

Grundkonzept eines DC-Multiterminal-Transportnetzes

C. Heising, S. Menzner; Avasition GmbH

A. Steimel, V. Staudt; Ruhr-Universität Bochum

K. Vennemann, E. Grebe, K. Kleinekorte; Amprion GmbH

Inhalt

1	Motivation.....	1
2	Anforderungen und Lösungskonzept.....	1
3	Eigenschaften des Lösungskonzepts.....	3
4	Stand der Technik und Entwicklungsbedarf.....	6
5	Zusammenfassung.....	7

1 Motivation

Das heutige 380-kV-Verbundsystem stellt das Rückgrat der elektrischen Energieversorgung in Deutschland und Europa dar. Dieses Übertragungsnetz wurde in seiner heutigen Ausgestaltung für eine örtlich und zeitlich bedarfsgerechte Erzeugung der elektrischen Energie ausgelegt und optimiert. Der grundlegende Wandel der Elektrizitätswirtschaft mit einem großen Anteil fluktuierender Einspeisung aus Windenergie im Norden Deutschlands, dem Ausbau der Solarenergie im Süden Deutschlands und neuen lastfernen Standorten konventioneller Kraftwerksleistung, die am deutschen und europäischem Strommarkt teilnehmen, führt zu ständig zunehmenden Übertragungsbedarf und –entfernungen. Dadurch ergeben sich grundlegend neue Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und Flexibilität des europäischen und insbesondere des deutschen Übertragungsnetzes. Dieses ist für neue Fernübertragungsaufgaben zu konzipieren und angesichts der Dynamik der Veränderungen müssen geeignete Anpassungen innerhalb weniger Jahre vorgenommen werden.

2 Anforderungen und Lösungskonzept

Parallel zu der gezielten Weiterentwicklung des bestehenden 380-kV-Drehstromnetzes ist in Deutschland der Aufbau leistungsstarker Overlay-Fernübertragungsverbindungen erforderlich (siehe auch Netzentwicklungsplan 2012: www.netzentwicklungsplan.de). Nachfolgend wird ein Lösungskonzept für die Integration von Overlay-Fernverbindungen in das bestehende 380-kV-Drehstromnetz vorgestellt. Diese Fernübertragungsverbindungen müssen u.a. die folgenden Kernanforderungen erfüllen:

- Versorgungssicherheit und Systemkompatibilität

Overlay-Fernübertragungsverbindungen beinhalten für Deutschland einen Technologiesprung, wobei das geforderte Sicherheitsniveau der Stromversorgung aufrecht zu halten ist. Neue Technologien müssen daher systemkompatibel in das bestehende Übertragungsnetz integriert werden. Hierzu zählen insbesondere eine adäquate Fehlerbeherrschung sowie eine flexible Steuer- und Regelbarkeit für eine gesamthafte Betriebsoptimierung des Overlaynetzes mit dem bestehenden Verbundsystem.

- Entwicklungsfähigkeit

Die gewählte Technologie muss im Hinblick auf den langfristig erwarteten Transportbedarf, d.h. für einen Zeithorizont 2030 und länger, entwicklungsfähig und flexibel anpassbar sein. Die Integration in eine gesamteuropäische Lösung muss grundsätzlich möglich sein.

- Öffentliche Akzeptanz

Für die Realisierbarkeit von Leitungsbauprojekten kommt der öffentlichen Akzeptanz eine Schlüsselfunktion zu. Die Belange von Rauminanspruchnahme und Naturschutz erfordern eine Technologie, die bei Ausführung als Freileitung einen minimalen Trassenbedarf durch angemessene Leistungsdichten beansprucht. Für sensible Bereiche muss die Option einer Teilverkabelung gegeben sein. Ferner sollte der gemeinsame Betrieb von Overlayverbindungen mit dem bestehenden 380-kV-Netz auf bereits vorhandenem Gestänge bzw. in vorhandenen Trassen möglich sein.

Der Lösungsvorschlag basiert auf einer Hochspannungs-DC-Übertragungsstrecke bzw. einem DC-Multiterminal-Übertragungsnetz mit frei positionierbaren und kommunikationsfrei betriebsfähigen Anschlusspunkten zum AC-Netz. Diese Grundstruktur ist nachfolgend dargestellt.

