

Energietechnische Gesellschaft im VDE

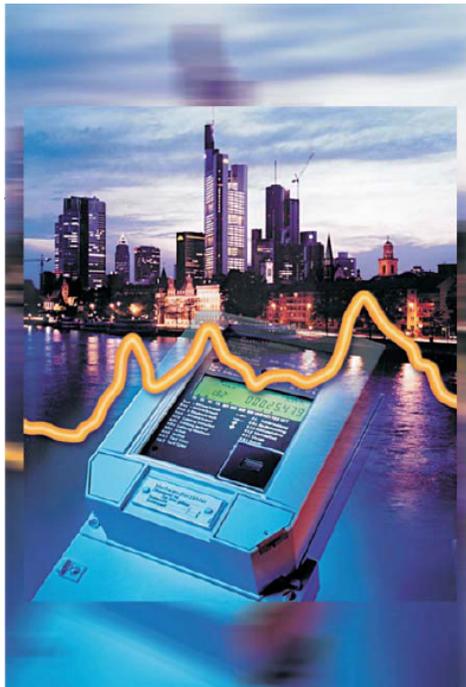
Dr. Thomas Benz
Geschäftsführer ETG



Frühjahrssitzung des AK Energie in der DPG

Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG)

Wissensplattform und Experten-Netzwerk für die Energietechnik



ETG

Energietechnische Gesellschaft im VDE

Die Ziele

- Interessenvertretung der elektrischen Energiewirtschaft
- Partner für Politik, Gesellschaft und Experten
- Katalysator zur Weiterentwicklung neuer Technologien
- Fachwissenvermittlung
- Nachwuchsförderung

Die Arbeitsgebiete

Elektrische Energieversorgung	Anwendung elektrischer Energie	Querschnittstechnologien
Zentrale u. dezentrale Erzeugung elektrischer Energie	Elektrische Maschinen und Antriebe, Mechatronik	Leistungselektronik
Übertragung und Verteilung elektrischer Energie	Bahnen mit elektrischen Antrieben	Werkstoffe, Isoliertechnik, Diagnostik
Energiewirtschaft		Kontaktverhalten und Schalten

Die Wege

- Wissenspool durch Fachleute, technisch-wissenschaftliche Studien und Reports
- Internationale und interdisziplinäre Zusammenarbeit von Industrie, Energieversorgung, Wissenschaft und Anwendung
- Tagungen, Workshops, Seminare, Round Tables, Fachvorträge
- Weiterbildung

Internationale Kontakte

- EUREL
- CIGRE
- CIRED
- IEEE
- EPE

Die Zahlen

- Gegründet 1974
- 12.500 Mitglieder
- 300 ehrenamtliche Mitarbeiter

Wissensplattform und Experten-Netzwerk für die Energietechnik

Unsere Studien, Analysen und Positionspapiere



- Energiebereitstellung
 - Energienetze
 - Energiespeicher
- Energieanwendung
 - Energiepolitik
 - Energiemarkt

Zahlen in Klammern:
 Jahr der Veröffentlichung
 Punktiert:
 Aktive Task Force

Alle Publikationen
 können über den Link
www.vde.com/etgstudien
 bezogen werden
 (pdf für VDE-Mitglieder
 kostenlos).

April 2017

Wissensplattform und Experten-Netzwerk für die Energietechnik

Unsere Veranstaltungen 2017

25. Januar, Kassel
Fachtagung

Systemdesign Stromnetze der Zukunft

- ETG Fachbereich V2
Übertragung und Verteilung

16. – 17. Februar, Frankfurt am Main
Workshop

Hochspannungsfreileitungen

Isolatoren und Armaturen:
Materialwahl, Auslegung,
Betriebserfahrungen

- ETG Fachbereich Q2 Werkstoffe,
Isoliertechnik und Diagnostik

21. – 22. Februar, Aschaffenburg
Fachtagung

STE 2017

Sternpunktbehandlung in Netzen
bis 110 kV D-A-CH

- ETG Fachausschuss V2.3 Schutz- und
Automatisierungstechnik
- Informationstechnische Gesellschaft
im VDE (ITG)

21. – 22. März, Frankfurt am Main
Fachtagung

Elektrische Fahrzeugarchitektur 2017

Intelligenter Elektrischer ÖPNV 4.0

- ETG Fachbereich A2
Bahnen mit elektrischen Antrieben

6. – 7. April, Bad Nauheim
Fachtagung

Bauelemente der Leistungselektronik und ihre Anwendungen 2017

- ETG Fachbereich Q1 Leistungselektronik
und Systemintegration
- European Center for Power Electronics
(ECPE)

24. – 28. April, Hannover
Forum

Life Needs Power

- ETG Geschäftsführung
- Zentralverband Elektrotechnik- und
Elektronikindustrie (ZVEI)
- Bundesverband der Energie- und
Wasserwirtschaft (BDEW)
- Zukunftsforum

11. Mai, Nürnberg
Workshop

ETG-FNN Workshop Schutz- und Automatisierungstechnik in aktiven Verteilnetzen

- ETG Fachausschuss V2.3 Schutz- und
Automatisierungstechnik
- Forum Netztechnik Netzbetrieb im VDE
(FNN)
- Informationstechnische Gesellschaft im
VDE (ITG)

