

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

Band: 82 (1991)

Heft: 2

Artikel: Wirtschaftliche Fernübertragung elektrischer Energie

Autor: Glavitsch, H. / Blahous, L.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-902920>

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: 15.10.2024

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

Wirtschaftliche Fernübertragung elektrischer Energie

H. Glavitsch und L. Blahous

Der Transport umweltfreundlich erzeugter Energie von Afrika nach Europa spielt bei verschiedenen Zukunftsprojekten eine wichtige Rolle. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Möglichkeiten und Grenzen des direkten Transports elektrischer Energie mittels Hochspannungs-Drehstrom- und Gleichstromübertragung. Die Übertragung grosser Mengen elektrischer Energie über weite Strecken ist mit den heute verfügbaren Technologien grundsätzlich möglich, jedoch vor allem eine Frage der Kosten.

Le transport d'énergie produite de manière respectant l'environnement de l'Afrique vers l'Europe joue un rôle important dans divers projets d'avenir. L'article donne un aperçu des possibilités et limites du transport direct d'énergie électrique par un réseau triphasé à haute tension et à courant continu. Bien qu'étant avant tout une question de coûts, le transport de grandes quantités d'énergie sur de longues distances est fondamentalement possible, grâce aux technologies à disposition.

Adresse der Autoren

Prof. Dr. Hans Glavitsch, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zürich, 8092 Zürich
Dr. L. Blahous, ABB Power Systems AG, 5401 Baden

Einleitung

Elektrische Energie hat den grossen Vorteil, dass ihr Einsatz genauer als bei jeder anderen Energieform dem Bedarf angepasst, sehr schnell und exakt dosiert und zudem mit grosser Effizienz in jede andere Energieform wie Wärme, Licht oder mechanische Arbeit umgesetzt werden kann. Zudem erwachsen ihrem Anwender keine unmittelbaren Lagerhaltungs- und keine direkten Entsorgungskosten. Darum wird elektrische Energie so vielfältig angewendet und darum hat die sichere Stromversorgung einen so hohen Stellenwert.

Da elektrische Energie als solche nicht speicherbar ist, muss sie in dem Masse, wie sie verbraucht wird, auch zur Verfügung gestellt werden. Die Umformung aus Primärenergieträgern erfolgt in Kraftwerken, die sich im allgemeinen nicht beim Verbraucher, sondern dort befinden, wo der entsprechende Primärenergieträger in entsprechend konzentrierter Form zur Verfügung steht, so dass seine Umwandlung in elektrische Energie sinnvoll ist. Am augenfälligsten ist diese Tatsache bei der Wasserkraft. Um die elektrische Energie vom Kraftwerk zu den Verbrauchern zu bringen, bedarf es entsprechend leistungsfähiger Übertragungssysteme.

Bis heute wird elektrische Energie für den kommerziellen Einsatz ausschliesslich leitergebunden übertragen. Die Leistung, das heisst die Energie pro Zeiteinheit, ist das Produkt aus Strom und Spannung. Um über einen Leiter möglichst viel Energie zu übertragen, muss entweder der durch den Leiter fliessende Strom möglichst hoch gewählt werden oder die den Strom treibende Spannung.

Ein wichtiges Ziel der Energieübertragung ist es, die dabei auftretenden

Verluste möglichst gering zu halten. Da die Verluste einer Übertragungslinien mit dem Quadrat des Stromes, der durch diese Leitung fliesst, und linear mit dem Widerstand der Übertragungslinien ansteigt wird immer angestrebt, die treibende Spannung möglichst gross und den durch den Leiter fliessenden Strom möglichst klein zu halten.

Das transformatorische Prinzip der Wechselstromtechnik und der glückliche Umstand, dass die hohe magnetische Leitfähigkeit des Eisens eine fast ideale Kopplung zweier Spulen auch mit extrem unterschiedlicher Windungszahl ermöglicht, erlaubt es, theoretisch beliebig hohe Wechselspannungen zu erzeugen und damit auch theoretisch beliebig viel Energie mit beliebig kleinem Strom, d.h. mit beliebig kleinen Verlusten zu übertragen.