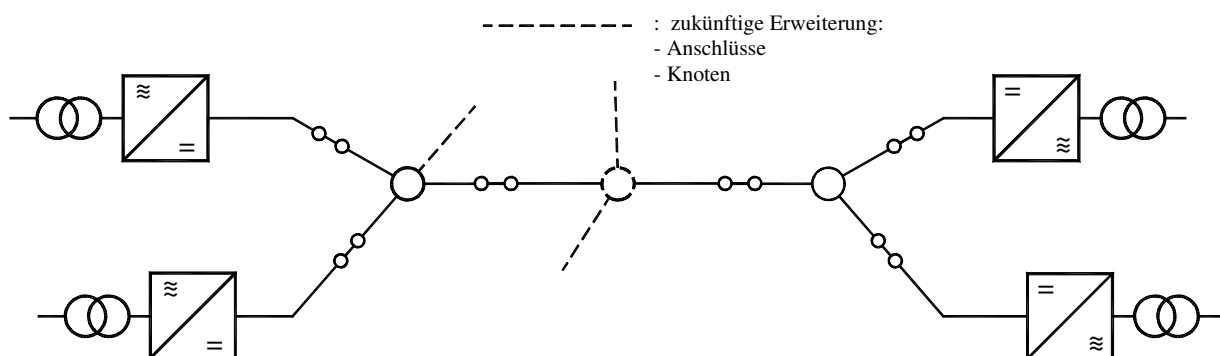


Abbildung: Grundstruktur eines DC-Multiterminal-Netzes

Für die leistungselektronische Topologie an den Anschlusspunkten wird ein modular aufgebauter Multilevel-Stromrichter vorgeschlagen. Zur Sicherstellung der gewünschten Funktionalität kommen bipolare Stromrichtermodule zum Einsatz, vorzugsweise in Vierquadrantsteller-Ausführung (4qs). Zusammen mit einer geeigneten Regelungsstruktur lassen sich die oben genannten Anforderungen sehr gut erfüllen, worauf im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

3 Eigenschaften des Lösungskonzepts

Versorgungssicherheit und Systemkompatibilität

In Bezug auf Versorgungssicherheit und Systemkompatibilität sind folgende vorteilhafte Eigenschaften hervorzuheben:

- Flexible Regel- und Steuerbarkeit im Normalbetrieb

Die gewählte Stromrichtertechnologie ermöglicht im Zusammenspiel mit einer geeigneten Regelung an jedem Anschlusspunkt und unabhängig von den anderen Anschlusspunkten eine freie Steuerbarkeit der Leistungsflussrichtung. Dabei muss selbstverständlich die aufgenommene Energie des DC-Multiterminal-Netzes gleich der abgegebenen Energie zuzüglich der Verluste sein.

- Stützung des Blindleistungshaushalts

Die selbstgeführte Stromrichtertechnologie ermöglicht im Rahmen ihrer Dimensionierung eine freie und unabhängige Bereitstellung von Blindleistung (kapazitiv bzw. induktiv) an jedem einzelnen AC-Anschlusspunkt. (Dies ist mit netzgeführter thyristorbasierter HGÜ-Technologie nicht möglich. Diese benötigt im Gegenteil an jedem Anschlusspunkt eine betriebspunktabhängige Blindleistungsbereitstellung durch das AC-Netz und darüber hinaus aufwändige passive/aktive Filter an jedem Anschlusspunkt.)

- Hohe AC-seitige Systemperformance

- Die gewählte Stromrichtertechnologie bietet die Möglichkeit der dynamischen Spannungsstützung an den Anschlusspunkten. Die Stromrichter stellen im Prinzip Betriebsmittel mit FACTS-Eigenschaften dar.
- Mit dem außerordentlich günstigen dynamischen Verhalten bei AC-seitigen Fehlern (z.B. Fault Ride Through) können bestehende und zukünftige Netzanschlussregeln erfüllt werden.

- Beherrschung von Fehlern auf der AC-Seite

AC-seitige fehlerbedingte Spannungseinbrüche werden ohne Zusatzaufwand beherrscht. Die Anlage kann unverzögert wieder in den vorgegebenen Leistungsbetrieb übergehen, sobald die AC-seitigen Voraussetzungen nach Fehlerklärung gegeben sind. (Für netzgeführte thyristorbasierte HGÜ-Technologie besteht auf der Seite der Energieabgabe in das AC-Netz bei einem AC-Spannungseinbruch das Risiko der Stromrichterkipfung, AC-seitige Kurzschlüsse werden vom Stromrichter selbst nicht beherrscht und erfordern aufwändige Zusatzmaßnahmen im Bereich der äußeren Beschaltung.)