15. – 16. Mai, Berlin
Fachtagung

3. Dialogplattform Power-to-Heat Sektorkopplung von Strom, Wärme und Kälte

- ETG Geschäftsführung
- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

26. – 27. September 2017, München
Fachtagung

12. ETG/GMA-Fachtagung Netz- regelung und Systemführung

- ETG/GMA Fachausschuss V2.1 /
FA 7.16

27. – 28. September, Saarbrücken
Fachtagung

IKMT 2017 Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik GMM/ETG-FT

- ETG Fachbereich A1 Elektrische Maschi-
nen und Antriebe, Mechatronik
- VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik,
Mikro- u. Feinwerktech. (GMM)

22. – 23. November 2017, Karlsruhe
Fachtagung

Antriebssysteme 2017

- ETG Fachbereich A1 Elektrische Maschi-
nen und Antriebe, Mechatronik
- VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozess-
gestaltung (VDI-GPP)

28. – 29. November, Bonn
Kongress

ETG Kongress 2017 – Die Energiewende

- Blaupausen für das neue
Energiezeitalter
- ETG Vorstand

INTERNATIONALER
ETG CONGRESS 2017
DIE ENERGIEWENDE

SAVE THE DATE

Die Energiewende geht weiter

28. – 29. November 2017
Bonn
www.etg-congress.com #ETG2017

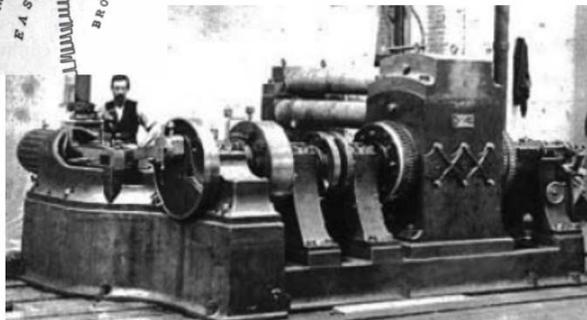
CIRED Cigré OVE electro suisse VDE

Gleichspannung für das Verteilnetz: Entwicklungen und Optionen

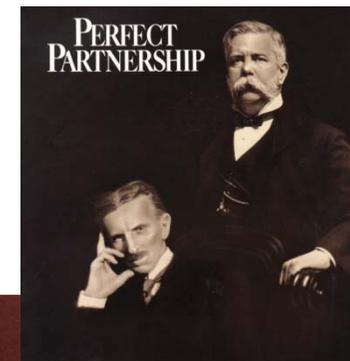
Dr. Thomas Benz
Geschäftsführer ETG
Bad Honnef, 07.04.2017

Die Elektrifizierung begann mit einem Wettstreit: Gleich- vs. Wechselstrom oder Edison vs. Westinghouse

- **Edison** (1882) Pearl Street, Manhattan, New York
 - Lokale Gleichstromversorgung für die Beleuchtung
 - 6 Dynamos (Siemens) mit einer Leistung von je 100 kW



- **Tesla und Westinghouse**
 - Entwicklung eines Wechselstromsystems in den 1880-ern
 - Expo in Chicago 1893 mit 200.000 Glühbirnen



Quelle: Stieneker: Potential of DC Distribution Systems, 21.04.2016 Bilder: IEEE Power & Energy Magazine

Drehstromübertragung und -verteilung – Bis heute das System der Wahl für Europa



Bilder: ENTSO-E (oben), ABB (unten)

Vorteile des Drehstroms:

- Transformierbarkeit
- Einfache (und kostengünstige) elektro-mechanische Energieumwandlung
- Einfache Stromunterbrechung
- Frequenz als systemweite Führungsgröße
- Vermaschbarkeit

