeutung. Dieser Artikel vermittelt einen Überblick über die Anforderungen an zukünftige Netzschutzsysteme in vermaschten HGÜ-Netzen.

### Constance Troitzsch

Die Hochspannungsgleichstromübertragung ist eine Technologie zum verlustarmen Transport grosser Energiemengen über grosse Entfernungen. Ein typisches Anwendungsfeld ist die Übertragung von verbraucherfern gelagerten regenerativen Energien in weit entfernte Lastzentren, wie z.B. bei der Anbindung von Offshore-Windparks in der Nordsee. [1]

Die kommerzielle Nutzung der HGÜ-Technologie begann in der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts, basierend auf Quecksilberdampföhren, und nahm mit der Entwicklung von effizienteren thyristorbasierten Stromrichtern signifikant zu. Diese Umrichter sind stromgeführt, d.h. dass die Stromrichtung an ihren Ausgangsklemmen konstant ist. Eine Leistungsflussumkehr ist nur durch Umpolung der DC-Spannung erzielbar. Das ist im Allgemeinen in Netzen, in denen sich Energieflussrichtungen abhängig vom Belastungszustand ändern, und insbesondere in Kabelsystemen technologisch nur schwer umzusetzen.

Der Aufbau von vermaschten HGÜ-Systemen ist erst durch die Entwicklung von IGBT-basierten (Insulated Gate Bipolar Transistor) Umrichtern technisch realisierbar. Bei diesen spannungsgeführten Umrichtern ist die Polarität der ausgangseitigen DC-Spannung immer gleich, sodass Wechsel von Leistungsflussrichtungen nicht durch Umpolung, sondern durch die Umkehr der Stromrichtung realisiert werden. Basierend auf dieser Technologie wird weltweit der Aufbau von

Multi-Terminal-DC (MTDC-Systemen), bei denen mehrere Umrichterstationen ohne das Bilden von Maschen zusammengeschaltet werden, bis hin zu vollständig vermaschten HGÜ-Netzen untersucht. Federführende Projekte sind in diesem Zusammenhang die Asia Supergrid Initiative [2] oder das Atlantic Wind Connection Backbone Transmission Projekt [3].

Neben dem Transport von grossen Energiemengen über grosse Entfernungen können vermaschte HGÜ-Netze zusätzlich bestehende Drehstromübertragungsnetze entlasten, indem sie überschüssige Energie aus diesen aufnehmen und in entfernte Bedarfszentren transportieren. Dieser Ansatz ist auch in Europa denkbar. Seit der Integration von verbraucherfern gelegenen erneuerbaren Energien in den europäischen Kraftwerkspark und der voranschreitenden Strommarktliberalisierung haben sich die traditionellen Leistungsflüsse geändert, für die das bestehende Übertragungsnetz nicht ausgelegt ist. Netzengpässe, die zu einer Gefährdung der Versorgungssicherheit führen können, sind die Folge.

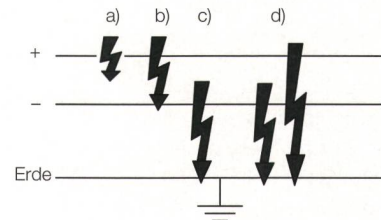
Damit ein überlagertes und vermaschtes HGÜ-Netz solche Probleme entschärfen kann, muss dessen sicherer und zuverlässiger Betrieb gewährleistet werden. In diesem Zusammenhang ist es notwendig, sich mit dem Umgang von DC-Fehlerzuständen auseinanderzusetzen. Aufgrund der spezifischen Eigenschaften der Fehlerströme in HGÜ-Netzen sind die in Drehstromsystemen etablierten Netzschutzkonzepte nicht

anwendbar. Dieser Artikel beschäftigt sich mit DC-Leitungsfehlern, den daraus resultierenden DC-seitigen Fehlerströmen und Anforderungen an zukünftige HGÜ-Netzschutzsysteme.

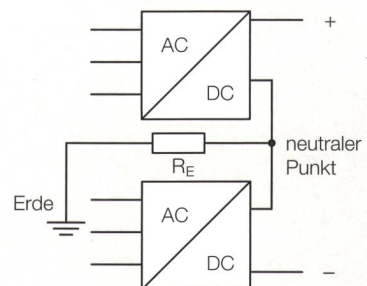
### Fehler in HGÜ-Systemen

Die Kernkomponenten eines vermaschten HGÜ-Systems sind die spannungsgeführten AC/DC-Umrichter, die das Drehstrom- und das Gleichspannungsnetz miteinander verbinden. Durch die Zusammenschaltung mehrerer Umrichter über DC-Leitungen entstehen vermaschte HGÜ-Netze.

