

# Hochspannungs-Mischstrom-Übertragung (HMÜ) - Eine Ergänzung zu bestehenden Übertragungstechnologien?

Sven Meier, Hochschule Offenburg

## Abstract

Bei der Mischstromübertragung wird einem Wechselstrom direkt ein Gleichstrom überlagert.

Dadurch könnten die bereits bestehenden Drehstromübertragungs-Strecken genutzt werden.

Durch eine Aufschaltung des Gleichstromes auf vorhandene Freileitungen kann theoretisch bei kurzen Leitungen (<150km) bis zu 50% mehr Wirkleistung und bei großen Übertragungsstrecken (>300km) eine Verdopplung der übertragbaren Wirkleistung erwartet werden.

Theoretisch betrachtet ist die Mischstromübertragung eine geometrische Addition aller Strom- und Spannungskomponenten, was zu einer Leiter-Erde-Spannungserhöhung führt, ohne dabei Einfluss auf die verkettete Spannung zu nehmen.

Außerdem wird die Übertragung von Blindströmen unnötig, da ein natürlicher Betrieb von Leitungen des HDÜ-Netzes empfehlenswert ist.

Die theoretischen Betrachtungen konnten mit einem 1:1000-Modellsystem demonstriert und bestätigt werden.

## Schlüsselwörter

Hochspannungs-Mischstrom-Übertragung, HMÜ, geometrische Addition, natürliche Leistung, Blindleistung, Wellenwiderstand

## 1 Einleitung

Auf Grund der gesetzten Ziele bezüglich der Energiewende ist eine Umstrukturierung des deutschen Stromnetzes unumgänglich. Entstehende Versorgungslücken durch die Abschaltung von Kernkraftwerken im Süden Deutschlands sollen durch Erneuerbare Energien im Norden gedeckt werden. Um den Transport großer Energiemengen gewährleisten zu können, muss das Stromnetz ausgebaut werden. Die Bundesregierung hat zahlreiche

Maßnahmen zum Netzausbau geplant, für die eine zügige Realisierung vorgesehen ist. Der Realisierung dieser Vorhaben stehen jedoch oft Akzeptanzprobleme in der Bevölkerung gegenüber. Mit der Hochspannungs-Mischstromübertragung soll deshalb ein alternatives Übertragungskonzept vorgestellt werden, das ohne zusätzlichen Trassenneubau realisiert werden könnte.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung (HDÜ)

Die Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung (HDÜ; englisch high voltage alternating current, HVAC) ist das wichtigste Verfahren der Übertragung elektrischer Energie. Im Regelfall wird im Stromnetz für die Übertragung und Verteilung von elektrischer Energie Dreiphasenwechselstrom mit einer Netzfrequenz von 50 Hz, in manchen Ländern auch 60 Hz, verwendet.

In Deutschland ist die höchste bei der Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung (HDÜ) angewandte Spannung 380 kV, im Ausland werden zum Teil Spannungen bis 1200 kV verwendet. Je nach den physikalischen Gegebenheiten des Übertragungsnetzes wird bei der HDÜ der Sternpunkt im Rahmen der Erdschlusskompensation unterschiedlich behandelt. Für lange Übertragungen bei hoher Spannung erfolgt im Regelfall die starre Erdung des Sternpunkts.

Hochspannungsübertragungen sind nur bis zu einer gewissen Länge bzw. Entfernung zwischen Erzeuger (Kraftwerk) und Verbraucher wirtschaftlich. Dabei spielen nicht nur der Blindleistungsbedarf und die Materialkosten der Übertragung eine wichtige Rolle. Bei langen Leitungen (> 300 km) und großen zu übertragenden Leistungen führt der für Drehstromübertragungen typische Leitungswinkel zu Instabilitäten.

Bei großen Leitungslängen oder Seekabeln mit hoher kapazitiver Last stellt daher im Allgemeinen die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) eine wirtschaftlichere Methode dar. Die HGÜ kann allerdings bislang nicht vermascht in Form eines Verbundnetzes betrieben werden, es sind dabei nur direkte Endpunktverbindungen zwischen zwei Punkten möglich.