Grenzen der Drehstromübertragung

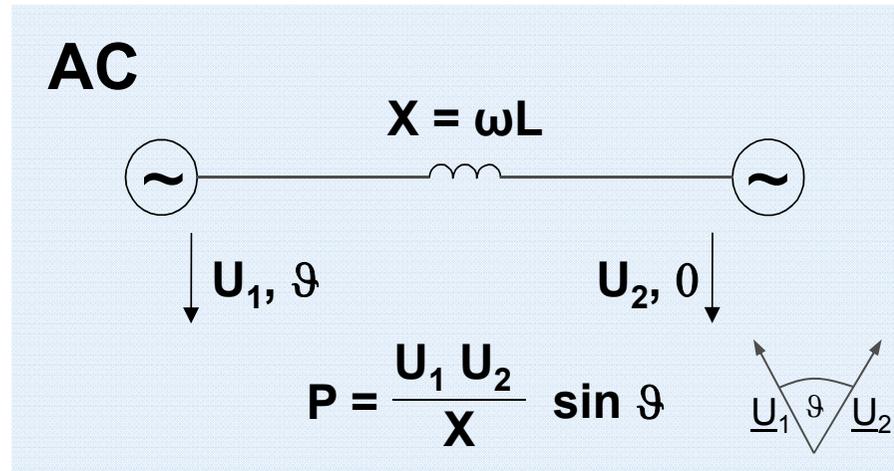


Bilder: ABB

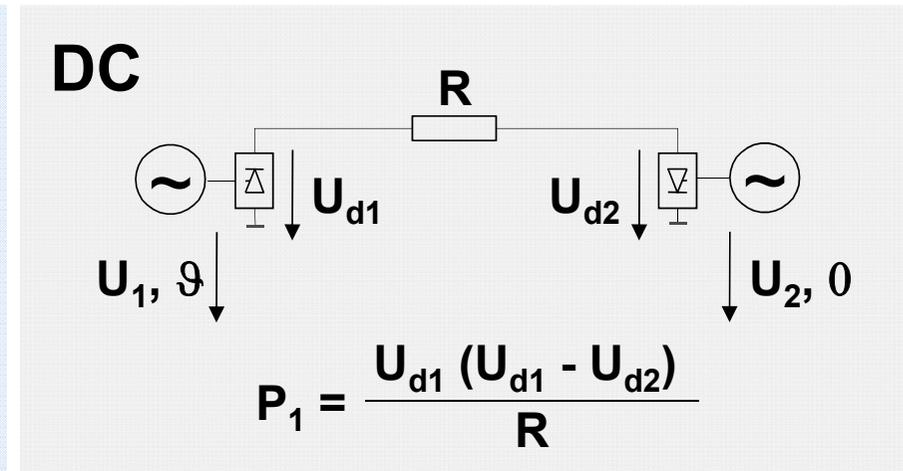
- Stromübertragung über lange Strecken
 - Verluste (Wirtschaftlichkeit)
 - Blindleistungsbedarf (Kompensation
⇒ Wirtschaftlichkeit)
 - Stabilität
- Drehstromkabel bereits bei Entfernungen < 100 km wegen hohem Blindleistungsbedarf technisch schwierig

Drehstrom- versus Gleichstromübertragung

Die wesentlichsten Unterschiede



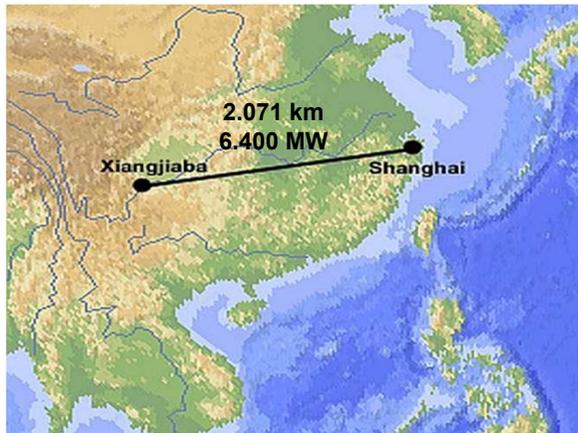
- Blindleistung
- Leistungsübertragung abhängig vom Leitungswinkel ϑ
- Stabilität der Wirkleistungsübertragung abhängig vom Leitungswinkel
- Kurzschlussstrombegrenzung durch Reaktanzen
- Massenträgheit wirksam
- Skin-Effekt



- Keine Blindleistung \Rightarrow Kabel über große Entfernungen einsetzbar
- Leistungsübertragung abhängig von Spannungsdifferenz
- Stabilität unabhängig vom Leitungswinkel (keine Stabilitätsprobleme)
- Kurzschlussstrombegrenzung durch ohmsche Widerstände
- Leistungsflussregelung
- Kein Skin-Effekt

Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)

Anwendungsgebiete



Bilder: ABB

- Klassische Anwendungsgebiete
 - Übertragung großer Leistungen über weite Strecken
 - Asynchrone Verbindung von Drehstromnetzen (auch als HGÜ-Kurzkupplung)
 - Seekabelverbindungen
- Neue Anwendungsgebiete
 - Anbindung von Offshore-Windparks (Schwarzstartfähigkeit)
 - Verstärkung und Stabilisierung bestehender Drehstromnetze durch parallelen Betrieb von HGÜ-Systemen
 - Aufbau von überlagerten HGÜ-Netzen (HGÜ-Overlay-Netze)

Anwendungsfelder für Gleichspannung in der Verteilung

Etablierte Anwendungsfelder

- Industrieniederspannungsverteilungen / Industrielle DC-Netze
- Niederspannungsverteilungen für Rechenzentren
- Telekommunikationsanlagen
- Gleichspannungs-Bahnnetze
- Elektrische Bordnetze auf Schiffen
- Flugzeugbordnetze
- Automobilbordnetze