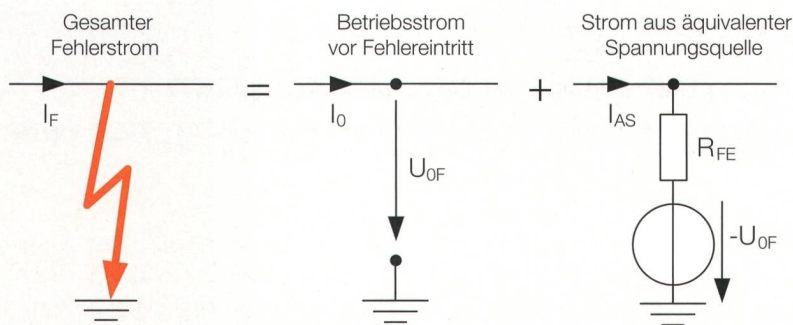
Fehler können in allen Betriebsmitteln auftreten, wobei sich dieser Artikel auf DC-Leitungsfehler beschränkt, deren Komplexität hinsichtlich Beschreibung, Berechnung und Detektion mit dem Grad der Netzvermaschung steigt. HGÜ-Leitungen sind entweder mono- oder bipolar ausgeführt. Monopolare Systeme sind unsymmetrisch aufgebaut, da sie nur aus einem leitenden positiven oder negativen Pol und



**Bild 1** Fehlerarten auf bipolaren DC-Leitungen: a) Leitungsunterbrechung, b) Pol-Pol-Fehler, c) Pol-Erde-Fehler (starr geerdetes Netz), d) Pol-Erde-Erdschluss (isoliert betriebenes Netz), der zum Doppelerdschluss führen kann.



**Bild 2** Prinzipbild eines Umrichters für eine bipolare Übertragungsstrecke.



**Bild 3** Zusammensetzung des Fehlerstroms auf einer DC-Leitung bei einem Pol-Erde-Fehler.

einem Rückleiter bestehen. Im Gegensatz dazu besitzen bipolare Übertragungssysteme sowohl einen positiven als auch einen negativen Pol, sodass aufgrund ihres symmetrischen Designs bei Normalbetrieb kein mitgeführter Rückleiter benötigt wird.

Im Folgenden wird der Fokus auf bipolare DC-Leitungen gelegt. Fehler auf diesen Systemen lassen sich ähnlich wie im Drehstromsystem in Längs- und Querfehler unterteilen. Bei Längsfehlern handelt es sich um Leitungsunterbrechungen (Bild 1a), beispielsweise aufgrund von Materialermüdung. Unter Querfehlern versteht man Zustände, bei denen unbeabsichtigt eine niederohmige Verbindung mindestens zweier Betriebskomponenten unterschiedlicher elektrischer Potenziale existiert, z.B. zwischen beiden Polen (Pol-Pol-Fehler, Bild 1b) oder dem positiven/negativen Pol und Erde (Pol-Erde-Fehler, Bild 1c). Typische Ursachen von Querfehlern auf Freileitungen sind verschmutzte Isolatoren in Kombination mit hoher Luftfeuchte oder Blitzeinschläge in Leiterseile, die Rücküberschläge zum Mast zur Folge haben (beides Pol-Erde-Fehler). Pol-Pol-Fehler entstehen beispielsweise durch Fremdkörper zwischen beiden Polen und haben immer satte Kurzschlüsse zur Folge. Im Gegensatz dazu ist die Grösse und Charakteristik der Fehlerströme bei Pol-Erde-Fehlern entscheidend von der Systemerdung abhängig. Da in bipolaren Übertragungssystemen keine technische Notwendigkeit besteht, den Rückleiter mitzuführen, kann dieser an den Umrichterstationen entweder hoch- oder niederohmig geerdet werden. Dieses Vorgehen ist mit der Sternpunktbehandlung an dreiphasigen Generatoren und Transformatoren im Drehstromsystem vergleichbar. Ist das HGÜ-Netz starr, d.h. der Widerstand  $R_E$  in Bild 2 ist niederohmig, treten bei Pol-Erde-Fehlern Kurzschlussströme auf, die um ein Vielfaches grösser als die Betriebsströme sind. Wird dieser sogenannte Neutralpunkt nicht mit Erde verbunden, d.h.  $R_E$  ist hochohmig, wird ein

