

## Gleichstrom für die Fernübertragung

Früher wurde elektrische Energie über große Strecken mit Hochspannungswechselstrom bzw. Drehstrom (3 Phasen) übertragen. Der Grund hierfür war – historisch gesehen – die beliebige Transformierbarkeit des Wechselstroms auf die jeweils geforderte Spannung. Zum Transport wurde hoch transformiert und vor Ort konnte dann wieder für die regionale oder lokale Verteilung herunter transformiert werden. Dieser in den USA vor allem von Tesla und Westinghouse und in Deutschland und Europa von Oskar von Miller erkannte Vorteil von Wechselstrom machte die Elektrifizierung der Welt überhaupt erst möglich. Die Situation beginnt sich jetzt jedoch zu ändern, denn bei genauerem Hinsehen hat der Energietransport mittels Wechselstrom auch einige Nachteile. Heute wird zum Transport großer Leistungen über weite Entfernungen zunehmend die verlustärmere Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) eingesetzt. HGÜ wird darüber hinaus auch zur sog. Kurzkupplung, d. h. zur Verbindung asynchroner Netze, angewendet. Werden nämlich mehrere Wechselstrom-Stromquellen zusammengeschlossen, müssen Frequenz und Phasenlage völlig synchron sein.

### Die Fernübertragung von Wechselstrom bringt größere Verluste!

Durch den ohmschen Widerstand kommt es in jedem Stromnetz, egal ob AC (Alternating Current = Wechselstrom) oder DC (Direct Current = Gleichstrom) zu Verlusten. In Wechselstromnetzen kommt es zusätzlich zu diesen ohmschen Verlusten noch zu weiteren Verlusten. Die Gründe für die im Vergleich zu Gleichstrom relativ großen Verluste bei AC liegen in drei verschiedenen Phänomenen, die für Wechselstrom spezifisch sind: Der **kapazitive Widerstand**, der **induktive Widerstand** und der sog. **Skin-Effekt**.

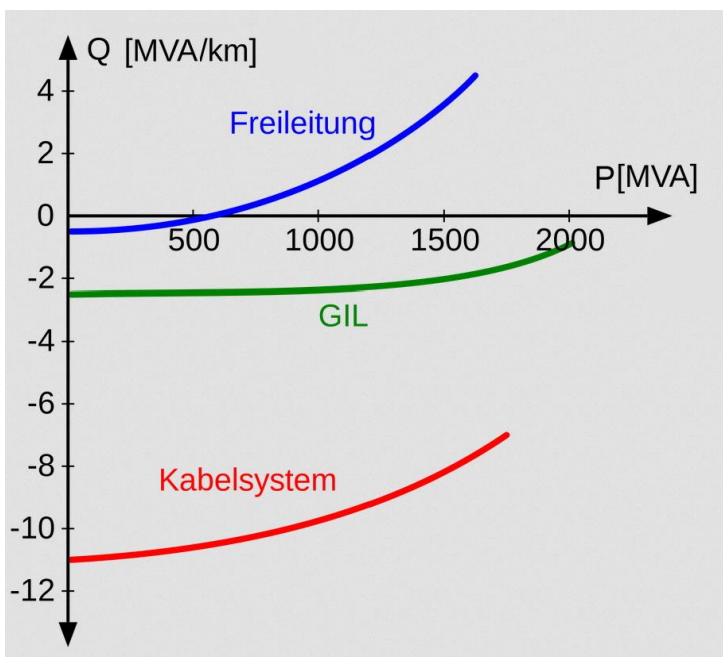


Abb. 1: Blindleistungsbedarf  $Q$  89n MVA/km einer 380 kV Wechselstromleitung in Abhängigkeit von der übertragenen Leistung.