Dafür lassen sich Netze mit Drehstrom-Hochspannungs-Übertragung leichter vermaschen und Verbundnetze wie das europäische Verbundsystem aufbauen, da neben den Parametern Frequenz und

Knotenspannung auch davon unabhängig die Phasenlage und damit verknüpft die Parameter Wirk- und Blindleistung zur Verfügung stehen.

Mit Hilfe von Phasenverschiebungen kann in Wechselspannungsnetzen mittels spezieller Einrichtungen wie den Phasenschiebertransformatoren oder mit dem Unified-Power-Flow-Controller gezielt Leistungsflüsse auf bestimmten Leitungen in einem vermaschten Netz eingestellt und gesteuert werden.

## 2.2 Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)

Die HGÜ-Technik dient der Energieübertragung durch Gleichstrom über weite Entfernungen – dies sind Entfernungen von rund 750 km aufwärts –, da die HGÜ ab bestimmten Entfernungen trotz der zusätzlichen Konverterverluste in Summe geringere Übertragungsverluste als die Übertragung mit Dreiphasenwechselstrom aufweist. Beispiele sind die 1700 km lange HGÜ Inga-Shaba im Kongo und die über 1000 km lange HGÜ Québec-Neuengland zwischen Kanada und den USA. In Europa bestehen aufgrund der vergleichsweise engen räumlichen Verhältnisse bislang noch keine HGÜ-Anlagen in diesem Längenbereich.

Die bei großen Entfernungen wesentlichen Leitungsverluste ohne Konverterverluste betragen bei realisierten Anlagen wie der NorNed bei einer übertragenen Leistung von 600 MW (8,5 % der Nennleistung) und einer Leitungslänge von 580 km rund 3,7 %, was etwa 6,4 % relative Verluste auf 1000 km Leitungslänge entspricht.

Gleichstromnetze müssen anders gesteuert werden als Drehstrom-Hochspannungs-Übertragungssysteme. Gleichstromnetze können in der Regel nur über die Höhe der elektrischen Spannung an bestimmten Knotenpunkten des Netzes gesteuert werden. Der Strom folgt dann der Spannung gemäß dem Widerstand der Leitungen zwischen den einzelnen Stationen. Als weiteres Problem kommt hinzu, dass es in einem vermaschten HGÜ-Netz eine Möglichkeit geben müsste, eine defekte HGÜ-Konverterstation oder ein defektes HGÜ-Kabel bei einem Kurzschluss auch unter Last vom Netz zu trennen, damit die anderen Teile des Netzes sicher weiterarbeiten können.

Mechanische Leistungsschalter eignen sich jedoch nicht für Gleichstrom, da wegen der fehlenden Nulldurchgänge, Schaltlichtbögen nicht erlöschen.

Vermaschte HGÜ-Netze zum Aufbau intelligenter Stromnetze sind mit Stand 2018 immer noch Gegenstand der Forschung (CIGRE WG B4.52 u.a.).

Mittlerweile sind hybride Leistungsschalter verfügbar, die durch die Kombination von mechanischen Schaltern und elektronischen IGBTs eine Gleichstromverbindung auch bei hohen Spannungen und Strömen zuverlässig abschalten können. Höhere Spannungen können durch Serienschaltung mehrerer

Schalter, höhere Ströme durch Parallelschaltung behandelt werden.

Es gibt einzelne HGÜ mit einfachen Abzweigungen wie SACOI (HGÜ Italien-Korsika-Sardinien).

Auf HGÜ-Technik basierende kontinentale Stromnetze werden als wichtiger Faktor für erneuerbare Energiesysteme mit niedrigen Kosten gesehen, da sie in der Lage sind, die regional unterschiedliche Einspeisung erneuerbarer Energien teilweise auszugleichen und somit den Bedarf an Stromspeichern reduzieren.

