

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 105 (2014)
Heft: 12

Artikel: AC-DC-Hybridleitungen für die Anbindung der Schweiz in Europa
Autor: Sander, Bernhard / Moor, Daniel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856338>

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: 30.03.2025

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

AC-DC-Hybridleitungen für die Anbindung der Schweiz an Europa

Ein Bericht über deutsch-schweizerische Zusammenarbeit

Für den Zugang zu europäischen Strommärkten benötigt die Schweiz eine leistungsfähige Anbindung an das geplante europäische Supergrid. Mittel- bis langfristig ist eine Erhöhung der Transportkapazität an der Grenze zu Deutschland interessant, insbesondere, um die erneuerbaren Energien mit Schweizer Energiespeichern in das Netz zu integrieren. Die Konversion eines 380-kV-Dreiphasen-Wechselstromsystems von bestehenden mehrsystemigen Freileitungen zu einem bipolaren 400-kV-Gleichstromsystem stellt dabei eine interessante Möglichkeit dar.

Bernhard Sander, Daniel Moor

Die massive Förderung der neuen erneuerbaren Energien hat in den letzten Jahren den mitteleuropäischen Strommarkt und den Betrieb der Stromnetze extrem verändert. Dieser gesamteuropäische Trend hat sich mit Blick auf die gegenwärtige Diskussion um die Förderprogramme etwas abgeschwächt, eine Wende ist jedoch nicht in Sicht. Zum einen werden durch die Bevorzugung der neuen erneuerbaren Energien die konventionellen Kraftwerke zunehmend aus dem Strommarkt gedrängt. Zum anderen erschwert die in Bezug auf Schwankungshöhe und -geschwindigkeit wachsende Volatilität dieser Einspeisungen den Netzbetrieb. Auch die Strompreisschwankungen haben in der Folge stark zugenommen – ihre Prognostizierbarkeit ist höchst schwierig geworden. Gefragt sind in einem solchen Strommarkt hochflexible Stromproduktion und -speicherung im Viertelstundenbereich zu marktfähigen Preisen. Für Investitionen in den konventionellen Kraftwerkspark fehlen heute den Produzenten jedoch ausreichend verbindliche Planungsprämien. Die Politik, Regulierungsbehörden und Marktteilnehmer sind in Anbetracht dieser Entwicklungen mehr denn je gefordert, um die Versorgungssicherheit auch längerfristig zu gewährleisten.

Mehr Netz für erneuerbare Stromproduktion

Die Entwicklungen am Strommarkt haben die Stromaustausch-Muster und die Nutzung der mitteleuropäischen

Übertragungsnetze stark verändert. **Bild 1** zeigt den deutschen Transportbedarf, berechnet für das Jahr 2023. Die Netzstabilität stösst durch diese Tendenz vermehrt an ihre Grenzen. Um die Versorgungssicherheit gewährleisten zu können, hat die gegenseitige Abhängigkeit unter den mitteleuropäischen Staaten zugenommen. Der Bedarf nach weiterer Vernetzung steigt deshalb kontinuierlich. Europa muss im Stromsektor näher zusammenrücken, um die Herausforderungen der zukünftigen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen bewältigen zu können. Die Europäische Union (EU) und die Organisation der europäischen Übertragungsnetzbetreiber (Entso-E) beschäftigen sich im Rahmen der Studie e-Highway 2050 mit einem möglichen Konzept für ein europäisches Supergrid. Der Planungshorizont ist 2030–2050. Deutschland plant im nächsten Jahrzehnt den Zubau vieler neuer Übertragungsleitungen, darunter drei neue leistungsfähige Nord-Süd-Gleichstromverbindungen.[1]

Inmitten dieser Entwicklungen präsentiert sich die Situation in der Schweiz wie folgt: Auf der Produktionsseite dominieren mittel- bis langfristig der Verzicht auf Kernenergie, der Ausbau der neuen erneuerbaren Energien und der Neubau grosser alpiner Pumpspeicher-Wasserkraftwerke. Der dazu erforderliche Ausbau des Übertragungsnetzes kommt nur zögernd voran. Ob auf Verbraucherseite trotz Bevölkerungszuwachs, Sparmassnahmen und Umstieg von anderen Ener-

gieträgern auf Strom die Stromlast gemäss den politisch geprägten Strategien auf Bundesebene abnehmen wird, bleibt abzuwarten. Wesentlich für die Versorgungssicherheit der Schweiz wird sein, dass die Transportkapazitäten der Netze auf die zu erwartenden Szenarien wie z.B. Kälteperioden ausgelegt werden und dass die neuen Pumpspeicher ihre hohe Leistungsfähigkeit am europäischen Strommarkt voll ausschöpfen können. So sieht die im Jahr 2013 vorgegebene Strategie Netze des Bundesrats [2] insbesondere eine gute Anbindung der Schweiz an neue europäische Stromautobahnen vor.