Hinzu kommt noch ein wichtiger praktischer Aspekt: Werden drei gleich grosse Wechselströme addiert, von denen einer 120 Grad und der zweite um 240 Grad dem Referenzstrom nacheilt, so ergibt sich als Summe immer Null. Ein Gesamtsystem, das über drei Leitersysteme drei solche Ströme zu den Endverbrauchern bringt, braucht keine Rückleitungen mehr, weil sich die Ströme ja zu Null addieren. Es kann also in einem solchen System die dreifache Leistung eines Einphasensystems übertragen werden, obwohl nur ein Leiter mehr benötigt wird. Da ein solches Dreiphasensystem bei entsprechender Anordnung in elektrischen Maschinen ein Drehfeld erzeugt, heisst es Drehstromsystem, im Gegensatz zum allgemeinen Wechselstromsystem.

Die oben geschilderten physikalischen Phänomene erklären den Siegeszug der Drehstromtechnik, obwohl die ersten grossen Durchbrüche in der

Anwendung elektrischer Energie mit Gleichstrom gelangen.

Praktische Realisierung und Grenzen der Drehstromübertragung

Eine wichtige Grenze in der Anwendung der Hochspannungs-Drehstromübertragung ist die Spannungsfestigkeit der die Leiter umgebenden Isolation. Die durch die Spannung des Leiters erzeugte Feldstärke darf dabei an keiner Stelle einen Wert überschreiten, der zu einem Durchschlag führt. Da die Feldstärke mit der Leiterspannung steigt, wird bei höherer Spannung mehr Isolationsmedium gebraucht.

Isolation

Ein sehr billiges und in sehr grossem Masse verfügbares Isolationsmedium ist die Luft. Sie wird auch bei den höchsten Übertragungsspannungen fast ausschliesslich eingesetzt. Da bei Freiluft das Mehr an Isolationsmedium nicht über eine Erhöhung des Drucks erreicht werden kann, wird die Distanz der Leiter untereinander und zur Erde vergrössert. Dies führt irgendwann zur mechanischen Grenze der Leitungsmasten und vor allem der Leitungsisolatoren, die dafür sorgen müssen, dass die nötigen Abstände eingehalten werden.

Eine zweite, viel gravierendere Grenze der Spannungshöhe sind die Geräte, die für das sichere Funktionieren der Übertragung benötigt werden. Dies sind vor allem die Transformatoren sowie die Schaltgeräte und die Messwandler. Bei ihnen werden andere Isolierstoffe eingesetzt, weil für ihre Funktion die grossen Distanzen der Luftisolation bei Atmosphärendruck nicht geeignet sind. Typische Isolationsmedien für die Apparate der elektrischen Energieübertragung sind Öl und Papier für die Transformatoren sowie SF₆, Druckluft oder Öl für die Leistungsschalter.

Um die Apparate der Energieübertragung kompatibel zu machen, sind die Übertragungsspannungen international genormt. In Westeuropa wird heute als höchste Übertragungsspannung 420 kV eingesetzt. Neben dieser Spannungsebene werden noch in grossem Masse 550 kV und in einigen Ländern mit grossen Distanzen zwischen den Kraftwerken und den Endverbrauchern 765 kV (z.B. in Kanada,

USA, Venezuela, Brasilien, Südafrika und UdSSR) verwendet. Für alle diese Spannungsebenen gibt es heute mehrere Hersteller, die die Geräte anbieten, und die Übertragungssysteme sind so lange in Betrieb, dass keine grundsätzlichen Probleme bei ihrer Anwendung bzw. Einführung mehr entstehen.

Pläne, auf noch höhere Übertragungsspannungen überzugehen, werden zumindest im Westen vorläufig gar nicht oder nur mit sehr geringer Intensität verfolgt. Lediglich in der Sowjetunion, in Kasachstan, besteht eine Leitung, von der Teile mit 1150 kV betrieben werden, und die Sowjetunion behauptet von sich, dass sie in der Lage sei, die gesamte Palette der benötigten Apparate inklusive der Transformatoren zu fertigen.

Neben der Grenze der Übertragungsleistung durch die maximal mögliche Spannung stösst die Übertragung elektrischer Energie durch Drehstrom aber sehr viel früher an die Grenze ihrer Übertragungsfähigkeit durch ein Phänomen, das mit «Blindleistung» umschrieben wird.