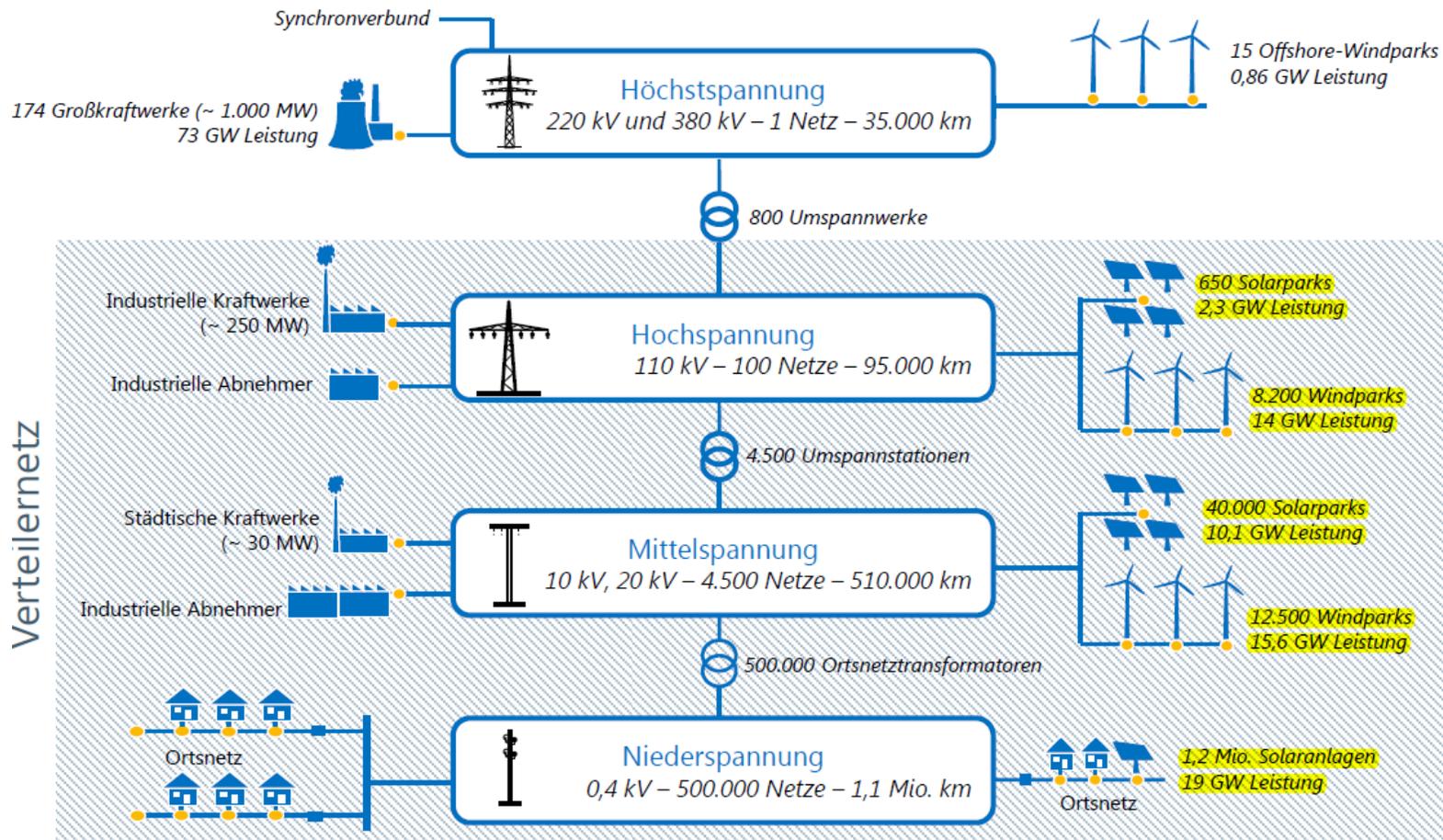
Neu

- DC-Einspeisung aus Erneuerbaren Energiequellen (speziell Wind und Solar)
- Vermehrt DC-Anwendungen in Gebäuden
- DC-Versorgung der Ladeinfrastruktur für Elektromobilität