**Der kapazitive Verlust** hat seine Ursache im ständigen Wechsel der Stromrichtung, beim örtlichen Stromnetz geschieht das 50 Mal pro Sekunde. Dies hat eine ähnliche Wirkung wie das Auf- und Entladen eines Kondensators (einer Kapazität), wofür zusätzliche Ladeströme (sog. Blindströme) benötigt werden. Dadurch wird ein Effekt erzeugt, als ob ein zusätzlicher, kapazitiver Widerstand auftreten würde. Das heißt, ein Teil der Leistung wird als „**Blindleistung**“ („blind“ = nicht nutzbar) im Netz hin und her geschoben.

Grafik von wdwd – Eigenes Werk, Diagram based on data set from: "380-kV-Salzburgleitung, Gutachten von B. R. Oswald, Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik Universität Hannover, 27.12.2007" (Lizenz: CC BY-SA 3.0) bearbeitet durch Siemens Stiftung

Diese „blinde“ Leistung ist nicht nur nicht nutzbar und verstopft sozusagen die Leitung, sie ist auch mit ohmschen Verlusten behaftet. Dieser kapazitive Effekt ist besonders relevant bei Erd- und Seekabeln. Wegen der stark von der Luft abweichenden dielektrischen Eigenschaften von Wasser und Erde besitzen diese Kabel einen größeren Kondensatoreffekt und verursachen so höhere Verluste.

**Der induktive Verlust** entsteht dadurch, dass ein gewisser Anteil des Stromnetzes (die Leitung selbst oder auch bestimmte Verbraucher) als Spule wirkt. Es fließen also zusätzliche Ströme, um in diesen Spulen jeweils Magnetfelder auf- bzw. abzubauen. Auch das führt zu nicht nutzbarem, aber mit ohmschen Verlusten behaftetem Blindstrom.

Die dritte Verlustquelle ist **der Skineneffekt**. Wechselstrom nutzt physikalisch bedingt nicht den vollen Leiterquerschnitt. AC erzeugt im Leiter Wirbelströme, die im Inneren des Leiters Magnetfelder erzeugen, die dort den Stromfluss bremsen. Die durch den Skineneffekt hervorgerufene Reduzierung des effektiven Leiterquerschnitts ist abhängig von der Frequenz des Stroms. Somit hat ein Leiter gleichen Querschnitts für Wechselstrom einen höheren Widerstand als für Gleichstrom.

In Hochspannungswechselstromnetzen rechnet man pro 1.000 km Übertragung mit ca. 6 % bis 10 % Verlust. In Hochspannungsgleichstromnetzen, in denen es nur zu ohmschen Verlusten kommt, rechnet man dagegen pro 1.000 km mit ca. 4 % Verlust.

### Wie funktioniert die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)?

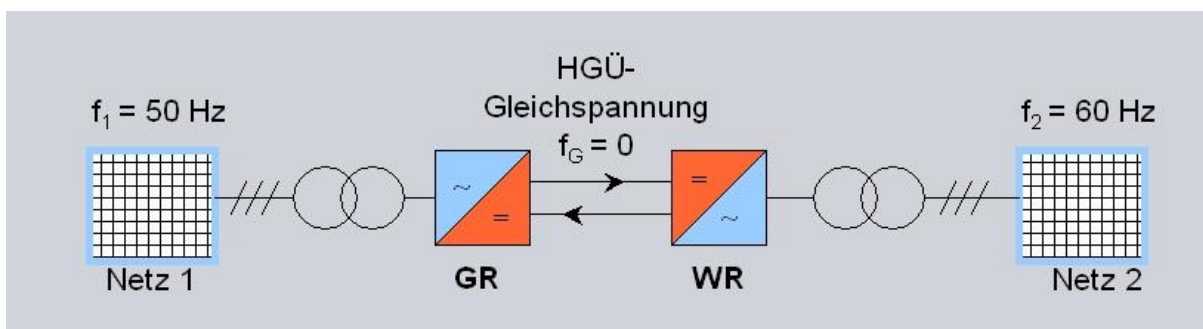


Abb. 2: HGÜ-Prinzipschaltbild. GR: Gleichrichter, WR: Wechselrichter.