- Beherrschung von Fehlern auf der DC-Übertragungsstrecke

Die Wahl von Vierquadrantsteller-Modulen erlaubt die Beherrschung von Spannungseinbrüchen beliebiger Art und Dauer im DC-Netz im normalen geregelten Betrieb des Stromrichters - ein adäquates Betriebsführungskonzept sowie eine geeignet dynamische Regelung bilden hierfür die Basis. Bei typischen Netzfehlern –z.B. verursacht durch Blitzschlag oder Seiltanzen bei Freileitungen – sind keinerlei

Schalthandlungen oder Abschaltungen im Umfeld des Stromrichters oder im DC-Multiterminal-Netz erforderlich. Auch das grundlegende Regelungsverfahren wird kontinuierlich beibehalten. Die Ausgangsspannung wird automatisch den jeweiligen Bedürfnissen folgend angepasst, der Strom wird geeignet und ausreichend schnell begrenzt. In vielen Fällen reicht zur Fehlerklärung die Absenkung der DC-Spannung und daraus folgend des DC-Stroms bis auf Null aus, so dass der Lichtbogen gelöscht wird – in Analogie zur Kurzunterbrechung bei AC-Systemen wird so ein künstlicher Nulldurchgang des Stroms erzeugt.

Liegt ein bleibender Fehler vor, wird das betroffene DC-Segment durch einen Trenner bzw. AC-Leistungsschalter im nahezu stromlosen Zustand selektiv abgeschaltet. Die verbleibenden Teile des DC-Multiterminal-Netzes detektieren dies durch Auswertung von Spannung und Strom im DC-Netz und erhöhen Spannung und Strom automatisch (dies wird systemimmanent durch ein adäquates Betriebsführungskonzept hinterlegt) bis zum Erreichen des vorgegebenen Betriebszustands. Die Detektion fehlerhafter Segmente erfolgt primär autonom durch eine im DC-Knoten realisierte Steuerung. Diese wertet Spannungen und Ströme in den Ästen des DC-Knotens aus und löst bei Bedarf und bei kleinem Strom die Öffnung der Trenner bzw. AC-Leistungsschalter des fehlerhaften Zweigs aus. Die Steuerung der Station am anderen Ende dieses Zweigs – oder die Steuerung des dortigen DC-Knotens – erkennt ebenfalls den Fehlerzustand und öffnet den zugehörigen Trenner. Diese autonome, dezentrale und automatische Steuerung kann durch Informationsaustausch zwischen den Stationen ergänzt und unterstützt werden – gewährleistet aber auch bei Kommunikationsverlust einen sicheren Weiterbetrieb, was aufgrund der Anforderungen an einen Höchstleistungsenergie-transport unerlässlich ist.

- Exzellente Spannungsqualität

Die aus technischen Gründen erforderliche Anzahl von Modulen in Reihenschaltung führt zu einer quasisinusförmigen Anschlussspannung, so dass eine filterlose Anbindung an das jeweilige AC-Netz möglich ist – d.h. der Transformator am Anschlusspunkt reicht üblicherweise aus. Zusätzliche Funktionalitäten zur Verbesserung der Power-Quality am Einspeisungspunkt (Blindleistung, Oberschwingungen, Interharmonische, Subharmonische, etc.) können ebenfalls integriert werden.

- Minimale Kommunikationsanforderungen

Der aktuelle Netzzustand – wie er am jeweiligen Anschlusspunkt durch Messung ermittelt werden kann – wird zur Bestimmung der augenblicklichen Leistung und des gewünschten dynamischen Verhaltens am jeweiligen Anschlusspunkt verwendet und sichert nach einem noch näher auszuführendem Regelungskonzept den stabilen Netzbetrieb. Eine Master-Slave-Lösung ist zwar prinzipiell auch möglich, aber nicht erwünscht, da sie zu erheblichem Kommunikationaufwand führt, um die geforderte Zuverlässigkeit zu erreichen.