Blindleistung

Ein stromdurchflossener elektrischer Leiter baut ein Magnetfeld um sich auf. Ist dieser Strom ein Wechselstrom, so muss dieses Magnetfeld während jeder Halbperiode auf- und wieder abgebaut werden. Wird nun – als Gedankenexperiment – angenommen, der Leiter habe gar keinen Widerstand, so bremst der Aufbau des Magnetfelds den Stromanstieg durch den Leiter, wenn die am Leiter angelegte Spannung ansteigt, während das Magnetfeld bei absinkender Spannung versucht, den Strom aufrechtzuerhalten, so dass der Strom nicht mit der abnehmenden Spannung zusammenbricht, sondern erst durch eine dem Magnetfeld entgegengesetzte Spannung zu Null gezwungen wird. Durch das ständig wechselnde Magnetfeld eines vom Wechselstrom durchflossenen Leiters bedarf es zum Stromfluss immer einer treibenden Spannung, so als hätte der Leiter einen Widerstand, auch wenn sein Gleichstromwiderstand ideal Null wäre. Die während des Magnetfeldaufbaus in das Feld eingebrachte Energie wird während des Abbaus wieder zurückerlangt, geht also netto nicht verloren. Da aber auch bei einem ideal widerstandslosen Leiter eine Spannung entstehen muss, damit ein

Wechselstrom fließen kann, ist auch ein Produkt aus Strom und Spannung bildbar, das, weil es nicht nutzbar ist, als «Blindleistung» bezeichnet wird.

Es gehört zu den Besonderheiten der Drehstromübertragung, dass ohne Blindleistung keine nutzbare Leistung, also «Wirkleistung», übertragen werden kann, dass sie aber an sich unerwünscht ist. Bei kurzen Übertragungsdistanzen ist der Blindleistungsbedarf der Übertragungsleitungen von untergeordneter Bedeutung, doch bei langen Leitungen wird er zu einem wichtigen Faktor, der letztlich die übertragbare Leistung auf viel tieferem Niveau begrenzt als von der Spannung her gegeben wäre. Oder anders gesagt ist es wegen des Blindleistungsbedarfs der Drehstromübertragung auch bei beliebig hoher Spannung nicht möglich, beliebig viel elektrische Energie über beliebig weite Strecken zu transportieren.

Die Grenze der übertragbaren Leistung einer Drehstromleitung kann durch Kompensation der Blindleistung erhöht werden. Diese Kompensation erfordert, die Leitung zu unterbrechen. Damit kommt zum reinen Leitungspreis der Preis der zusätzlichen Schaltanlagen, die nur wegen der Blindleistungskompensation gebaut werden müssen, sowie der Blindleistungs-Kompensationskreise selbst hinzu. Das heisst, mit zunehmender Leitungslänge steigen die Kosten für die Freileitung schneller als durch das zusätzliche Leitungsmaterial selbst.

Redundanz

Wie bereits beschrieben, ist die Einsparung der Rückleiter in Drehstromsystemen durch die drei um einen genau definierten Phasenwinkel gegeneinander verschobenen Einzelsysteme möglich. Dies bedingt aber auch, dass immer alle drei Systeme mit gleicher Amplitude und der richtigen Phasenlage zueinander vorhanden sein müssen, um den Betrieb über eine längere Zeit zu ermöglichen. In Höchstspannungsnetzen sind nun Einphasenfehler infolge Erdüberschlägen eine häufige Störungsursache. Da diese Erdüberschläge zum grössten Teil flüchtiger Natur sind, gelingt es meist, durch kurzzeitiges Abschalten der fehlerhaften Phase und anschliessendes Wiedereinschalten die Störung zu beheben und die Übertragung wiederherzustellen, ohne dass der Verbraucher viel davon merkt. Handelt es sich jedoch um einen permanenten Fehler,

so muss die gesamte Leitung ausser Betrieb genommen werden, obwohl lediglich ein Leiter beschädigt ist und die anderen beiden Leiter in der Lage wären, die übertragene Leistung entweder ganz oder teilweise zu übernehmen. Auch dieser Aspekt ist eine gewisse Schwäche der Drehstromleitung, die wirtschaftliche Konsequenzen hat. Selbst wenn nur Teilredundanz der Übertragung gewünscht wird, muss eine volle Dreiphasenleitung parallel gebaut werden, weil auch beim Ausfall nur eines Leiters die ganze Leitung ausfällt.