Im Englischen wird HGÜ übrigens als HVDC (high Voltage Direct Current) abgekürzt. Zur HGÜ wird zunächst der Strom des Kraftwerks (maximal 60 kV) auf z. B. 800 kV hoch transformiert. Dann wird er mit einem Gleichrichter (z. B. einem Thyristor) in Gleichspannung umgewandelt. Mit diesem Gleichstrom von 800 kV erfolgt dann die relativ verlustarme Übertragung über 1.000 und mehr Kilometer. Am Zielort wird der Gleichstrom mit einem Wechselrichter (Thyristor) wieder in Wechselstrom gewandelt und ins AC-Netz eingespeist. Frequenz und Phasenlage werden dabei besonders exakt ans AC-Netz angepasst.

## **HGÜ auch zur synchronen Verbindung von Stromnetzen**

Diese HGÜ-Technik ist auch bei der Verbindung von verschiedenen Stromquellen bzw. Stromnetzen von Vorteil: Die frequenz- und phasensynchrone Einspeisung des aus Gleichstrom zurückgewonnenen Wechselstroms ist dank der exakten elektronischen Steuerung der Umwandlung problemlos möglich.

Dies zeigte sich beispielsweise beim großen Blackout (Netzausfall) 2003 in Nordamerika, bei dem das Netz von Quebec durch diese Schutzfunktion seiner HGÜ-Verbindungen intakt blieb, während das synchron an die USA angeschlossene Ontario vollends in die Störung mit hineingezogen wurde. Auch ein Blackout, wie er sich am 04.11.2006 in Europa von Ostfriesland bis Marokko ausbreitete, könnte in Zukunft durch den Aufbau europaweiter HGÜ-Backbones (Hauptverbindungsleitungen) sicher vermieden werden.

Inzwischen wird die HGÜ-Technik auch zur synchronen Einspeisung von Windstrom ins Netz eingesetzt. Aufgrund der stark schwankenden Windgeschwindigkeiten war der Regelungsaufwand für die Drehzahl der Windradgeneratoren extrem groß. (Die Frequenz eines vom Drehstromgenerator gelieferten Wechselstroms hängt von der Drehzahl ab. Sie müsste für exakt 50 Hz bei einem 2-Pol Generator konstant 3.000 U/min betragen). Heute werden die von Windrädern erzeugten Wechselströme relativ niederer Spannung und schwankender Frequenz zunächst hochtransformiert und gleichgerichtet und nach anschließender Wechselrichtung frequenz- und phasensynchron ins Netz eingespeist. Auch Offshore-Windparks werden heute über HGÜ an das Stromnetz des Festlands angeschlossen.

## **Wann lohnt sich eine HGÜ?**

Eine HGÜ lohnt sich bei Freileitungen ab einer Entfernung von ca. 600 km Länge und einer Leistung von ca. 1.000 MW. Dieser Break-even-Punkt ergibt sich aus folgenden Parametern der unterschiedlichen Übertragungstechniken:

- HGÜ-Technik: niedrige Übertragungsverluste, niedrige Leitungskosten, aber hohe Basis-kosten für die Stromrichteranlage.
- Wechselstrom-(AC-)Technik: höhere Übertragungsverluste, höhere Leitungskosten, aber niedrige Basiskosten am Anfang und Ende der Übertragungsstrecke.