Öffentliche Akzeptanz

Zur Minimierung des Trassenbedarfs muss die Übertragungsleistung pro System angemessen gebündelt werden, d.h. die Bemessungsleistung der Anschlusskopfstationen muss in weiten Grenzen skalierbar sein. Bei einem modular aufgebauten Multilevel-Stromrichter kann das gewünschte Spannungsniveau durch Reihenschaltung der Module

erreicht werden, wobei eine frei wählbare Anzahl von Zusatzmodulen die gewünschte Redundanz ermöglicht. Der erforderliche Strom wird durch eine Parallelschaltung von IGBT im Modul, von Strängen oder ganzer Stromrichter bereitgestellt. Die Parallelschaltung ganzer Stromrichter, beispielsweise an einem Ort oder an benachbarten AC-Höchstspannungsnetz-Knotenpunkten, wird dabei bevorzugt. Sie führt mit geringem Zusatzaufwand zu einer Redundanzsteigerung.

Kombination Freileitung und Kabelstrecken

Die Kombination von Kabeln und Freileitungen in beliebiger Kombination ist möglich. Durch Verwendung von Vierquadrantsteller-Modulen ist im Gegensatz zu Zweiquadrantsteller-Modulen bei Wiedereinschaltvorgängen eine Begrenzung des Spannungsanstiegs der DC-Spannung pro Zeiteinheit möglich (kabelschonende Fahrweise). Hinsichtlich der Struktur der DC-Übertragungsstrecke wird bei Freileitungstechnik dem symmetrischen Bipol mit ausgeführtem Rückleiter der Vorzug gegeben, da dieser in der Mehrzahl der Fehlerfälle mit eventuell reduzierter Übertragungsleistung weiter betrieben werden soll und kann.

Anschlussflexibilität

Die Anschlusspunkte an die DC-Übertragungsstrecke können direkt an der Strecke liegen oder über elektrische Verbindungen frei wählbarer Länge erreicht werden. Vorwiegend werden die Anschlusspunkte eine Verbindung zum AC-Höchstspannungsnetz herstellen, Anschlusspunkte mit Verbindung zu AC-Netzen niedrigerer Spannungsebene sind ebenfalls in beliebiger Anzahl möglich. Die Sternpunktbehandlung im AC-Netz an den Anschlusspunkten richtet sich dabei weiterhin uneingeschränkt nach den Erfordernissen des jeweiligen AC-Netzes. Das AC-Netz an den jeweiligen Anschlusspunkten kann mit einem anderen deutschen oder europäischen Verbund- und Übertragungsnetz in Verbindung stehen oder aber als Inselnetz betrieben werden. Dieses Inselnetz kann sowohl ein passives Netz sein (ohne Erzeuger elektrischer Energie) als auch ein Netz mit unterschiedlichen Erzeugern elektrischer Energie in beliebiger Anzahl und Kombination (beispielsweise konventionelle Kraftwerke, Solarenergieanlagen, Windkraftanlagen, Biomasse-betriebene Anlagen, Blockheizkraftwerke) unterschiedlicher Leistung.

Entwicklungsfähigkeit und Herstellerunabhängigkeit

Das DC-Multiterminal-System wird allein auf Basis der jeweils lokal verfügbaren Informationen betrieben. Spannungshaltung und Fehlerbeherrschung erfolgen automatisch ohne Wechsel des Regelungskonzepts bzw. der Regelungsstruktur. Damit kann im Nachhinein an praktisch beliebiger Stelle ein weiterer Anschlusspunkt zum AC-Netz eingefügt werden, ohne die Regelungsstruktur oder das Betriebskonzept nennenswert zu verändern. Wird dabei ein neuer DC-Knoten geschaffen, ist eine entsprechende Ausstattung mit einer Trenner- bzw. AC-Leistungsschalter-Ansteuerung sowie den erforderlichen Trennern bzw. AC-Leistungsschaltern notwendig. Bei Anschluss an einen bereits bestehenden DC-Knoten fällt der Aufwand entsprechend geringer aus. Damit entspricht das Betriebs- und Erweiterungskonzept genau den aus AC-Verbundnetzen bekannten Konzepten, allerdings mit Adaption der hinterlegten Regelungsstrukturen und Reaktionsgeschwindigkeiten an die Eigenschaften der verwendeten Leistungselektronik. Hersteller geeigneter Anlagen können diskriminierungsfrei Angebote auch für Erweiterungen abgeben, denn das Betriebs- und Regelungskonzept sichert das problemlose Zusammenspiel von Anlagen aufgrund eines definierten Verhaltens am Netz. Auf der Basis realitätsnaher Simulationen wird die Anlage und ihre Regelung im Hinblick auf die Integration in ein DC-Multiterminal-Netz vor der Inbetriebnahme geprüft und zertifiziert. .