Gleichspannung – eine interessante Alternative

Beim Bau neuer leistungsfähiger Verbindungen über grosse Distanzen hat Gleichstrom (direct current, DC) gegenüber Wechselstrom (alternating current, AC) diverse Vorteile. Neben den Kosten sind insbesondere die geringeren elektrischen Leitungsverluste, die gute Spannungsstabilität, der vernachlässigbare Blindleistungsbedarf und die kompakte

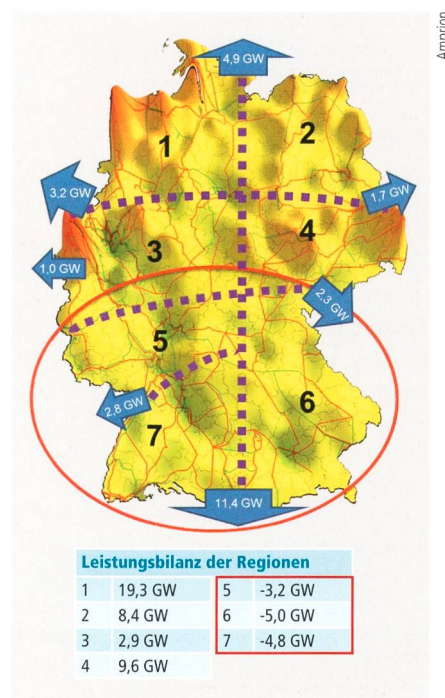


Bild 1 Transportbedarf von Deutschland am 9. Januar 2023.

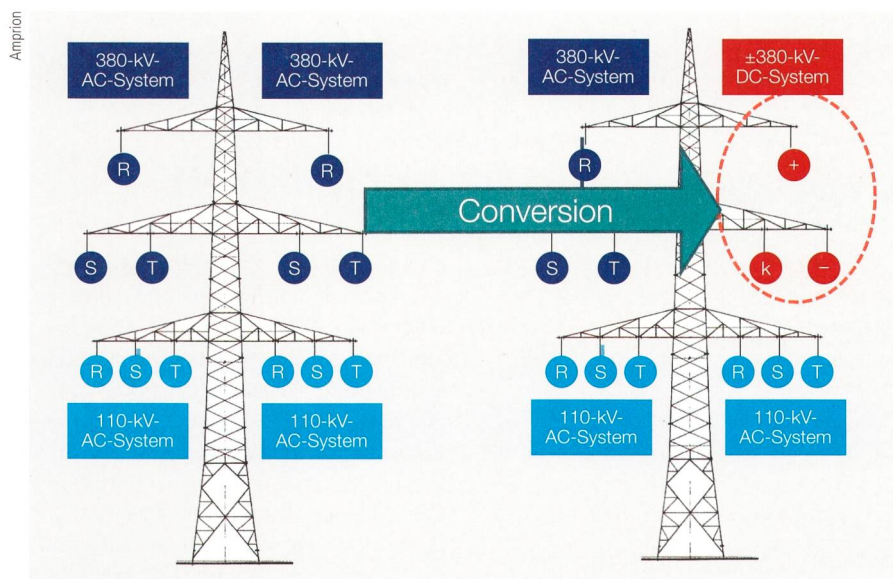


Bild 2 Konversion von AC zu DC.

Freileitungs- und Kabelbauweise erwähnenswert. Im Leitungsbau braucht es für eine einsträngige, monopolare DC-Verbindung nur zwei, für eine zweisträngige, bipolare DC-Verbindung mit metallischem Rückleiter nur drei Hauptstromleiter, während Dreiphasen-AC-Systeme für eine einsträngige Verbindung bereits drei Hauptleiter benötigen. Für Höchstspannungs-Gleichstromverbindungen mit DC-Freileitungen liegen jahrzehntelange Erfahrungen bis zu Nennspannungen von ± 600 kV vor. DC-Teilverkabelungen sind zwar auf der Höchstspannungsebene deutlich teurer als DC-Freileitungen, aber einfacher realisierbar als AC-Kabelsysteme. Die Problematik des grossen Blindleistungsbedarfs bei AC-Verkabelung entfällt bei DC völlig, was die technologische Realisierung dieser Lösung stark vereinfacht. Zudem lassen sich bei DC-Freileitungen die bei AC stark umstrittenen Grenzwerte für die elektromagnetischen Feldstärken problemlos einhalten.