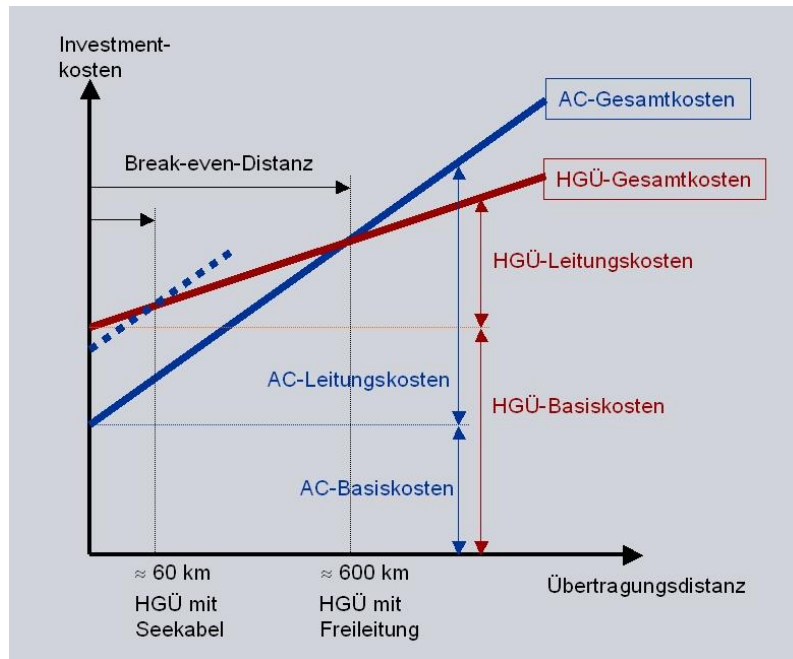


Abb. 3: Kosten/Break-even-Distanz.

Wenn große Leistungen über Unterwasserkabel transportiert werden müssen, z. B. von einem Offshore-Windpark, dann liegt der Break-even-Punkt bereits bei 50 bis 70 km. Hierbei genügt es, ein Einleiterkabel zu verwenden, wenn man die Erde oder das Meerwasser als Rückleiter in die Schaltung einbezieht.

Aus Gründen der Umweltverträglichkeit (Fischzug usw.) wird bei neuen Seekabelprojekten in der Regel jedoch eine Rückleitung über Erde oder Seewasser vermieden, indem man mindestens zwei Kabel nimmt.

### Weniger Leitungen, geringere Trassenbreite und schwächere Streufelder dank HGÜ

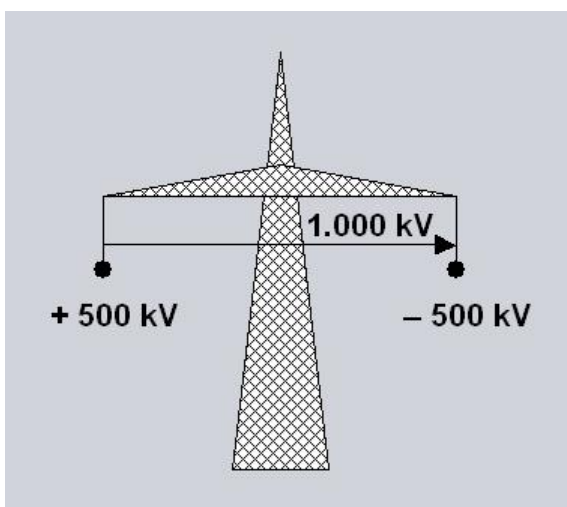


Abb. 4: Bipolare Stromübertragung bei Gleichspannung.

Ein weiterer Vorteil der HVDC- bzw. HGÜ-Technologien ist die geringere Anzahl der benötigten Leitungen.

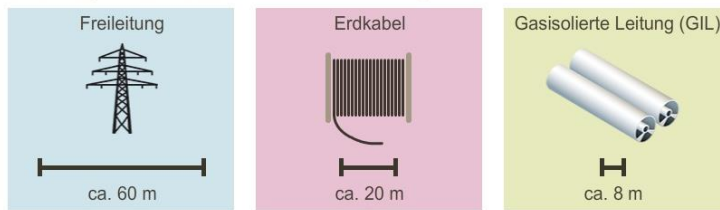
Bei Drehstromsystemen sind mindestens drei Leitungen erforderlich. In der Praxis werden oft zwei redundante Systeme mit jeweils drei Leitungen parallel geführt. Die Aufteilung jeder Phase auf mehrere Leitungen senkt bei Wechselspannung den Skineneffekt und vermindert die Koronaentladungen. (Eine Koronaentladung ist eine unerwünschte elektrische Entladung in einem nicht leitenden Medium, z. B. in Luft.)