In Deutschland sind im Netzentwicklungsplan mehrere Vorhaben für den Bau von HGÜ-Leitungen enthalten, deren Planung im Bundesbedarfsplanggesetz enthalten sind.

## 2.3 Hochspannungs-Mischstrom-Übertragung (HMÜ)

Eine Mischspannung ergibt sich aus der Überlagerung einer Gleichspannungskomponente  $U_G$  und einer Wechselspannungskomponente  $\hat{U}_D \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ . Der Effektivwert der Mischspannung  $U_M$  ergibt sich zu:

$$U_M = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [U_G + \hat{U}_D \sin(\omega t + \varphi)]^2 dt} = \sqrt{U_G^2 + U_D^2}$$

mit

$U_D$  Effektivwert (unverkettet) der sinusförmigen Wechselspannungskomponente und

$U_G$  Effektivwert der Gleichspannungskomponente.

Entsprechend gilt für den Effektivwert des Mischstromes  $I_M$ :

$$I_M = \sqrt{I_G^2 + I_D^2}$$

mit

$I_D$  Effektivwert des sinusförmigen Wechselstromes und

$I_G$  Effektivwert des Gleichstromes.

Gleich- und Wechselspannungskomponenten bzw. Gleich- und Wechselstromkomponenten werden also geometrisch addiert.

Die übertragbare Scheinleistung  $S_M$  ergibt sich aus der resultierenden Spannung  $U_M$  und dem resultierenden Strom  $I_M$  zu:

$$S_M = U_M \cdot I_M.$$

Den Überlegungen von Diebels und Diebels [1] zufolge, müssen die Wirkleistungsverluste im Verhältnis zur Übertragungsleistung bei der Mischstromübertragung kleiner oder gleich derer leistungsmäßig vergleichbarer Drehstromübertragungen

sein, um die Investitionen für die Mischstromübertragung rechtfertigen zu können.

Es muss also gelten:

$$\frac{\Delta P}{P} \geq \frac{\Delta P_M}{P_M},$$

wobei  $P$  und  $\Delta P$  die Wirkleistung und die Wirkleistungsverluste in einem Drehstromsystem und  $P_M$  und  $\Delta P_M$  die Wirkleistung und die Wirkleistungsverluste in einem Mischstromsystem darstellen.

Damit ist eine Gleichstromüberlagerung bei thermischer Auslastung des Drehstromübertragungssystems meistens nur möglich, wenn der Wechselstrom entsprechend vermindert wird. Für den zulässigen Dauerstrom  $I_{zu}$  muss gelten:

$$I_{zu} \geq \sqrt{I_G^2 + I_D^2}.$$

Durch Überlagerung eines Gleichstromes auf eine Drehstromübertragung erhöht sich die Übertragungsleistung auf

$$P_M = P_G + P_D$$

mit

$P_D$  Drehstromübertragungsleistung und

$P_G$  Gleichstromübertragungsleistung.

Dabei gilt:

$$P_D = 3U_D \cdot I_D \cdot \cos \varphi,$$

$$P_G = 3U_G \cdot I_G.$$

Damit ergibt sich bei der Forderung nach gleichen spezifischen Verlusten mit  $R_D \approx R_G$  folgender Zusammenhang:

$$\frac{I_D}{U_D} = \frac{I_G \cdot \cos \varphi}{U_G},$$

wobei  $R_D$  die Leitungsresistenz des Drehstromkreises und  $R_G$  die Leitungsresistenz des Gleichstromkreises bezeichnet [1].