Bisher wurden nur Freileitungen betrachtet. In Stadtgebieten und durch Gewässer werden auch Kabel zur Energieübertragung eingesetzt. Wegen der grossen Kapazität pro Leitungslänge eines Kabels ist sein Blindleistungsbedarf sehr viel grösser als der einer Freileitung. Darum wird die maximale Übertragungsdistanz eines unkompenzierten Kabels bei hoher Spannung schon nach einigen Kilometern erreicht. Ein typischer Wert ist

fernübertragungen. Sie zeigt, dass dank der Fortschritte vor allem der Halbleitertechnologie die HGÜ bereits in breitem Masse eingesetzt wird, wo es um die Überwindung grosser Distanzen geht.

Möglichkeiten und Grenzen der HGÜ

Für Gleichstrom ist das transformatorische Prinzip, das zum Durchbruch des Drehstroms für die Energieübertragung führte, nicht anwendbar. Daher ist es sehr viel aufwendiger, die hohe Gleichspannung zu erzeugen. Möglich wurde dies eigentlich erst als es gelang, Elemente zu bauen, die Drehstrom in Gleichstrom mit variabler treibender Gleichspannung umwandeln. Ursprünglich waren das Quecksilberdampfventile, die den leitenden Zustand erst nach einem Zündimpuls annehmen. Heute sind es Thyristoren, die ebenfalls nur dann leiten, wenn sie eine positive Span-

Netzspannung so weit verzögert, dass die resultierende Gleichspannung versucht, dem Stromfluss des Gleichrichters entgegenzuwirken. Aus diesem Grund wirkt der Wechselrichter als Energiesenke im Gleichstromkreis und das Drehstromnetz, mit dem der Wechselrichter verbunden ist, kann Energie aus der Übertragung beziehen.

Sowohl den Quecksilberdampfventilen als auch den heutigen Thyristorventilen ist gemeinsam, dass sie nach dem Zündimpuls fast sprungartig und mit nur sehr kleiner zeitlicher Streuung in den leitenden Zustand übergehen und, wenn sie erst einmal leiten, den Strom erst wieder unterbrechen können, wenn er zu Null gegangen ist. Es können also sehr viele Thyristoren bzw. mehrere Quecksilberdampfventile in Serie geschaltet werden. So ist auch bei relativ kleiner Gleichspannung pro Element eine sehr hohe Ausgangsspannung am Stromrichter technisch machbar. Das Zündsignal wird dabei über Lichtleiter an die einzelnen Thyristoren gebracht.

Die HGÜ wird für Fernübertragungen durchwegs mit zwei Polen gebaut, einem positiven und einem negativen Pol, wobei der Nullpunkt zwischen dem positiven und dem negativen Pol an beiden Enden der Übertragung geerdet wird. Damit in der Station selbst keine Gleichströme über die Trafos fließen, wird die Nullpunkterdung immer einige Kilometer ausserhalb der Umformerstationen vorgenommen.

Eine HGÜ besteht im wesentlichen aus vier wichtigen Elementen:

- den eigentlichen *Stromrichtern*, die den Drehstrom umwandeln und den Gleichstrom am Wechselrichter wieder in Drehstrom zurück umformen;
- der *Übertragungsleitung*, die die beiden Stromrichter verbindet;
- der *Gleichstromschaltanlage*, in der sich die Glättungsdrossel, die für einen möglichst idealen Gleichstrom sorgt, die Gleichstromfilter, die Telefonstörungen verhindern sollen, sowie jene Schaltelemente befinden, die beim Ausfall eines Pols für den unterbrechungsfreien Übergang zum stationären Betrieb mit nur einem Pol sorgen;
- der *Drehstromschaltanlage* mit den Drehstromfiltern, die die vom Stromrichter verursachten Störungen, das heisst Schwingungen höherer Frequenz als der Netzfrequenz,