Bei HVDC sind dagegen nur zwei Leitungen erforderlich. Vor allem bei Freileitungen mit Masten und Auslegern lassen sich der Flächenbedarf und damit die Kosten deutlich senken.

Auch im Fall von Erd- und Seekabeln, bei denen der Flächenbedarf vergleichsweise gering ist, rechnet sich die kleinere Zahl benötigter HVDC-Leitungen. Hinzu kommt, dass Erd- und Seekabel bei der Drehstromtechnik wegen der relativ hohen kapazitiven Beiwerte nur für Strecken von maximal 50 km verwendet werden.

### Trassenbreite und Magnetfelder bei Hochspannungsleitungen

Notwendige Trassenbreite verschiedener Leitungstechniken für HGÜ bei 4 GVA



Magnetische Feldstärke in Abhängigkeit von der Entfernung zur Leitung

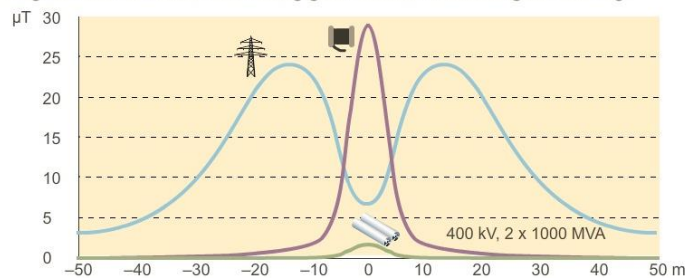


Abb. 5: Bipolare Stromübertragung bei Gleichspannung.

Betrachtet man den reinen Kostenaufwand ist die Freileitung die beste Lösung. Aber auch der Flächenverbrauch, die Verschandelung der Landschaft und die Belastung der Bevölkerung durch die elektrischen und magnetischen Felder ist ein wichtiges Kriterium für die Planung der großen Fernübertragungsstrassen.

Unter diesen Gesichtspunkten ist für die die HGÜ-Technik in Form von Erdkabeln wohl der beste Kompromiss.

## Die Elektronik hinter HGÜ

Das erste kommerzielle Gleichstromübertragungsprojekt – damals noch mit Gleich- und Wechselrichtern auf Quecksilberdampfbasis – entstand 1951 auf der Strecke Kashira–Moskau in Russland (100 kV, 100 km Freileitung, 30 MW), unter Verwendung der nach Kriegsende demontierten deutschen Anlage Elbe/Berlin der Elektrowerke AG. Das weltweit erste HGÜ-Großprojekt mit Gleich- und Wechselrichtern auf Siliziumbasis (Thyristoren) war der Stromtransport vom Wasserkraftwerk Cahora Bassa in Mosambik über 1.414 km nach Johannesburg in Südafrika mit 533 kV Übertragungsspannung und einer Leistung von immerhin 1.920 MW.

### Thyristoren verwandeln Wechselstrom in Gleichstrom und umgekehrt

Ein Stromrichterventil lässt nur jene Ausschnitte des Wechselstroms durch, welche die passende Polarität haben. Der Aufbau eines Thyristors entspricht im Wesentlichen dem einer Diode. In Sperrrichtung wird gar kein Strom durchgelassen. In Durchlassrichtung kann der Thyristor über eine Steuerspannung am Gate in einen leitenden Zustand überführt werden. Der Vorteil hierbei ist, dass im Thyristor die Funktion des Gleichrichters und des Hochleistungsschalters in einem Bauelement zusammenfällt.

Um die Regelbarkeit der Thyristortechnik zu verbessern, ist die Funktionalität der Leistungselektronik weiterentwickelt worden, so dass heute die modernsten Bauteile für die HGÜ-Technik zur Verfügung stehen.