Die Erhöhung  $k$  der Übertragungsleistung ergibt sich zu:

$$k = \frac{P_M}{P_D} = 1 + \frac{U_G^2}{U_D^2 \cdot \cos^2 \varphi}.$$

„Das bedeutet, dass bei gleichen spezifischen Verlusten die Erhöhung der Übertragungsleistung einer Drehstromleitung durch Überlagerung einer Gleichspannung proportional dem Quadrat des Spannungsüberlagerungsfaktors ist“. Des Weiteren ergibt sich den Erläuterungen von Diebels und Diebels zufolge die maximale Gleichspannung  $U_{Gmax}$ , die einem Drehstromsystem überlagert werden kann, aus der zulässigen Dauerstrombelastbarkeit. Bei gleichen spezifischen Verlusten ergibt sich:

$$U_{Gmax} = \frac{\sqrt{I_{zu}^2 - I_D^2} \cdot U_D \cdot \cos \varphi}{I_D},$$

wobei Isolationsprobleme hier noch nicht berücksichtigt werden [1].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die resultierende Spannung  $U_M$  bei der Mischstromübertragung aus der geometrischen Addition der Spannung im Gleichspannungszwischenkreis  $U_G$  und dem Effektivwert der Spannung  $U_D$  im Drehstromsystems ergibt. Die resultierende Gesamtspannung muss innerhalb des Spannungsbandes gehalten werden bei gleichzeitiger Optimierung der übertragbaren Leistung. Deshalb erscheint es sinnvoll,  $U_G$  und  $U_D$  betragsmäßig etwa gleich groß zu wählen. Letztlich wird aber die Größe der überlagerten Gleichspannung davon bestimmt, welche Mischspannung isolationsstechnisch realisierbar ist. Entscheidend ist hierbei die Beherrschung der auftretenden effektiven Betriebsspannung gegen Erde, da die verkettete Betriebsspannung unbeeinflusst bleibt.

Bei den Strömen ergibt sich analog der Effektivwert des resultierenden Gesamtstroms  $I_M$  pro Phase durch geometrische Addition des Betrages des Gleichstroms  $I_G$  pro Phase und des Effektivwertes des Wechselstroms  $I_D$  pro Phase. Um den zulässigen Gesamtstrom möglichst gut auszunutzen, erscheint eine gleichmäßige Aufteilung des Stroms sinnvoll. Dabei wird der zulässige Dauerstrom der Leiterseile als zulässiger Mischstrom festgesetzt.

Damit entwickelt das Mischstromsystem seinen größten Vorteil bei großen Übertragungstrecken, wenn die Freileitungen nahe ihrer natürlichen Leistung betrieben werden. Dadurch kann im Vergleich zu einer reinen Drehstromübertragung die übertragbare Wirkleistung um die Leistung des Gleichspannungssystems gesteigert werden. Bei langen Leitungen könnte auf diese Weise die übertragbare Leistung nahezu verdoppelt werden.

Kurze Leitungen (< 150 km) werden für gewöhnlich übernatürlich betrieben, weshalb sich eine Steigerung der thermischen Grenzleistung lediglich auf Basis der erhöhten Leiter-Erd-Spannung des Mischsystems und der reduzierten bzw. fehlenden Blindleistung ergibt. Mehr als 50 % Lastflusssteigerung abzüglich der Umrichterverluste sind für kurze Leitungen daher nicht zu erwarten.

## 3 Das Hochspannungs-Mischstrom-Übertragungsmodell

### 3.1 Drehstrom-Donaumastmodell als Basis der Mischstromübertragung

Als geeigneter Träger für die Mischstromübertragung bietet sich der Donaumast mit seinen zwei 380-kV-Drehstromsystemen an.

Der Leitungsnachbildung liegt eine ältere 380-kV-Freileitung mit Viererbündeln und dem Querschnitt 4 x 300 mm<sup>2</sup> zugrunde. Diese besitzt folgende verteilte Parameter:

$$R' = 0,024 \frac{\Omega}{\text{km}},$$

$$L' = 0,77 \frac{\text{mH}}{\text{km}},$$

$$CB' = 13,07 \frac{\text{nF}}{\text{km}}.$$

Daraus ergibt sich bei einer Netzfrequenz von  $f = 50$  Hz der von der Leitungslänge unabhängige Wellenwiderstand:

$$\underline{Z}_W = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} = \sqrt{\frac{24 \frac{\text{m}\Omega}{\text{km}} + j\omega 0,77 \frac{\text{mH}}{\text{km}}}{0 + j\omega 13,07 \frac{\text{nF}}{\text{km}}}} \approx 240 \Omega.$$

Berechneter und gemessener Wert stimmen im Rahmen der Messgenauigkeit überein. Ströme und Spannungen sind im Verhältnis 1:1000 skaliert.