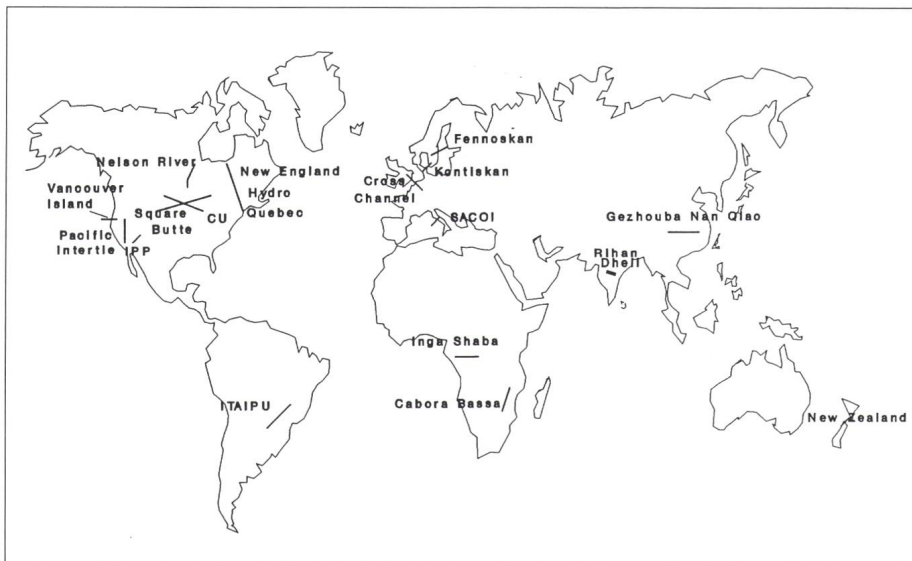


Bild 1 HGÜ-Anlagen in der Welt (es sind nur die Fernübertragungen dargestellt)

etwa 30 km. Da dies z.B. bei der Versorgung von Inseln vom Festland aus sehr oft nicht ausreicht, wurde aus dieser Problemstellung – Versorgung einer Insel vom Festland – heraus eine Alternative zur Drehstromübertragung entwickelt: die Hochspannungs-Gleichstromübertragung HGÜ. Die Weltkarte (Bild 1) zeigt die wichtigsten Hochspannungs-Gleichstrom-

leitungen in ihrer Leitrichtung sehen und wenn zudem ein Zündimpuls angelegt wurde.

Wird nun der Zündimpuls in bezug zur Spannung verzögert, so sinkt die totale Gleichspannung, die die Stromrichter erzeugen, und mit ihr der Strom, der von dieser Gleichspannung getrieben wird. Am Wechselrichter ist der Zündzeitpunkt in bezug auf die

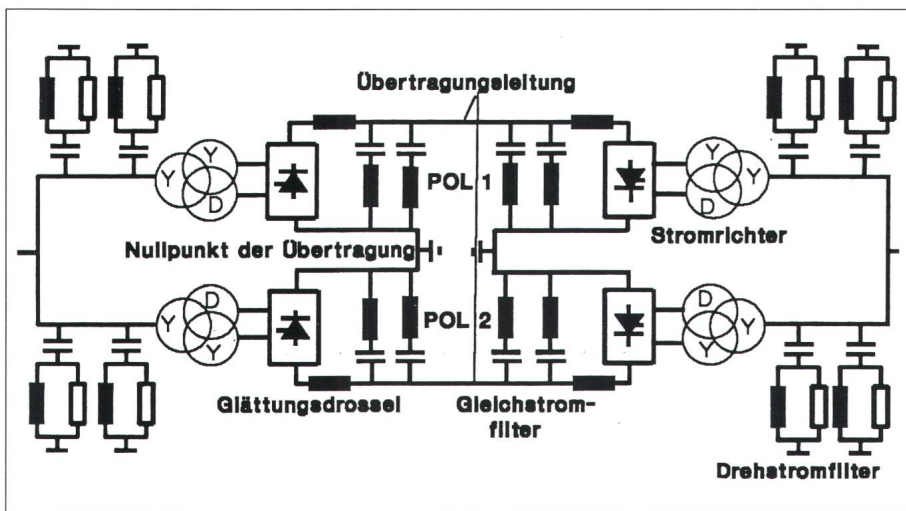


Bild 2 Einphasenersatzschaltbild einer HGÜ

Der Gleichrichter sorgt normalerweise für einen der zu übertragenden Leistung entsprechenden, konstanten Gleichstrom. Die gute Regelbarkeit der HGÜ erklärt sich aus der Notwendigkeit, die Thyristoren zu zünden. In einer Netzperiode – also bei 50 Hz während 20 ms – werden zwölfmal die Thyristoren gezündet. Vor jedem Zünden kann der Zündzeitpunkt geändert werden, was die grosse Schnelligkeit, mit der die übertragene Energie geändert werden kann, ermöglicht.