Fehler mit Erdbertührung als Erdschluss bezeichnet. Erdschlussströme befinden sich in der Grössenordnung der Betriebsströme und führen dadurch nicht wie Kurzschlussströme zur thermischen oder mechanischen Zerstörung der Betriebsmittel. Nachteilig ist, dass sich die Spannung im Erdschlussfall auf dem gesunden fehlerfreien Pol verdoppelt. Da es nicht wirtschaftlich ist, DC-Leitungen auf die doppelte Nennspannung zu isolieren, können weitere Überschläge, sogenannte Doppelerdschlüsse (Bild 1d), die Folge sein.

### Fehlerströme in HGÜ-Netzen

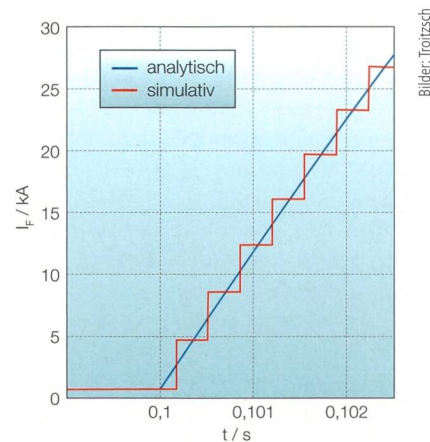
Für die Dimensionierung eines HGÜ-Netzschutzsystems ist neben den auftretenden Fehlerarten auch die Kenntnis über die Charakteristik und Grössenordnung der Fehlerströme von zentraler Bedeutung. Die grösste zu beherrschende Herausforderung liegt darin, dass DC-Leitungsströme keine natürlichen Nulldurchgänge, wie Wechselströme, besitzen, an denen der Stromfluss im Fehlerfall unterbrochen werden kann. Deshalb ist die Entwicklung neuer DC-Schaltertechnologien, wie die von Hybridschaltern, unumgänglich.

Zudem muss die Ortsabhängigkeit von Fehlerströmen, die in Drehstromsystemen vernachlässigbar ist, in weit ausgedehnten HGÜ-Netzen auf Grund von Laufzeiteffekten berücksichtigt werden. DC-Fehlerströme und -spannungen breiten sich abhängig von der Systemerdung nach den Gesetzen der Wanderwellentheorie vom Fehlerort ins gesamte HGÜ-Netz aus. Der gesamte Fehlerstrom ( $I_F$ ) setzt sich aus dem Leitungsstrom vor Fehlereintritt ( $I_0$ ) und einer Fehlerstromkomponente nach Fehlereintritt ( $I_{AS}$ ) zusammen (Bild 3). Der Fehlerstromanteil entsteht in der Modellvorstellung dadurch, dass alle Umrichter im System kurzgeschlossen werden und eine äquivalente Spannungsquelle an der Fehlerstelle eingefügt wird, die den Übergang vom Normalbetriebs- zum Fehlerzustand simuliert. Dieser Ansatz orientiert

sich an der Beschreibung von Fehlerströmen in mehrfach gespeisten Drehstromnetzen mit Hilfe des Thevenin-Theorems.

Im Folgenden wird ein theoretisches Worst-Case-Szenario betrachtet, in welchem der Fehlerzustand bei einem Pol-Erde-Fehler in einem starr geerdeten Netz abrupt eintritt und die Umrichter ihre DC-Spannung aufrechterhalten. Das ist in der Praxis aufgrund des schnell einsetzenden internen Umrichterüberstromschutzes unmöglich. Der Beginn des zu erwartenden Fehlerstromverlaufs ist rot in Bild 4 dargestellt und wurde aus der Simulation mit einer Konstantspannungsquelle, die die Umrichter abbildet, und einem verteilten Leitungsparametermodell gewonnen. Charakteristisch ist der stufenförmige Verlauf, der aus der Berücksichtigung von Laufzeiteffekten und Ortsabhängigkeiten resultiert. Die Fehlerstromkomponente breitet sich in Form einer Welle von der Fehlerstelle ausgehend im Netz aus, wird an Netzknoten reflektiert und gebrochen und überlagert sich schlussendlich zum gesamten Fehlerstrom. Dieser kann analytisch angenähert werden, indem das verteilte Leitungsparametermodell in ein konzentriertes  $\pi$ -Modell, bestehend aus einem Leitungswiderstand, einer Leitungsinduktivität und -kapazität, umgewandelt wird. Die so gewonnene Kurve ist blau in Bild 4 dargestellt und nähert sich dem eigentlichen Fehlerstromverlauf sehr gut an. Würden die Umrichter bis zum Ende den Fehler speisen, würde sich der Fehlerstrom einem stationären Endwert annähern, der um ein Vielfaches höher als der Betriebsstrom vor Fehlereintritt ist.