In Bild 1 sind die am Leitungsanfang benötigte Blindleistung  $Q_{1D}$  und die am Leitungsende entnommene Wirkleistung  $P_{2D}$  bei unterschiedlichen Leitungslängen dargestellt und auf die natürliche Leistung  $P_{\text{nat}}$  normiert.

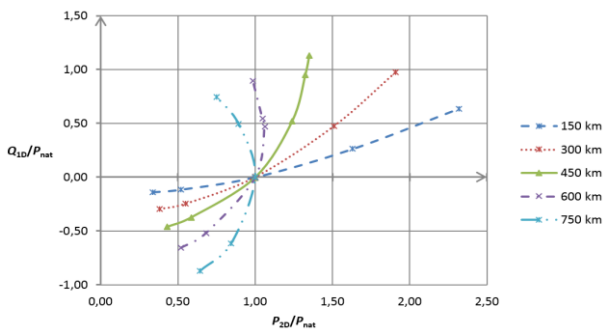


Bild 1 Blindleistungsbedarf unterschiedlicher Leitungslängen in Abhängigkeit der übertragenen Wirkleistung

Das Leitungsmodell zeigt die für diesen Leitungstyp charakteristischen nose curves.

Folgerichtig ergibt sich für die natürliche Leistung eines einzelnen Drehstromsystems dieses Modells ein Wert von etwa 550 W, der ebenfalls gut zum Realsystem passt (Skalierung 1:1000).

Für die Modellierung des Donaumastsystems wurden zwei dieser Leitungsmodelle parallel geschaltet, deren Anfang und Ende mit Netztrafos begrenzt und mit einer variablen Last abgeschlossen (Bild 2).

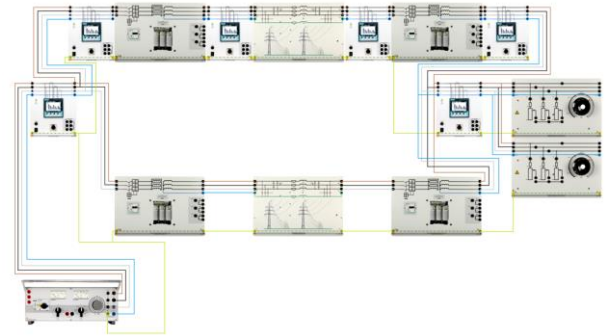


Bild 2 Modell des 380-kV-Donaumastsystems (HDÜ)

Leider standen lediglich Dreieck-Stern-Trafos zur Verfügung.

Mit den eingebauten Multimetern konnten sämtliche Spannungen und Ströme sowie Wirk-, Blind- und Scheinleistungen gleichzeitig gemessen werden.

### 3.2 Mischstrommodell 1

Im einfachsten Fall könnte jetzt der Pluspol des HGÜ-Gleich- und Wechselrichters auf das Drehstromsystem Eins und der Minuspol bzw. die Rückleitung auf das Drehstromsystem Zwei geschaltet werden.

Theoretisch könnten die Transformatorsternpunkte zur Einspeisung des Gleichstromes genutzt werden [1]. Um eine Vormagnetisierung des Transformator-kerns zu vermeiden, müsste die leitungsseitigen Wicklungen in Zick-Zack ausgeführt werden.

Vorrangig soll die Mischstromübertragung aber zur Integration in bestehende 380-kV-Drehstromsysteme untersucht werden. Aufgrund der anfallenden Kosten für einen Drehstromtransformator mit in Zick-Zack-Schaltung ausgeführten 380-kV-Wicklungen, erscheint diese Möglichkeit jedoch nicht sinnvoll. Zusätzlich muss dabei beachtet werden, dass die üblicherweise vorliegende starre Sternpunktterdung bei der Aufschaltung des Gleichstromes über den Transformatorsternpunkt im 380-kV-Netz aufgehoben werden muss.