Quelle: ETG Task Force „Gleichspannung in der elektrischen Energieverteilung“

Die Energiewende ist eine neue Herausforderung an die Verteilnetze

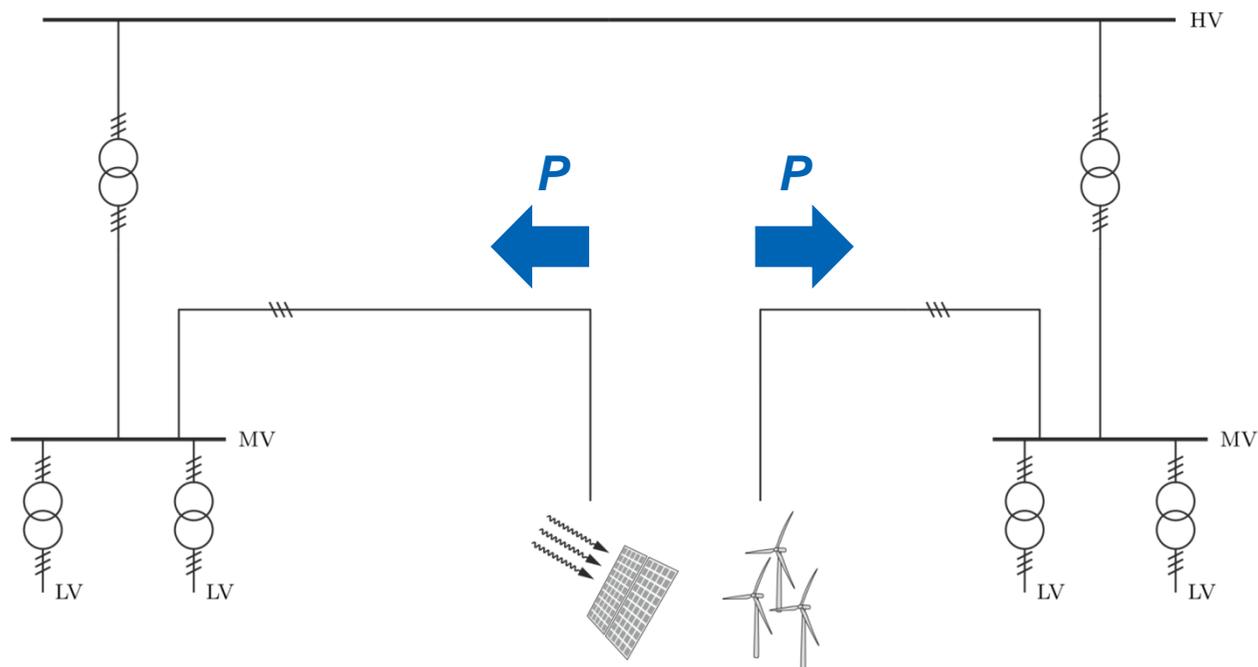
90% aller EE-Anlagen sind an die Verteilernetze angeschlossen



Quelle: BMWi-Verteilernetzstudie, September 2014

Integration Erneuerbarer Energiequellen in die Verteilnetze

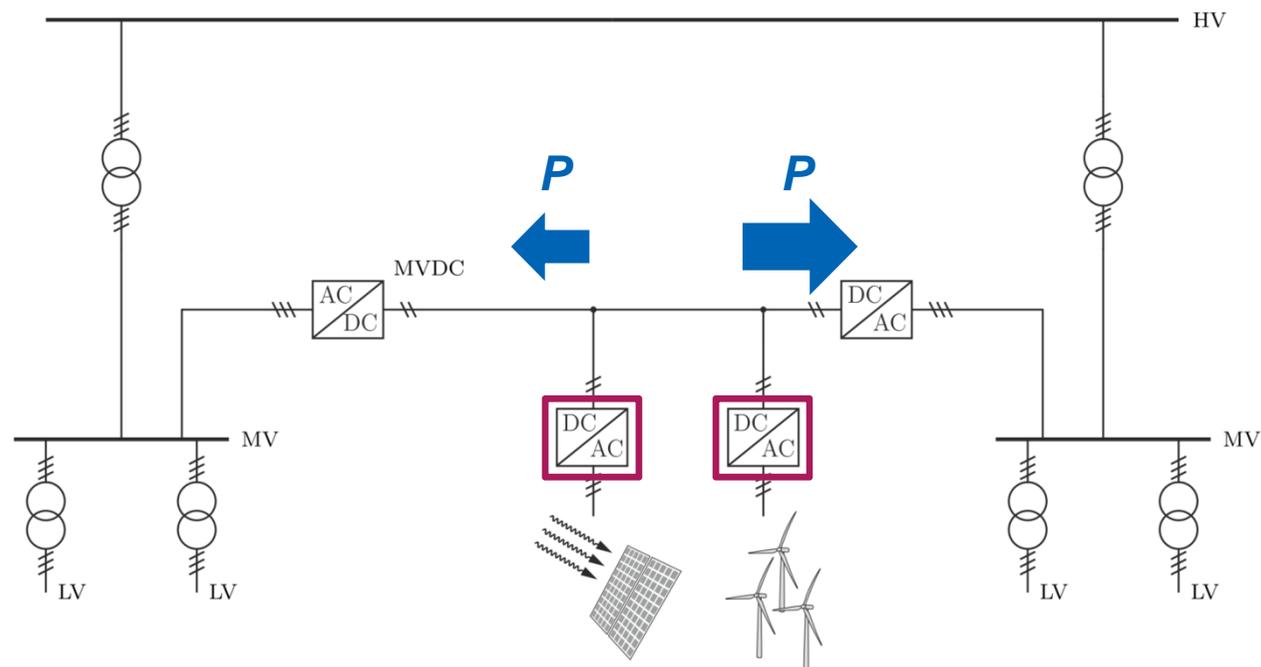
Wirkleistungseinspeisung aus Erneuerbaren Energiequellen