Die moderne Leistungselektronik bzw. die Umrichtertechnik macht die DC-Verbindungen zu hochflexibel steuerbaren Systemen, die neben einer schnellen Lastflusssteuerung auch dem AC-Netz wertvolle Dienste für die Spannungsstabilität bieten können.

Nachteilig bei den DC-Systemen sind Aufwand, Raumbedarf, elektrische Verluste und Kosten der Umrichterstationen, dementsprechend auch die bei AC-Leitungen einfach mögliche Ausschlaufung für die Einbindung neuer Anschlüsse, seien es Kraftwerke, Netze oder Lasten. Die Vorbereitungen für den Bau von Hochleistungs-DC-Stromnetzen laufen in der Industrie auf Hochtouren, eine Zwischenstufe stel-

len sogenannte Mehrpunkt-Gleichstromverbindungen mit linienförmiger Ausdehnung dar. Neue Hochleistungs-DC-Verbindungen können in synchrone AC-Netze eingebettet werden (DC-Overlay). Ob diese Technologie in der Zukunft als Überlagertes, vermaschtes DC-Netz (Supergrid) zu AC-Netzen ausgestaltet werden kann, bleibt noch abzuwarten. Dazu werden derzeit zahlreiche Studien durchgeführt. Die höchsten Gleichspannungen und -leistungen finden sich heute mit ± 800 kV bzw. 6 GW und mehr in China für Übertragungsdistanzen von bis zu 2000 km. In Europa sind Gleichstrom-Seekabelverbindungen bis ± 500 kV in Betrieb.

Die drei geplanten innerdeutschen DC-Verbindungen sind als singuläre, weiträumige, ins nationale Übertragungsnetz ein-

gebettete Netzverstärkungen konzipiert. Ihre Anbindung an ein übergreifendes europäisches Netz ist noch offen.

Bau neuer DC-Leitungen

Der Bau von neuen Hochleistungs-DC-Stromverbindungen über grosse Distanzen (mehrere 100 km) erfordert die Bereitstellung geeigneter Leitungstrassen und den Erwerb der zugehörigen Durchleitungsrechte von den Grundeigentümern. Neue DC-Frei- und -Kabelleitungen stellen grosse Eingriffe in die Landschaft dar und bedingen voraussichtlich langwierige Verfahren. Diese könnten Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Die Schonung von Lebensraum und Landschaft und der sorgfältige Umgang mit Ressourcen wie Leitungskorridoren ist heutzutage ein Muss. Zunächst sollten bestehende Korridore, wenn immer möglich, zum Bau neuer Hochleistungs-Stromverbindungen genutzt werden, bevor die Schaffung neuer Trassen angegangen wird. Für einen zielstrebigsten Netzausbau sind zunächst bestehende Leitungstrassen zu evaluieren.

AC-DC-Hybridleitungen, eine neue Option

Je nach Anforderungen können für neue Hochleistungs-DC-Verbindungen bestehende Leitungskorridore bzw. bestehende Leitungsgestänge genutzt werden. Entweder entsteht dabei eine reine DC-Leitung oder eine AC-DC-Hybridleitung mit AC- und DC-Systemen auf einem gemeinsamen Gestänge. Ein relativ einfacher Fall liegt bei der Konversion eines 380-kV-Leitungsstrangs einer mehrsystemigen AC-Leitung in eine bipolare DC-