Grundsätzlich erschien es daher am sinnvollsten, den Gleichstrom über in Zick-Zack geschaltete 3-Phasendrosseln aufzuschalten (evtl. „halber 380-kV-Trafo“).

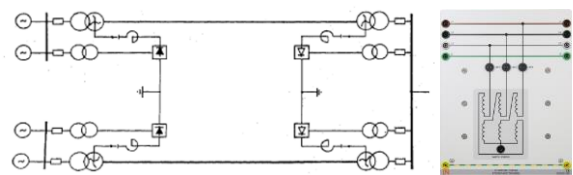


Bild 3 Links: Mischstromübertragung nach Diebels und Diebels [1]

Bild 4 Rechts: Sternpunktterdung für die Gleichspannungskopplung des Modellsystems

In Bild 5 ist die Aufsaltung des Gleichstromes über diese zusätzlichen Sternpunktdrosseln in Zick-Zack-Schaltung einschließlich der Gleich- und Wechselrichterstationen mit ihren Netztrafos schematisch dargestellt.

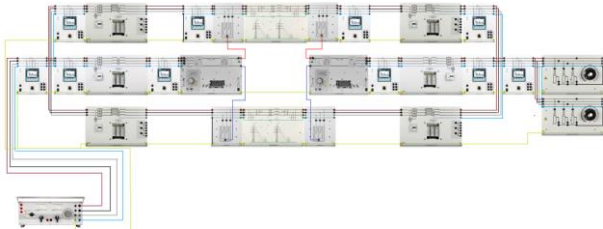


Bild 5 Modell 1 der Hochspannungsmischstromübertragung (HMÜ)

Mit dieser Anordnung ließ sich ein stabiler Mischstrom-Lastfluss demonstrieren. Die theoretisch denkbare Steigerung der thermischen Grenzleistung, konnte mit diesem Modell allerdings nicht nachgewiesen werden.

Wie sich heraus stellte, machten die elektronischen Spannungsteiler der von Haus aus monophasen dreiphasigen Gleich- und Wechselrichter Probleme, welche für ein bipolares System sorgen sollten. Deshalb wurde die angestrebte Erhöhung der Leiter-Erd-Spannungen nicht erreicht.

Unter diesen Umständen was es außerdem nicht möglich, einen metallic return in das DC-System zu integrieren.

Aus diesen Gründen musste das Mischstromsystem neu gedacht werden.

### 3.3 Mischstrommodell 2

Um die Gleich- und Wechselrichtung möglichst einfach und kostengünstig zu gestalten, kommen jetzt nur noch einphasige Gleich- und Wechselrichter zum Einsatz (Bild 6).

Damit die Drehstromnetze bei Entnahme und Rückspeisung durch das angeschlossene DC-System dennoch nur symmetrisch belastet werden, werden für die Netzkopplung Scott-Transformatoren verwendet (Bild 6). Die Phasenverschiebung der zwei zum DC-System gerichteten Phasen ist unbedeutend, da die Gleich- und Wechselrichter sich unabhängig voneinander auf jede Phasenlage synchronisieren können. Die Aufsaltung des Gleichstroms auf das 380-kV-Drehstromsystem erfolgt wieder über die vom Modell 1 her bekannten Zick-Zack-Sternpunktdrosseln.