Um die Halbleiter vom Strom her voll ausnützen zu können, werden sie mit Reinwasser (Wasser extrem kleiner elektrischer Leitfähigkeit) direkt gekühlt.

Die Pole einer HGÜ werden jeder für sich geregelt, wobei eine übergeordnete Reglerebene dafür sorgt, dass jeder Pol den gleichen Stromsollwert hat, um im Normalbetrieb einen Strom über die Erdelektrode zu verhindern. Die polweise Stromregelung erlaubt es, Energie auch nur über eine Leitung zu transportieren, wobei dann der Leiter des nicht betriebenen Pols als Rückleiter dient, wieder um Erdströme zu vermeiden. Abgesehen von der Reduktion der maximal übertragbaren Leistung hat das auf die durch die HGÜ verbundenen Drehstromsysteme keine Auswirkungen. Es ist also ohne Zusatzinvestitionen eine Teildundanz möglich.

Die Hochspannungs-Gleichstromübertragung kann zwar die Grenzen der Drehstromübertragung überwinden, hat aber ihrerseits Grenzen. In

vom Drehstromnetz fernhalten sollen und lokal den Blindleistungsbedarf des Stromrichters decken sollen. Die Drehstromschaltanlage bindet die HGÜ ins Drehstromnetz ein und besteht pro Übertragung zweimal, eine an der Gleichrichter- und eine an der Wechselrichterseite.

Bild 2 zeigt ein typisches Einphasen-Ersatzschaltbild einer HGÜ. Daraus wird verständlich, dass bei einer HGÜ die Kosten der beiden Umformerstationen sehr viel höher liegen als bei einer normalen Drehstromschaltanlage. Dafür ist die Leitung mit ihren nur zwei Leitern billiger als eine Drehstromleitung mit ihren drei Leitern und den dadurch bedingten höheren Mastkosten. Als Konsequenz wird die HGÜ kaum für kurze Übertragungsdistanzen eingesetzt werden, wenn nicht andere technische Gründe die reine Preisbetrachtung modifizieren.

So können durch den Gleichstrom-Zwischenkreis asynchrone Drehstromnetze oder Netze unterschiedlicher Frequenz miteinander verbunden werden. Da die HGÜ eine genaue Regelung der durch sie übertragenen Energie erlaubt, wird sie teilweise in Verbundsystemen eingesetzt, um das Netz als Ganzes zu stabilisieren oder den Lastfluss gezielt in einem Masse zu beeinflussen, wie es auch Schrägregeltransformatoren nicht können (z.B. Pacific Intertie, New England – Hydro Québec).

Dies sind Aspekte, die hier nicht weiter behandelt werden sollen, die

aber aufzeigen, dass die Entscheidung für oder gegen eine HGÜ nicht allein durch einen Vergleich der zu tätigen direkten Investitionskosten pro übertragenem MW getroffen wird.

Bild 3 zeigt einen reinen Kostenvergleich zwischen einer Drehstrom- und einer Gleichstromübertragung, wobei vorausgesetzt wird, dass es keine Probleme gibt, am Ende der Übertragung die beiden Netze zu verbinden. Sie zeigt das klassische Bild nach dem für einen Grossteil der heute betriebenen HGÜ-Fernübertragungen entschieden wurde. HGÜ wird dann wirtschaftlich, wenn grosse Mengen elektrischer Energie über grosse Distanzen leitergebunden übertragen werden sollen.