Quelle: Stieneker: Potential of DC Distribution Systems, 21.04.2016

Kombination von AC- und DC-Verteilnetzen

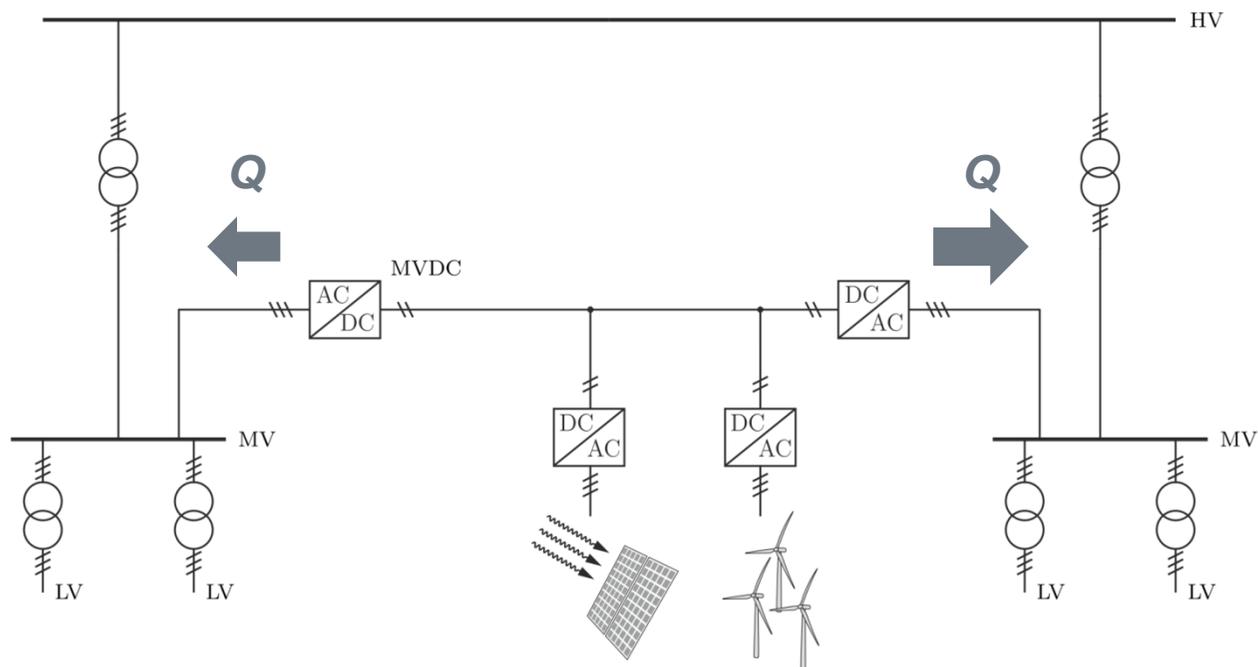
Leistungsflusssteuerung



Quelle: Stieneker: Potential of DC Distribution Systems, 21.04.2016

Kombination von AC- und DC-Verteilnetzen

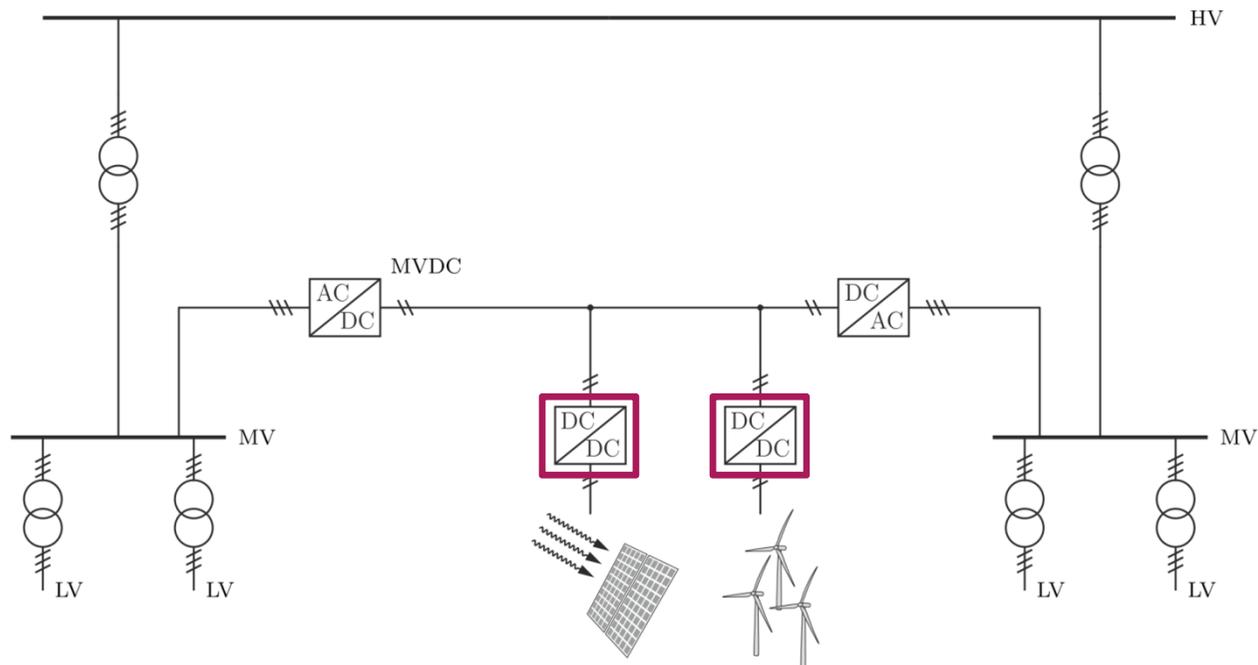
Blindleistungsbereitstellung für das Drehstromnetz