In HGÜ-Netzen können die Ströme abhängig von den Leitungsparametern mehrere 100 kA und Anstiege im Bereich meh-



**Bild 4** Fehlerstromverlauf bei einem Pol-Erde-Kurzschluss: Simulativ unter Berücksichtigung mit und analytisch ohne Laufzeiteffekte auf DC-Leitungen.

rerer kA/ms erreichen. Überschreitet der Strom im Umrichter einen definierten Schwellwert, werden zum Schutz die empfindlichen Halbleiterbauelemente überbrückt. In diesem Zustand ist der Umrichter nicht steuerbar, was enorme Zerstörungen im Kurzschlussfall zur Folge hätte. Moderne, modular aufgebaute Multilevel-Umrichter (MMC) können sich an der Fehlerklärung beteiligen, sofern sie sich in einem regelbaren Zustand befinden. Unter der Annahme, dass der Umrichterüberstromschutz bei einem Strom in der Grössenordnung des 1,3-fachen Nennstromes einsetzt, muss der DC-Leitungsschutz innerhalb weniger Millisekunden den Fehler detektieren, damit der Umrichter zur Fehlerklärung beitragen kann. Dies verdeutlicht die sehr hohen Anforderungen an ein HGÜ-Netzschutzkonzept.

### Anforderungen an ein Netzschutzkonzept für HGÜ-Netze

Aufgrund der bereits erläuterten speziellen Eigenschaften von Fehlerströmen in vermaschten HGÜ-Netzen müssen neuartige Netzschutzkonzepte entwickelt werden. Heutige, in Drehstromsystemen weit verbreitete Konzepte, wie beispielsweise der Distanzschutz, können aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Trägheit nicht eingesetzt werden. Trotzdem sollten die jahrzehntelang erprobten Grundsätze beim Design von Schutztechnik berücksichtigt werden. Nach diesen muss ein HGÜ-Netzschutzsystem zuverlässig sein, d.h. es muss jeden Fehlerzustand unabhängig vom aktuellen Schalt- und Betriebszustand erkennen. Zudem muss es empfindlich sein, damit Überansprechen (Auslösungen ohne Fehlerfall) und Unteransprechen (keine Auslösung im Fehlerfall) verhindert werden. Um den Versorgungsausfall bei einem Fehler auf ein Minimum zu begrenzen, muss das Netzschutzkonzept selektiv arbeiten, d.h. es darf nur das fehlerbehaftete Betriebsmittel vom Netz getrennt werden. Eine weite Anforderung ist die Schnelligkeit, die im HGÜ-Netz besonders wichtig ist. Fehler müssen innerhalb weniger Millisekunden zuverlässig detektiert und geklärt werden.

### Résumé

#### Défauts sur les lignes de transport CC

##### Principes fondamentaux pour l'élaboration de concepts de protection dans des réseaux de transport maillés à courant continu haute tension

Les systèmes de transport CCHT ont fait leurs preuves dans le passé en matière de transport de quantités d'énergie importantes sur de grandes distances. Désormais, ils sont en mesure de contribuer, sous forme de réseaux superposés, au soulagement des systèmes de transport triphasés existants, à la suppression des congestions de réseau et, par conséquent, à l'augmentation de la sécurité d'approvisionnement.