Das beschriebene Konzept würde auch eine Verbindung zu einem weiteren DC-Multiterminal-System, beispielsweise über einen DC-DC-Steller, erlauben. Ebenso wären vermaschte DC-Netze mit integrierten Elementen zur Lastflusssteuerung, beispielsweise durch DC-DC-Steller, eine denkbare Option. Eine hohe Verfügbarkeit großräumiger Strukturen würde jedoch eine extrem schnelle Trennung der Systeme im Fehlerfall, z.B. bei Kurzschluss, erfordern – denn die bei konventionellen Verbundnetzen gegebene Entkopplung durch die bei den hohen Kurzschlussströmen an den Netzimpedanzen entstehenden Spannungen ist wegen der äußerst geringen Überstromfähigkeit der Stromrichter bei DC-Netzen nicht gegeben. Die technische Realisierbarkeit eines häufig schaltbaren DC-Schaltelements für eine solche extrem schnelle Trennung wird von den Autoren zurzeit nicht als aussichtsreich eingeschätzt. Daher wird aus heutiger Sicht eine Netzstruktur ohne DC-seitige Vermaschung zumindest für weiträumige Energietransite als zielführend und zukunftsweisend angesehen. Mehrere DC-Multiterminal-Systeme sind AC-seitig über das vorhandene Verbund- und Übertragungsnetz zu verknüpfen. So lässt sich ein ausbaufähiges DC-Multiterminal-Übertragungsnetz auf Basis von Hochleistungs-AC-Knoten realisieren.

Aspekte des Stromrichterschutzes

Stromrichter bieten über ihren Dimensionierungsstrom hinaus praktisch keine Reserve – und werden bei Überstrom innerhalb kurzer Zeiten zerstört, die deutlich unterhalb üblicher Schalterreaktionszeiten liegen. In Ergänzung zu einem DC-Leistungsschalter werden daher aus heutiger Sicht stets zusätzliche Rettungsmaßnahmen im oder am Stromrichter benötigt, beispielsweise durch im Fehlerfall zu zündende Zusatzthyristoren. Diese führen zur Abschaltung des Stromrichters. Zudem nehmen solche Zusatzthyristoren die Abschaltenergie üblicherweise adiabatisch auf, sodass in der Regel nur eine sehr begrenzte Anzahl von Abschaltungen innerhalb einer Zeitspanne von einigen Minuten möglich ist. Eine schnelle Wiederinbetriebnahme nach Fehlerklärung ist somit nicht zu erwarten. Bei rein kabelbasierten Anlagen ist dies akzeptabel, da Fehler im DC-Kreis unwahrscheinlich und überdies dann eher gravierend sind und eine sofortige Wiederschaltung ohnehin nicht zulassen. Bei der hier vorgesehenen Topologie mit hohem Freileitungsanteil sind jedoch mehrfache, aufeinander folgende vorübergehende Kurzschlüsse infolge atmosphärischer Überspannungen mit Häufung bei Gewittern im Freileitungsumfeld zu beherrschen. Eine sofortige Verfügbarkeit nach Fehlerklärung ist daher unerlässlich.

4 Stand der Technik und Entwicklungsbedarf

Die heute am Markt käuflichen HGÜ-Systeme in VSC-Technik gehen in der Regel von einer VPE- Vollverkabelung der DC-Übertragungsstrecke aus und sind hinsichtlich ihrer Leistung auf das Übertragungsvermögen der Kabel abgestimmt. Dies führt heute zu einer max. Leistung von ca. 1300 MW pro System. Bis heute wurde nur eine einzige Hochspannungs-DC-Übertragungsstrecke in VSC-Technik mit einem modular aufgebautem Multilevelumrichter realisiert (Transbay Cable, Kalifornien, 400 MW, ± 200 kV, 1QS-Technologie). Zwischenzeitlich wird jedoch von allen namhaften Herstellern das Multilevel-Konzept favorisiert.