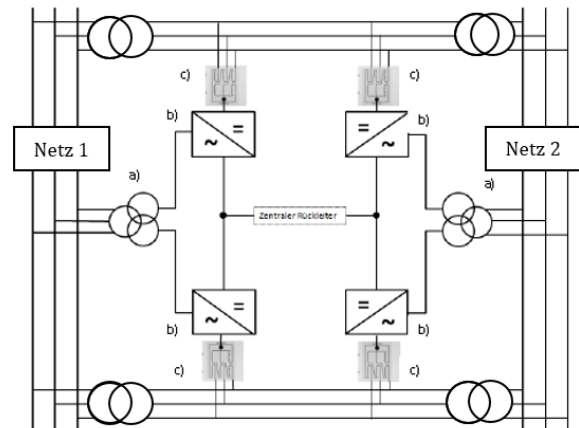


Bild 6 Skizze des Mischstrommodells 2 mit Scott-Transformatoren(a) und einphasigen Gleich- und Wechselrichtern(b)

Mit dieser Konzeptänderung konnten eine ganze Reihe weiterer Vorteile generiert werden. So ist wahlweise 2fach-monopolarer DC-Betrieb mit positiven oder negativen Spannungen oder bipolarer DC-Betrieb realisierbar. Der Lastfluss von DC- und AC-System kann unabhängig voneinander in Richtung und Amplitude gewählt werden.

Bei Ausfall von einem der Gleich- bzw. Wechselrichter kann ein einseitiger Mischstrombetrieb ohne Leistungseinbußen der verbleibenden Mischstromstrecke über den metallic return aufrechterhalten werden, was für die Einhaltung des (n-1)-Kriteriums von Bedeutung sein könnte.

Das funktionsfähige Mischstrom-Gesamtsystem wird von Bild 7 als Grafik und von Bild 8 im realen Versuchsaufbau gezeigt.

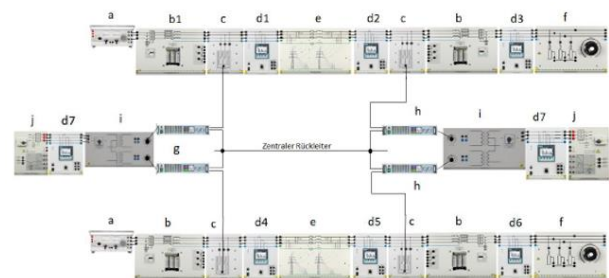
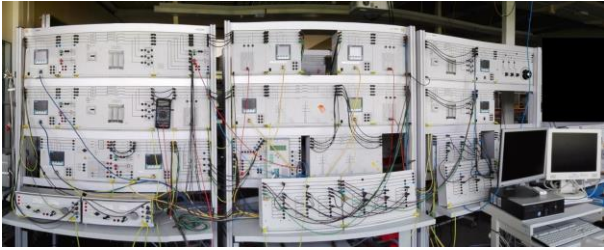


Bild 7 Grafik des Mischstrommodells 2 (Gesamtsystem)



**Bild 8** Versuchsaufbau zur Mischstromübertragung im Energietechniklabor der Hochschule Offenburg.

*nicht zu sehen: Programmierbare Gleich- und Wechselrichter, Scott-Transformatoren (unter den Labortischen)*

Die im Vergleich zur Modellskizze (Bild 6) enthaltenen einstellbaren Lasten, zum Abschluss der Drehstromleitungen, sind nicht zwingend notwendig, aber für die Anpassung des Modellsystems praktisch. Durch die Erhöhung der Leiter-Erd-Spannung im Mischspannungsbetrieb wird vom HDÜ-System zusätzliche kapazitive Blindleistung angefordert (Drehstromsystem wird kompensiert-Querkompensation) wodurch sich der Wellenwiderstand der 380-kV-Leitungen reduziert. Die daraus resultierende Erhöhung der natürlichen Leistung des HDÜ-Systems ist ein angenehmer Nebeneffekt der Mischstromübertragung.

Im Vergleich mit langen Drehstromleitungen (konventionelle 380-kV-HDÜ: 300 km, 450 km, 600 km) die bei natürlicher Leistung betrieben wurden, konnte das Mischstromsystem 2 ca. 87 % mehr Wirkleistung übertragen.