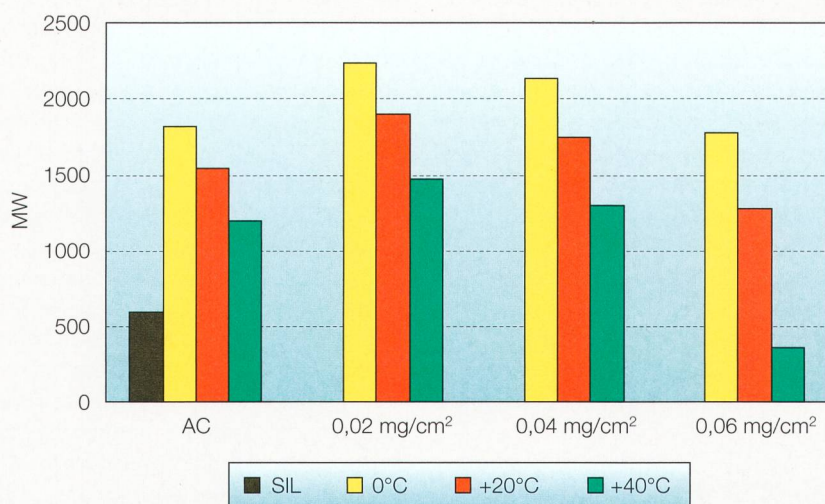


Bild 3 Thermische Belastbarkeit und natürliche Leistung (SIL = Surge Impedance Loading) einer 380-kV-AC-Leitung sowie thermische Belastbarkeit einer ± 400 -kV-DC-Leitung für verschiedene Isolator-Verschmutzungsgrade in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur.

Verbindung vor (Bild 2). Dabei wird das Erscheinungsbild der Leitung weitgehend beibehalten. Leitungsgestänge und -besetzung bleiben unverändert. Es werden lediglich die Isolatoren und so weit nötig die zugehörigen Armaturen ersetzt. Ampriion und Axpo haben im Jahr 2007 eine Zusammenarbeit gestartet, welche im Hinblick auf den Bedarf von leistungsfähigen mitteleuropäischen Nord-Süd-Verbindungen den Nachweis der Machbarkeit einer solchen AC-DC-Konversion zum Ziel hatte.[3] Die Ziele einer solchen Konversion sind:

- Maximierung der Übertragungsleistung.
- Bestmögliche Akzeptanz durch die Öffentlichkeit.
- Beschleunigung des Bewilligungsverfahrens.

In theoretischen und praktischen Untersuchungen konnte die grundsätzliche Machbarkeit nachgewiesen werden, welche auch für die Fachwelt publiziert wurde.[4, 5] In einer ersten Machbarkeitsstudie wurde für eine solche Konversion bei zweisystemigen 380-kV-Freileitungen in der Schweiz insbesondere die Einhaltung zulässiger Geräuschpegel und elektrischer Feldstärken im Bodenbereich untersucht. Zwei Masttypen und jeweils sechs mögliche DC-Leiteranordnungen wurden geprüft. Bei geeigneter Wahl der Leiteranordnung und der Isolatoren resultiert bei üblichen Isolator-Verschmutzungsgraden bis 0,02 mg/cm² (siehe IEC 60815-1) für ein ± 400 -kV-DC-System eine beträchtliche thermische Belastbarkeit (Bild 3). Weitere Untersuchungen betrafen vor allem mehrsystemige 380-kV-Freileitungen in Deutschland, darunter auch Anordnungen mit einem 380-kV-AC-System und einem DC-System auf derselben Mastseite. Unter anderem wurden neben theoretischen Studien auch Feldversuche durchgeführt, insbesondere zur Bestimmung des mechanischen und dielektrischen Designs. Messungen der elektrischen Feldstärken, der Radiostörspannungen durch Koronaentladungen, der Geräuschpegel und der Ionenströme durch ohmsche Kopplung zeigen, dass bei ± 400 kV mit

Résumé

Des lignes hybrides AC-DC pour raccorder la Suisse à l'Europe

Un rapport sur la coopération germano-suisse

La volatilité croissante de la production d'électricité requiert un rapprochement des États d'Europe centrale en vue du développement de leurs réseaux électriques. Les liaisons haute tension à courant continu (HVDC) sont privilégiées en tant que solution alternative au développement du réseau AC. Les lignes hybrides AC-DC constituent, en fonction des exigences, une nouvelle possibilité de réalisation de telles liaisons. Elles sont en mesure d'augmenter les performances des réseaux existants sans produire davantage d'effets négatifs sur le paysage. Elles sont de plus censées permettre des procédures d'autorisation relativement brèves. Leur faisabilité a été examinée et prouvée. Au regard des tendances qui se dessinent dans l'environnement economico-énergétique européen, une nouvelle liaison HVDC, éventuellement partiellement ou totalement sous la forme d'une ligne hybride AC-DC, représente une option intéressante pour le raccordement du réseau suisse à l'échelle internationale.