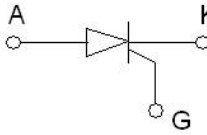
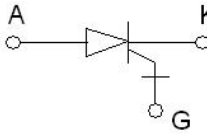
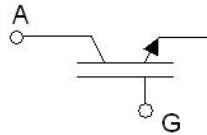
Ventiltyp	Thyristor	IGCT	IGBT
Schaltungs-symbol			
	A = Anode; K = Kathode; G = Steueranschluss (Gate)		
Ansteuerung	Ein: Stromimpuls an G Aus: Stromnulldurchgang zwischen A und K	Ein/Aus durch Stromimpuls an G	Gesteuert durch variable Spannung an G – K

Abb. 6: Leistungselektronik im Vergleich.

Es kommen sowohl elektrisch zündbare Thyristoren (spezielle Entwicklung für 6-Zoll-Thyristoren für Großprojekte in China mit bis zu 4,5 kA Nennstrom und HGÜ-Übertragungsleistungen bis zu 7.200 MW bei  $\pm 800$  kV) als auch über Laserlicht zündbare Thyristoren bis zu einer Wafergröße von fünf Zoll (4 kA Nennstrom) zum Einsatz.

Die Besonderheit bei den laserlichtgezündeten Thyristoren ist eine spezielle waferintegrierte Überspannungsschutzschaltung, die höchste Zuverlässigkeit im Betrieb gewährleistet.

Neueste Entwicklungen bei der HGÜ sind IGBT-Module (Insulated Gate Bipolar Transistor). Mit ihnen kann selbst geführt, d. h. auch ohne vorhandene Netzspannung, aus dem Gleichstrom in feinen Stufen eine „elektronische“ Netzspannung praktisch Oberschwingungsfrei „synthetisch“ erzeugt werden.

Diese Schwarzstart-Fähigkeit („Blackstart Capability“) ist in der Lage, kollabierte Netze mithilfe des noch „gesunden“ anderen Netzes ohne Hilfe von Kraftwerken oder Generatoren wieder komplett neu anzufahren. Der Einsatzbereich dieser modernen MMC-Technik reicht derzeit bis zu ca. 1.000 MW, also für mittlere Leistungen, sowohl bei Kabel- als auch bei Freileitungen.

## Die Vorteile der HGÜ auf einen Blick

Die HGÜ ist technisch wesentlich anspruchsvoller als eine konventionelle Wechselstrom-Hochspannungs-Übertragung, doch sie hat entscheidende Vorteile:

- Sie ist der einzige Weg, große Leistungen über große Entfernungen wirtschaftlich zu transportieren. Alle wechselstrombedingten Blindleistungsverluste, ob induktiver oder kapazitiver Art, und der Skineffekt fallen weg. Eine HGÜ lohnt sich bei Freileitungen ab etwa 600 km. Bei Tiefseekabeln ist die HGÜ schon ab 50 bis 70 km konkurrenzfähig und bei längeren Seekabeln alternativlos.
- Die Streckenkosten sind bei einer HGÜ-Verbindung niedriger als bei konventionellen AC-Fernleitungen, denn es müssen nur zwei Leiter gezogen werden. Die Strommasten können daher erheblich schmaler ausgeführt werden.
- Die HGÜ ist die einzige Möglichkeit, technisch inkompatible Stromnetze mit unterschiedlichen Regelverfahren oder Netzfrequenzen zu verbinden – ein wichtiges Entscheidungskriterium etwa in vielen Ländern wie China oder Indien, wo es eine Reihe regionaler Netze gibt, die nicht kompatibel sind. Die HGÜ mit ihrer schnellen Regelbarkeit der Leistung trägt zur Stabilisierung von bestehenden Drehstromnetzen, die sie verbindet oder zu denen sie parallel geführt wird, bei.

- HGÜ eignet sich daher in besonderer Weise als stabilisierender, besonders wirtschaftlicher „Energiehighway“ zum Transport großer elektrischer Energiemengen. Dies ist z. B. in Deutschland bei den drei geplanten Nord-Süd-Ausbau-Leitungen der Fall, die den Windstrom gleichmäßig in Deutschland verteilen sollen.