Quelle: Stieneker: Potential of DC Distribution Systems, 21.04.2016

Kombination von AC- und DC-Verteilnetzen

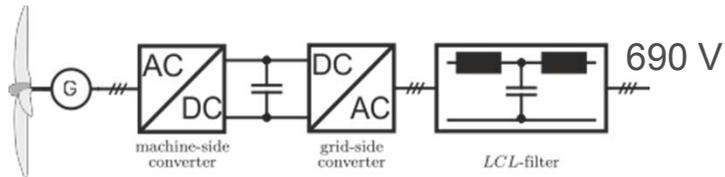
DC/DC-Wandlung ist effizienter als AC/DC-Wandlung



Quelle: Stieneker: Potential of DC Distribution Systems, 21.04.2016

Offshore Windparks

Aktuelle Ausführung: AC-Einsammelnetz



33 kV



33 kV /
150 kV



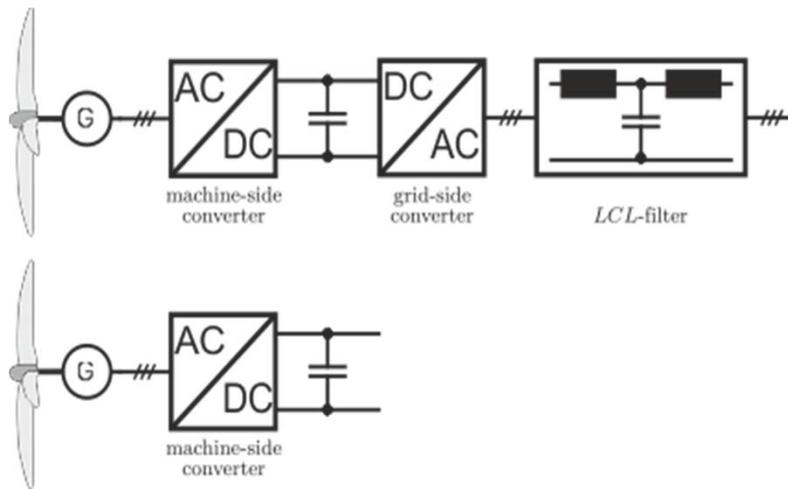
150 kV / $\pm 320 \text{ kV}_{\text{DC}}$

- Umrichterausgangsspannung:
z.B. 690 V
 - Interne DC-Spannung: $\sim 1,2 \text{ kV}$
- Windturbine Hochsetz-Transformator: 690 V / 33 kV
- Windparktransformator: 33 / 150 kV
- HVDC-Übertragung: $\pm 320 \text{ kV}$
- Wandlungsstufen: AC \rightarrow DC \rightarrow AC
 \rightarrow DC

Quelle: De Doncker; Bachmann: Interfacing HVDC Grids with MVDC Grids in the Future Electrical Systems, 16.09.2016 Bilder: Siemens

Offshore Windparks

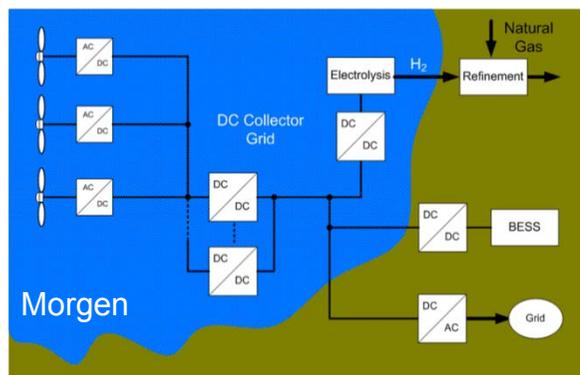
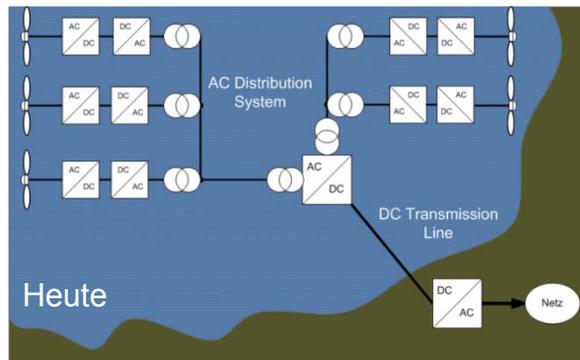
Motivation für ein DC-Einsammelnetz



- DC-Netzanschluss
 - ~1,5 – 2 % geringere Verluste
 - Weniger Komponenten
 - Höhere Zuverlässigkeit
 - Geringere Investitionskosten
- Gleiche Vorteile ergeben sich auch für
 - Photovoltaikanlagen
 - Batteriespeichersysteme

Quelle: De Doncker; Bachmann: Interfacing HVDC Grids with MVDC Grids in the Future Electrical Systems, 16.09.2016

