

## Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)

Im Zeichen des Klimaschutzes steigt die Bedeutung von Energieeffizienz ebenso wie der Anteil von Strom aus Erneuerbaren Energien. Zudem unterliegen Erneuerbare Energien (Offshore-Windanlagen) wie fossile Kraftwerke (mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung/CCS) teils neuen Standortbedingungen. Damit wandeln sich auch die Anforderungen an das Leitungsnetz. Bisher wurden Kraftwerkstandorte meist verbrauchsnahe gewählt; weiträumige Stromtransporte waren daher kaum erforderlich. Das zugehörige Stromnetz konnte mit Wechselstrom betrieben werden. In Zukunft jedoch könnte sich Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ, engl: HVDC) für bestimmte Zwecke als günstiger erweisen. Dies gilt speziell für die Übertragung großer Leistungen über lange Strecken, z.B. zur Versorgung Europas mit Solarstrom aus der Sahara. Mit dem am 7.5.2009 vom Bundestag beschlossenen Energieleitungsausbaugesetz werden Investitionen in HGÜ-Projekte erleichtert.

### Gleichstrom und Wechselstrom

Elektrischer Strom besteht aus bewegten Ladungen: Elektronen fließen im metallischen Leiter und transportieren dabei Energie, z.B. vom Kraftwerk zum Stromverbraucher. Dabei gibt es physikalisch zwei Möglichkeiten: Bei **Gleichstrom** fließen Ladungen durch ein Kabel zwischen Quelle und Verbrauchsort stets in die gleiche Richtung und kehren, nachdem sie ihre Energie etwa in einer Lampe abgegeben haben, durch ein zweites Kabel zur Quelle zurück. Bei **Wechselstrom** hingegen fließen die einzelnen Ladungen nicht kontinuierlich, sondern ändern viele Male pro Sekunde ihre Fließrichtung, bewegen sich also im Rhythmus der Netzfrequenz (Europa: 50 Hertz). Dennoch kann auch so kontinuierlich Energie in Richtung zum Verbraucher übertragen werden.

### Rückblick: Der „Stromkrieg“ und die historische Entscheidung für Wechselstrom

Als um 1880 der Erfinder Th. **Edison** die Glühbirne entwickelte und erstmals zur Beleuchtung von Städten wie New York nutzte, setzte er auf Gleichstrom. Dabei erzeugten kleine Kraftwerke vor Ort eine relativ niedrige Spannung, die über wenige Kilometer transportiert und in den Haushalten gefahrlos zur Beleuchtung genutzt werden konnte. Ein Transport über längere Strecken hingegen war bei niedriger Spannung wegen hoher Leitungsverluste kaum möglich; jeder Stadtteil benötigte daher eigene Kraftwerke.

Sein Konkurrent G. **Westinghouse** entwickelte nahezu zeitgleich die Wechselstromtechnik. Ihr Vorteil liegt darin, dass Wechselstrom mit einfachen technischen Mitteln (Transformator) auf höhere Spannungsebenen gebracht werden kann; dies war damals für Gleichstrom nicht möglich. Bei hoher Spannung kann der Strom mit geringen Energieverlusten weiter transportiert werden, ohne dass dafür dickere (teurere) Leitungen benötigt würden. So übertrug 1891 in Deutschland Oskar von Miller erstmals Drehstrom (Dreiphasen-Wechselstrom) aus einem Wasserkraftwerk in Lauffen am Neckar über 180 km nach Frankfurt am Main. Nachdem Westinghouse 1895 ebenso Strom von den Niagara-Fällen in US-Großstädte leiten konnte, setzte sich die Wechselstromtechnik weltweit durch und prägte das Energiesystem für mindestens ein Jahrhundert. Der Hauptgrund dafür, dass Edisons Gleichstromtechnik in diesem Wettbewerb unterlag, bestand in deren fester Spannung: Transformatoren funktionieren nur mit Wechselstrom. Verwendet man zwei Transformatoren, um die Spannung am Beginn der Transportstrecke hoch- und am Ende wieder herunterzusetzen, dann treten in der Leitung selbst wesentlich geringere Verluste auf und es kommt ein größerer Anteil der Kraftwerksleistung beim Verbraucher an. So steigt die Energieeffizienz des Transportsystems erheblich. Hohe Verluste müssen auch deshalb vermieden werden, weil sie zur Erwärmung der Leitungen führen, die im schlimmsten Fall sogar schmelzen könnten.

## Rückkehr des Gleichstroms?

Die historischen Argumente gegen Gleichstrom sind aus heutiger Sicht teilweise überholt. Mit moderner Halbleiter-Elektronik kann auch Gleichstrom effektiv auf höhere Spannungsebenen gebracht werden. Dann aber ergeben sich weitere Vorteile gegenüber dem Wechselstrom:

Wechselstrom kann bei Höchstspannung zwar über einige Hundert Kilometer transportiert werden, jedoch kaum weiter; bei Seekabeln liegt die Grenze sogar deutlich unter 100 km. Auf längeren Distanzen werden die Verluste so groß, dass die Kraftwerksleistung vor allem die Leitungen erwärmt. Gründe dafür liegen in drei verschiedenen, Wechselstrom-spezifischen Phänomenen: kapazitiver Widerstand, induktiver Widerstand und Skin-Effekt. **Kapazitiver Widerstand** rührt daher, dass bei jedem Wechsel der Fließrichtung – viele Male pro Sekunde – die Leitung neu mit Ladungen „gefüllt“ werden muss, bevor ein Strom über die gesamte Leitungsstrecke fließen kann. Für diese „Füllung“ müssen zusätzliche Ladeströme („Blindströme“) fließen, die Kraftwerkskapazität binden und eigene Leitungsverluste nach sich ziehen. Dieser Effekt ist besonders bei Erd- und Seekabeln relevant, die wegen ihrer Isolierschicht eine größere Ladungs-Kapazität aufweisen und so höhere Verluste verursachen. **Induktiver Widerstand** als zweite Verlustquelle tritt auf, weil jede stromdurchflossene Leitung unweigerlich von einem Magnetfeld umgeben ist. Dieses muss bei Wechselstrom ständig neu aufgebaut werden. Auch dafür fließen zusätzliche Blindströme, die wiederum Kraftwerksleistung binden und Leitungsverluste zur Folge haben. Beide Widerstandsarten steigen mit der Leitungslänge und machen Wechselstromübertragung bei größeren Distanzen unwirtschaftlich. Der sog. **Skin-Effekt** kommt als drittes Phänomen hinzu: Der ständige Richtungswechsel führt bei Wechselstrom physikalisch dazu, dass Ladungen fast nur an der Oberfläche des Leiters transportiert werden; das innere Volumen des Leiters ist praktisch nutzlos. Deshalb könnte die Transportkapazität einer Wechselstromtrasse durch dickere Kabel kaum erhöht werden. Allenfalls können mehrere Kabel parallel geführt werden, was die Trassenbreite erhöht. Bei Gleichstrom hingegen dienen dickere Leitungen direkt der Erhöhung der Transportkapazität.

Auch bei Gleichstrom treten Leitungsverluste auf, doch beschränken sich diese auf die unvermeidlichen Ohmschen Verluste. Der genaue Wert hängt von Technologie und Spannungsniveau ab; für sehr hohe Spannungen werden Energieverluste um 3% pro 1000 km als typische Werte genannt. Hinzu kommen Verluste in den Kopfstationen, in denen Gleichstrom erzeugt bzw. in Wechselstrom zurückverwandelt wird. Beim 2008 fertig gestellten NorNed-Kabel durch die Nordsee, das die Netze von Norwegen und den Niederlanden verbindet, wurden über 580 km Länge Gesamtverluste von 3,7% gemessen. Diese sehr geringen Verluste ermöglichen Stromtransporte selbst über Tausende von Kilometern. Die Konverterstationen stellen auch einen Kostenfaktor dar, weswegen Gleichstrom-Übertragung derzeit erst ab einer gewissen Mindest-Leitungslänge wirtschaftlich ist.

## Perspektiven

Bestehende HGÜ-Leitungen existieren auf allen Kontinenten, in Europa insbesondere als Seeverbindungen zwischen den Britischen Inseln, Skandinavien und Mitteleuropa. Auf dem europäischen Festland hingegen spielt HGÜ bisher kaum eine Rolle, weil Kraftwerksstandorte meist verbrauchsnahe gewählt wurden und Langstreckentransporte kaum erforderlich waren. Bei fortschreitender Vernetzung der Erneuerbaren Energien, speziell bei einer angestrebten Versorgung Europas mit Solarstrom aus Nordafrika (DESERTEC-Konzept), kann sich dies jedoch ändern.

Hier könnte HGÜ eine vielversprechende Lösung sein. Dabei braucht kein zweites, paralleles Stromnetz für Gleichstrom in der Fläche gebaut zu werden. Vielmehr könnte HGÜ primär für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen über lange Strecken dienen, an deren Ende Konverterstationen den Strom ins bestehende Netz einspeisen. Schwierigkeiten bei der Realisierung solcher „Strombrücken“ könnten vor allem politischer Natur sein: So müssten Trassen geplant und genehmigt, die Finanzierung sichergestellt und die Investitionssicherheit in den Transitländern gewährleistet werden. Technisch hingegen ist HGÜ weitgehend ausgereift und bereits heute marktreif. Dabei liegt die Technologie fast ausschließlich in der Hand europäischer Konzerne, die sich von ihrer weltweiten Anwendung auch steigende Exportchancen versprechen könnten. Unabhängig davon könnte HGÜ dazu beitragen, dass das globale Potenzial an Strom aus Erneuerbaren Energien besser ausgeschöpft und klimaschonend zur Deckung des weltweiten Strombedarfs eingesetzt wird.

## Quellen und weiterführende Literatur

- ZDF (2004). Der Stromkrieg. Multimedia-Dossier: <http://www.zdf.de/ZDFde/inhalt/1/0,1872,2151297,00.html>
- Oeding, Dietrich; Oswald, Bernd R. (2004). Elektrische Kraftwerke und Netze. 6. Auflage. Berlin: Springer-Verlag.
- Czisch, Gregor (2005). Szenarien zur zukünftigen Stromversorgung. Dissertation, Universität Kassel.
- Heuck, Klaus; Dettmann, Klaus-Dieter (2005). Elektrische Energieversorgung. Wiesbaden: Vieweg-Verlag.