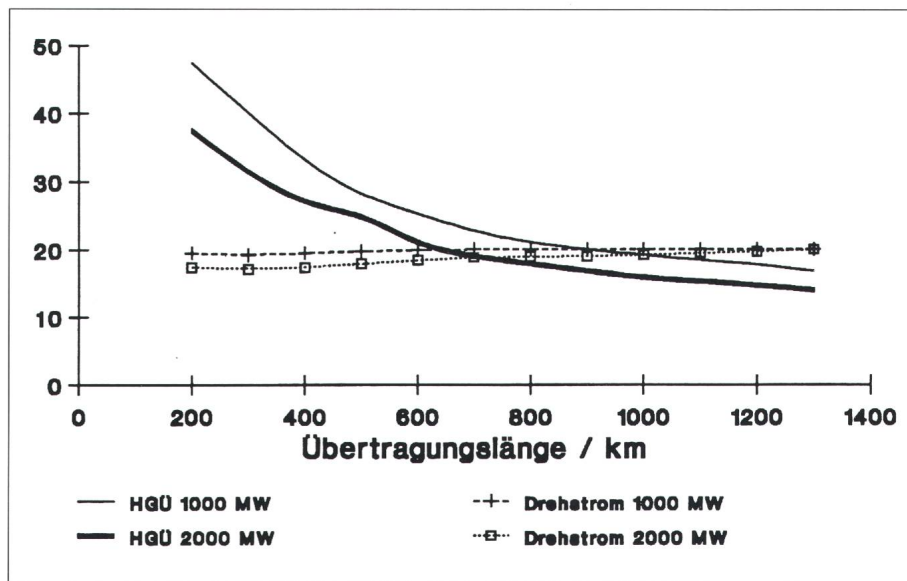


Bild 3 Kostenvergleich einer Drehstrom- mit einer Gleichstromübertragung (spezifische Übertragungskosten in US\$ pro MW, km und Jahr)

der heute angewandten Technik muss im Drehstromnetz eine zusätzliche Quelle, die die Kommutierungsspannung liefert, vorhanden sein. Es ist derzeit nicht möglich sich vorzustellen, alle in Europa benötigte elektrische Energie könnte in der Sahara erzeugt und dann per HGÜ nach Europa gebracht werden, wo es keine Kraftwerke mehr gibt.

Eine zweite Grenze der HGÜ ist die gegenüber dem Drehstrom etwas andere Beanspruchung der Isolatoren. Durch die ständig mit nur einer Polarität anstehende Spannung sind Kriechströme auf den Isolatoroberflächen bei Freiluftanlagen sehr viel kritischer für die Sicherheit der Anlagen in bezug auf Erdüberschläge als bei Drehstromsystemen. Die maximale Gleichspannung, die heute kommerziell betrieben wird, ist ± 600 kV in der Übertragung Itaipu. Itaipu befindet sich jedoch in einem Gebiet, in dem die Luftverschmutzung relativ wenig kritisch ist. Für die Übertragung von Energie aus der Sahara nach Europa sind sich ändernde Kriechwege durch Isolatorverschmutzung sehr viel kritischer für die Dimensionierung der Gleichstromisolatoren. Heute sind in Gegenden mit hoher Luftverschmutzung Gleichspannungen bis ± 500 kV im Einsatz (IPP und Pacific Intertie im Raum von Los Angeles). Die Spannungsgrenzen ergeben sich aus der Schwierigkeit, Porzellane von solcher Grösse mit der nötigen Festigkeit herzustellen, dass sie in stark verschmutzten Gegenden noch die nötigen Kriechwege bringen, die einen einigermassen sicheren Betrieb der Anlagen gewährleisten. Eine Lösung dieser Probleme bietet sich aus der Technik der Drehstromschaltanlagen an. Wird die gesamte Gleichstromschaltanlage gekapselt und mit SF₆ isoliert, so entfällt die Verschmutzungsproblematik für die Komponenten der Anlage. Solche Anlagen befinden sich jedoch für die HGÜ erst im Versuchsstadium.

Für den Transport grosser Mengen elektrischer Energie aus der Sahara nach Europa müssten Kabel durch das Mittelmeer gezogen werden. Bei der heute verfügbaren Technik ist für Gleichstromkabel die maximal mögliche Spannung auf ± 400 kV beschränkt (Fennoskan). Das Verlegen eines Kabels verlangt auch eine sorgfältige Routenwahl. Dort, wo das Mittelmeer grössere Tiefen erreicht, sollte das Kabel nicht gelegt werden, weil die Kabelhersteller zwar an Kabeln

arbeiten, die in Tiefen bis 2000 m verlegt werden können, bis heute aber noch kein solches Kabel verfügbar haben (auch nicht für niedrigere Übertragungsspannungen). Das Mittelmeer bietet jedoch Stellen, bei denen die Distanz zwischen Europa und Afrika nicht sehr gross ist und wo das Meer auch nicht sehr tief ist, so dass im Schadenfall ein Kabel auch repariert werden könnte. Es muss aber klar darauf hingewiesen werden, dass ein Gleichstromkabel sehr teuer kommt. Als Richtwert gilt 1 Mio Dollar pro Kilometer. Bei den bei der Durchquerung des Mittelmeers zu überwindenden Distanzen haben die Umrichterstationen selbst dann schon fast keinen Einfluss mehr auf den Preis.