No

DC-Isolatorschlagweiten von 3 m und Bodenabständen von 15 m keine negativen Emissionen zu erwarten sind. Auch bezüglich kapazitive und induktive Kopplung im Normalbetrieb und in Störfällen wurden weitreichende Untersuchungen durchgeführt. Allgemein ist davon auszugehen, dass bei der AC-DC-Konversion eines 380-kV-AC-Systems auf einer mehrsystemigen 380-kV-AC-Leitungstrasse für das entstehende DC-System Spannungen bis ± 450 kV, Übertragungsleistungen bis 2,5 GW und Leitungslängen von mehreren Hundert Kilometern möglich sind.

Welche Detailprobleme noch zu beherrschen sind, wird ein Pilotbetrieb zeigen. Zwischen den Räumen Düsseldorf und Stuttgart soll bis ca. 2020 von Ampriion zusammen mit TransnetBW eine der drei innerdeutschen DC-Nord-Süd-Verbindungen als AC-DC-Hybridleitung unter dem Projektnamen Ultramet realisiert werden. Diverse Detailuntersuchungen sind dazu derzeit in Arbeit. Dieses Pilotvorhaben dient auch dazu, Erfahrungen mit dieser neuen Technologie im Betrieb zu sammeln, bevor eine grossräumige Nutzung von Hybridleitungen umgesetzt werden kann.

Deutsch-schweizerische Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit zwischen den Netzbetreibern Axpo und Ampriion geht viele Jahre zurück. Ziel der gemeinsamen

Arbeitsgruppe war die Schaffung zusätzlicher Transportkapazitäten zwischen Deutschland und der Schweiz durch Bau einer geeigneten DC-Hochleistungsverbindung. Rückblickend war dies eine gute Entscheidung, da entsprechende Analysen frühzeitig gestartet wurden und dadurch weitere Handlungsoptionen beim DC-Leitungsbau vorangetrieben wurden. Swissgrid als neue Eigentümerin des gesamtschweizerischen Übertragungsnetzes wurde Anfang 2013 über die Zusammenarbeit orientiert. Sie wird die Ergebnisse in ihren Überlegungen für den schweizerischen Netzausbau, auch im Dialog mit Ampriion, berücksichtigen.

Referenzen

- [1] Bundesnetzagentur: Netzentwicklungsplan Strom 2013 – Bestätigung.
- [2] Schweizerische Eidgenossenschaft – Der Bundesrat: Strategie Stromnetze; Detailkonzept im Rahmen der Energiestrategie 2050, 14. Juni 2013.
- [3] B. Sander, P. Barth, «Hybridleitungen beschleunigen den Bau von Stromautobahnen», Bulletin SEV/VSE 5/2013 S.28.
- [4] B. Sander, J. Lundquist, I. Gutmann, C. Neumann, B. Rusek, K.-H. Weck, «Conversion of AC multi-circuit lines to AC-DC hybrid lines with respect to the environmental impact», Cigré 2014 Paris Session, Paper B2-105.
- [5] Overhead Lines – A Cigré Green Book. Cigré August 2014.

Autoren

Bernhard Sander ist Berater der Axpo Power AG.
 bernhard.sander@gmx.ch

Daniel Moor ist Leiter Netzstudien und Netztechnik bei Axpo Power AG.
 Axpo Power AG, 5401 Baden, daniel.moor@axpo.com

Electrosuisse / ETG-Kommentar

AC-DC-Hybridleitungen

Energietransport in Hochspannungs-Gleichstrom-Technologie gewinnt immer mehr an Bedeutung. Die Vorteile dieser Technologie liegen im Zusammenwirken mehrerer Faktoren, die die Stabilität des Verbundnetzbetriebs stützen. Durch die Regelung der Umrichter können Netzpendelungen aktiv gedämpft bzw. der Leistungsfluss gezielt beeinflusst werden. Ebenso können die Umrichter auch zur Spannungsregelung eingesetzt werden. In einem ersten Ausbauschritt sind im dicht besiedelten Europa, wegen geringer Aussicht auf Genehmigung von neuen Leitungstrassen, hybride, also gemischte Dreh- (AC) und Gleichstromnetze (DC) unumgänglich, d.h. es wird Trassen mit kombinierter AC- und DC-Belegung geben. Dabei muss deren Wechselwirkung sorgfältig untersucht werden.

Dr.-Ing. **Walter Sattinger** ist Fachexperte innerhalb des Grid-Management-Teams bei Swissgrid AG