Pour ce faire, il est toutefois indispensable de garantir une exploitation fiable des systèmes CCHT. Ceci nécessite de réfléchir à la manière de traiter les défauts CC. Outre les différents types de défauts, la connaissance de la caractéristique et de l'ordre de grandeur des courants de défaut est également importante pour le dimensionnement d'un système de protection de réseau pour le transport CCHT. Le défi majeur réside dans le fait que, contrairement aux courants alternatifs, les courants de conduction CC ne disposent d'aucun passage par zéro naturel qui permette d'interrompre le passage du courant en cas de défaut. C'est la raison pour laquelle la conception de nouvelles technologies d'interrupteur pour le CC, telles que celle des interrupteurs hybrides, se révèle indispensable. De plus, la localisation des courants de défaut dans les réseaux de transport CCHT très étendus doit être également prise en considération en raison des effets dus aux temps de propagation contrairement à celle des courants de défaut se trouvant dans les réseaux triphasés. No

Neben den genannten technischen Anforderungen muss auch stets die Wirtschaftlichkeit berücksichtigt werden. Investitionen in die Schutztechnik sollten in einem angemessenen Verhältnis zu den Betriebsmittelkosten stehen. Die Herausforderung beim Entwurf eines HGÜ-Netzschutzsystems besteht darin, allen genannten Anforderungen gerecht zu werden. Problematisch ist, dass diese sich zum Teil gegenseitig ausschliessen. So ist es beispielsweise für die Selektivitätsanforderung essenziell, in jeden Zweig einen DC-Leistungsschalter zu installieren, um im Fehlerfall nur die betroffene Leitung auszuschalten. Das ist wegen der (heute noch) hohen Anschaffungskosten dieser Schalter mit dem Wirtschaftlichkeitskriterium unvereinbar.

### Fazit

Der Aufbau von vermaschten HGÜ-Versorgungsnetzen wird weltweit in verschiedenen Projekten diskutiert und vorangetrieben. Um solche Energieversorgungssysteme sicher betreiben zu können, ist der Aufbau zuverlässiger und wirtschaftlicher HGÜ-Netzschutzsysteme von zentraler Bedeutung, was die Kenntnis der möglichen DC-Fehlerströme voraussetzt.

Dieser Artikel klassifiziert Fehler auf DC-Leitungen, beschreibt deren Charakteristiken sowie Grössenordnungen und leitet daraus Anforderungen an das Design zukünftiger Schutzsysteme ab. HGÜ-Systeme haben sich in der Vergangenheit für den Transport hoher Energiemengen über grosse Entfernungen bewährt. Zukünftig können sie in Form von überlagerten Netzen dazu beitragen, bestehende Drehstromübertragungssysteme zu entlasten, Netzengpässe zu beseitigen und so die Versorgungssicherheit zu erhöhen.

### Literatur

- Constanze Troitzsch, Netzfehler in vermaschten HGÜ-Netzen, Univ.-Verlag Ilmenau, 2014.
- C. Troitzsch, A.-K. Marten, D. Westermann, «Non-telecommunication based DC line fault detection methodology for meshed HVDC grids», in Proc. IET 11<sup>th</sup> International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2015), Birmingham, UK, 02/2015.

### Referenzen

- [1] [www.offshore-windenergie.net](http://www.offshore-windenergie.net).
- [2] [www.desertec.org](http://www.desertec.org).
- [3] [www.atlanticwindconnection.com](http://www.atlanticwindconnection.com).

### Autorin

**Constanze Troitzsch**, M.Sc. in Elektrotechnik (TU Ilmenau), arbeitet bei der Swissgrid AG im Bereich Operational Planning.

Swissgrid AG, 5080 Laufenburg  
constanze.troitzsch@swissgrid.ch

### Electrosuisse / ETG-Kommentar

#### HGÜ-Forschung

Mit der heutigen HGÜ-Konvertertechnik ist es prinzipiell möglich, HGÜ-Netze zu bauen. Erste sternförmige Netze mit 3 Knoten sind bereits in Betrieb. Weil aber sowohl die Detektion als auch die Unterbrechung von Kurzschlüssen im HGÜ-Netz noch ungelöst sind, war es bisher nicht möglich, vermaschte HGÜ-Netze zu bauen. Zahlreiche Forschergruppen und Firmen beschäftigen sich mit diesen Themen. In der Cigré-Arbeitsgruppe JWGA3/B4.34 wird ein systematischer Überblick erarbeitet, der die Anforderungen an HGÜ-Schaltgeräten und ihre Leistungsfähigkeit aufführt. Die Diskrepanz zwischen Anforderungen und Leistungsfähigkeit zeigt dabei auf, wo noch Handlungsbedarf besteht.

**Christian Franck**, Professor am Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannung der ETH Zürich sowie Vorstandsmitglied der ETG von Electrosuisse.