Ausblick

Es wurde versucht, die Grenzen und Möglichkeiten der Übertragung elektrischer Energie in grosser Menge über grosse Distanzen kurz zu umreissen. Drehstrom- und Gleichstromübertragung schliessen einander nicht unbedingt aus, sondern können durchaus nebeneinander bestehen und einander ergänzen.

Für den Mittelmeerraum wäre zum Beispiel ein Verbund denkbar, der einen grossen offenen Drehstromring um das Mittelmeer zieht, der wie bei vergleichbaren Beispielen auf einer Spannungsebene von 500 kV oder 800 kV wäre. Die Mitgliedländer dieses Verbundes würden ihre «lokalen» Netze mit der ihnen genehmen Spannungsebene betreiben. Die HGÜ würde die Zwischenverbindungen durch das Mittelmeer bewerkstelligen, die einerseits den Lastfluss in diesem Verbund optimal zu gestalten helfen, andererseits zur höheren Stabilität des Verbunds beitragen. Die heute zur Verfügung stehende Technik der HGÜ ist soweit ausgereift, dass sie als eingeführt angesehen werden kann und dass heutige Anwender einer Zweipunktübertragung keine unwägbareren Risiken eingehen.

Ein Beispiel, wie ein solcher Verbund technisch machbar wäre, ist der Westen der USA, in dem ein loser Verbund das Gebiet von der gesamten Pazifikküste nach Osten bis nach Denver umfasst und mit leistungsschwachen HGÜ-Verbindungen sogar Texas noch mit einbezieht.

Die Entwicklung auf dem Gebiet der Leistungshalbleiter zielt darauf

ab, auch den Zeitpunkt der Stromabschaltung bei hohen Spannungen wählen zu können. Dies würde in Zukunft Möglichkeiten eröffnen, sehr grosse Leistungen mittels Gleichstrom in Drehstromnetze einzuspeisen, die über keinerlei eigene Erzeugung verfügen. Vom heutigen Entwicklungsstand ausgehend lässt sich sagen, dass bis zur Jahrtausendwende diese Technologie für den Einsatz für grosse Energien zur Verfügung steht. Diese Entwicklung könnte auf lange Zukunft die Stabilität des Verbunds auch dann gewährleisten, wenn die Erzeugung elektrischer Energie sich vom Norden ganz in die Sahara verlagert.

In dieser Zusammenfassung wurde das Thema Supraleitung bisher nicht berührt. Die Möglichkeit, eine fast widerstandslose Leitung zu bauen, legt die Frage nahe, ob nicht das bisherige Konzept, die Übertragungsverluste zu minimieren, indem die Spannung immer auf das maximal Mögliche erhöht wird, mit den daraus resultierenden Problemen, die hier kurz andiskutiert wurden, aufgegeben werden sollte zugunsten des maximal möglichen Stroms. Supraleitung ist jedoch sehr von einer intensiven Kühlung abhängig – auch dann, wenn es sich um Hochtemperatur-Supraleiter handelt –, so dass das Konzept eines supraleitenden Kabels durch das Mittelmeer die Anforderungen an die Betriebssicherheit und nach möglichst geringen Auswirkungen einer Störung bei einer sensiblen Komponente der Übertragung (z.B. dem Kühlsystem) beim heutigen Stand der Technik nicht erfüllen kann. Dies bleibt wahrscheinlich auch noch für längere Zeit so, weswegen die Supraleitung in die Überlegungen über Möglichkeiten der wirtschaftlichen Energieübertragung nicht einbezogen wurde.

Es kann aber zum Abschluss gesagt werden, dass die Übertragung grosser Mengen elektrischer Energie auch mit den heute sofort «ab Werk» verfügbaren Systemen technisch möglich ist. Bei der Überquerung des Mittelmeers liegt dabei der Preis der Übertragung bereits in der gleichen Grössenordnung, wie der Preis eines Kraftwerks, das die zu übertragende Leistung zur Verfügung stellt. Dies liegt weniger an den Aufwendungen für die benötigten Umrichterstationen, sondern hauptsächlich am Preis des Kabels, das im Meer verlegt werden muss. Technische Hindernisse gibt es jedoch schon zum heutigen Zeitpunkt keine.