Um die zukünftigen Energietransite mit möglichst geringem Trassenbedarf realisieren und auch die Stromtragfähigkeit von Freileitungen nutzen zu können, ist eine freie Skalierbarkeit der Leistung essentiell. Die Parallelschaltung von IGBT-Modulen ist prinzipiell möglich, diejenige von Strängen oder ganzen Stromrichtern auf der DC- und AC-Seite bedarf zurzeit

nach Kenntnis der Autoren noch eines gewissen Entwicklungsaufwands. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dieser im Rahmen des hier betrachteten Zeithorizonts geleistet werden kann, da keine technologischen Gründe bekannt sind, die dem entgegenstehen. Diese Einschätzung beruht u.a. auf der Tatsache, dass solche Parallelschaltungen aus dem Bereich konventioneller Stromrichter bekannt sind.

Im Bereich der Teilverkabelung ist die Parallelschaltung von Kabeln als mögliche Lösung zu sehen, um eine adäquate Stromtragfähigkeit bereit zu stellen. Die Anpassung der DC-Spannung an den mit der verfügbaren Kabeltechnologie maximalen projektierbaren Wert ist durch eine geeignete Anzahl von Modulen in Reihenschaltung problemlos möglich. Somit ist die Weiterentwicklung der VPE-Kabeltechnologie zu höheren Maximalspannungen weiter zu forcieren. Auf kurzen Abschnitten wäre auch der Einsatz von Mineralisolierten (MI) Kabeln oder einer gasisolierten DC-Leitung (DC-GIL) denkbar.

Mittel- bis langfristig sollte die Technologie dahingehend weiterentwickelt werden, dass HGÜ-Übertragungsleistungen von mindestens 4 GW pro System möglich sind.

Die Module des Stromrichters auch in Vierquadrantsteller-Technologie sind – einschließlich der zugehörigen Steuerungen, Regelungssysteme sowie Nebenaggregate – inzwischen im kommerziellen Einsatz (z.B. in Blindleistungskompensatoren). Der Einsatz von Vierquadrantsteller-Modulen stellt deshalb prinzipiell keine technologische Herausforderung da, bedingt aber ggf. die Anpassung von Regelkonzepten.

5 Zusammenfassung

Das vorgestellte Konzept ermöglicht die Projektierung und Realisierung eines zukunftsweisenden DC-Multiterminal-Netzes auf Stromrichterbasis. Mit diesem kann elektrische Energie über weite Entfernungen transportiert werden und es ermöglicht den Anschluss an das bestehende AC-Netz an frei wählbaren Stellen. Zur Übertragung der Energie können Freileitungen und Kabel bedarfsgerecht kombiniert werden.

In Zusammenspiel mit einem geeigneten Regelungskonzept ist eine native Beherrschung von Fehlerzuständen auf der AC- und auf der DC-Seite sichergestellt. DC-Knoten mit autonomer, automatischer Fehlerdetektion trennen fehlerhafte Segmente während eines aus dem Betriebs- und Regelungskonzept folgenden Zustands mit sehr reduziertem Strom. Dieses Strom-Null-Intervall wird nach Klärung des Fehlers automatisch verlassen. Hierbei wird die normale Regelung beibehalten (d.h. ohne Wechsel von Regelstruktur oder -parametern). Die Spannungssteilheit ist definierbar – der Übergang zwischen gestörtem und ungestörtem Betrieb ist somit kontinuierlich. Diese Fähigkeit wird mit Hilfe von Stromrichtern in modularer Multilevel-Technologie auf Basis von bipolaren Modulen (z.B. auf Vierquadrantsteller-Basis) erreicht.

Eine Zertifizierung von Anlage und Regelung durch realitätsnahe Simulation vor der Inbetriebnahme sichert sowohl die genannten Eigenschaften als auch in Folge den diskriminierungsfreien Marktzugang für alle Hersteller.

Damit entsprechen Eigenschaften und Verhalten weitestgehend den vom AC-Verbundnetz her bekannten – allerdings angepasst an die Eigenschaften der zum Einsatz kommenden Stromrichter. Das so konzipierte DC-Multiterminal-Netz bietet eine Basis für die Bewältigung der Herausforderungen an die Übertragungsnetze in Deutschland und Europa, die auf Grund der Veränderungen im Bereich der elektrische Energieversorgung zu erwarten sind.