Im Vergleich mit kurzen HDÜ-Leitungen (150 km), bei identischen thermischem Grenzströmen

( $I_{\text{therm.M}} = I_{\text{therm.AC}}$ ) und einem gewählten  $\cos\varphi$  von etwa 0,9, ergab sich eine Leistungssteigerung von ca. 31%. Das entspricht in etwa dem Erwarteten, da alle Wirkleistungen vor und nach allen Elementen der Mischstromübertragungsstrecke gemessen wurden, weshalb die Inverterverluste enthalten sind.

## 4 Ausblick

Obwohl das Mischstrommodell 2 in seiner Grundperformance überzeugen konnte, bleiben eine ganze Reihe von Fragen offen, die mit diesem Modellversuch nicht beantwortet werden können. Eine Auswahl wichtiger Fragestellungen soll an dieser Stelle kurz vorgestellt werden:

- Der erste offene Punkt ist die Frage nach den Freileitungs-Isolatoren, um die erhöhte Leiter-Erd-Spannung des Mischsystems aufzufangen. Es gibt eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass keine Anpassungen notwendig sind. Wenn doch, sollten moderne Fremdschichtisolatoren das Problem

beherrschen können, da Gleich- und Wechselstrom die Isolierung unterschiedlich beanspruchen.

- Wie reagieren die vorhandenen Netztrafos auf mögliche DC-Kriechströme?
- Sind die Netzknoten des HDÜ-Verbundnetzes wirklich so einfach mit den Sternpunktrosseln zu umgehen, wie es zum gegenwärtigen Zeitpunkt aussieht?
- Welche Anpassungen sind im Netzschutz nötig, um mit den fehlenden starr geerdeten Sternpunkten im 380-kV-Netz umzugehen? Erste Untersuchungen zum Differential- und Distanzschutz im Modellsystem stimmen hier optimistisch.
- Wie kann der Gleichstrom bei Kurz- und Erdschlüssen gleichzeitig mit dem Drehstrom geschaltet werden?
- Wie reagiert das Mischstromsystem auf transiente Überspannungen, z.B. bei einem Blitzeinschlag?

Bei Betrachtung allein dieser Fragen wird klar, dass die Mischstromübertragung, obwohl sie ausschließlich auf bekannte Technik zurückgreift, eine neue Übertragungstechnologie ist. Ohne erheblichen Aufwand in Forschung und Entwicklung ist ein zeitnaher Einsatz nicht denkbar.

Genau so wenig ist sie als Ersatz bestehender Übertragungstechnologien gedacht. Unter gewissen Umständen könnte ihr Einsatz aber ergänzend zu HDÜ und HGÜ gesehen werden, wenn beispielsweise ein Trassenneubau unmöglich ist oder Stabilitätsprobleme im HDÜ-System schnell behoben werden müssen.

Unter diesen Gesichtspunkten könnte es sich lohnen, in Forschung und Entwicklung des HDÜ-Systems zu investieren und den vorliegenden Modellversuch auf einer realen 380-kV-Teststrecke zu reproduzieren.

Der Aufwand für einen derartigen Schritt ist allerdings erheblich, da das Mischstromsystem zusätzlich zu allen bereits genannten Punkten auch eine Lastflusssteuerung im HDÜ-System voraussetzt.

## Literatur

- [1] Diebels, R; Diebels, W.D.: Energietechnik (DDR), 25. Jg, Heft 9, September 1975

## Über den Autor



Prof. Dr.-Ing. Sven Meier lehrt Energietechnik an der Hochschule Offenburg. An der dortigen Fakultät Elektrotechnik/Informationstechnik vertritt er das Fachgebiet „Elektrische Energieanlagen und Netze“.

Nach seiner Ausbildung zum Elektromonteur (heute Energieelektroniker) studierte Sven Meier an der Technischen Universität Braunschweig Elektrotechnik mit der Spezialisierung Hochspannungstechnik.

Nach seiner Dissertation am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik in Freiburg blieb er zunächst als wissenschaftlicher Mitarbeiter, später als Leistungsbereichsleiter, wo er sich bis zu seiner Berufung an die HS-Offenburg mit Hochfrequenz-Anpassnetzwerken für energie- und anlagentechnische Anwendungen beschäftigte.