MVDC-Einsammelnetze für Offshore-Windparks



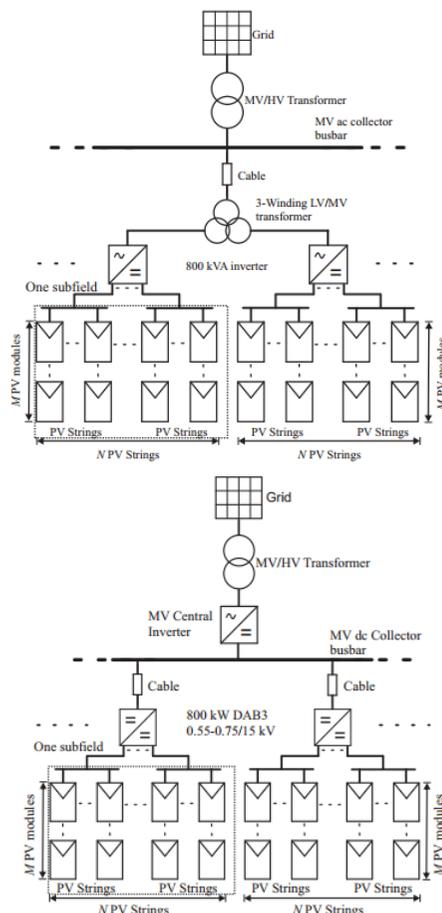
- Windturbine ist über Gleichspannungszwischenkreis an DC/DC-Wandler angeschlossen
- DC/DC-Wandler setzt Spannung hoch auf Übertragungsspannung (HVDC)
- HVDC-Konverter an Land ist als Wechselrichter ausgeführt

Vorteile:

- Höhere Effizienz des Gesamtsystems
- Geringere Lebenszykluskosten
- Geringere Kosten durch
 - Kleinere Offshore-Plattform(en)
 - Geringere Investitionskosten
 - Verbesserte Zuverlässigkeit

Quelle: De Doncker; Bachmann: Interfacing HVDC Grids with MVDC Grids in the Future Electrical Systems, 16.09.2016

MVDC-Einsammelnetze für große Solarparks



Konventioneller Solarparkanschluss

- Anschluss an das HS-Netz über MS/HS-Transformator
- PV-Module sind über Wechselrichter und NS/MS-Transformator (Dreiwickler) an MS-Sammelschiene angeschlossen

DC-Kollektornetz

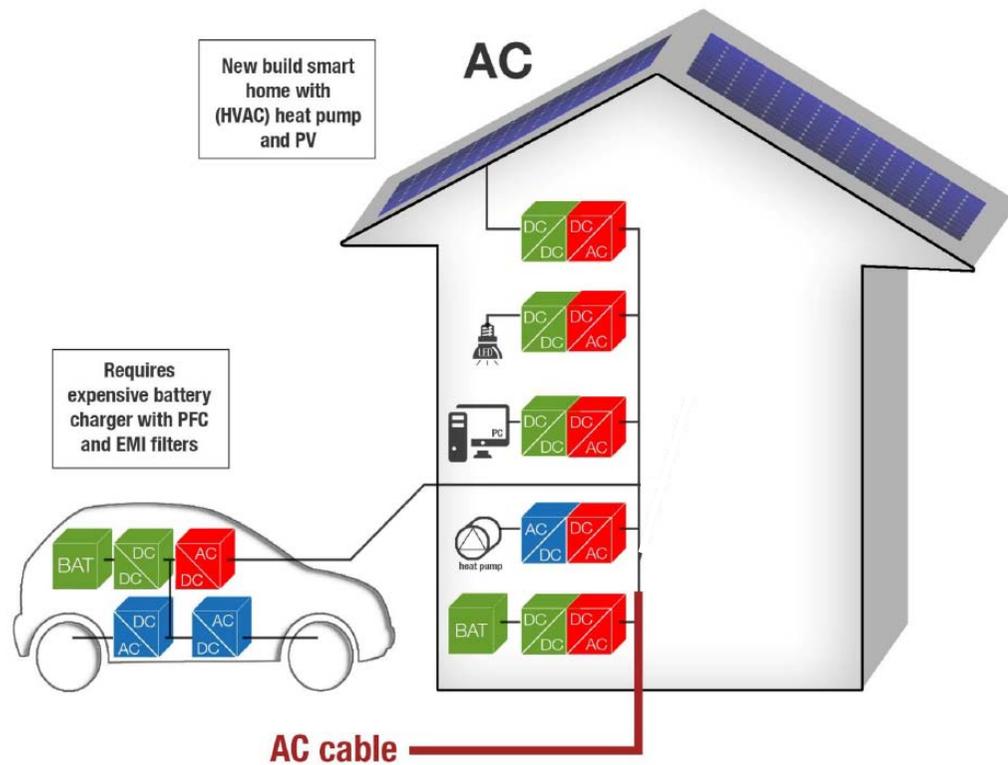
- Anschluss an das HS-Netz zentralen MS-Wechselrichter und MS/HS-Transformator
- PV-Module sind über DC/DC-Wandler an MS-Sammelschiene angeschlossen
- Vorteile: höherer Wirkungsgrad und geringere Kosten

Quelle: ETG Task Force „Gleichspannung in der elektrischen Energieverteilung“

Abkürzungen: NS: Niederspannung, MS: Mittelspannung, HS: Hochspannung

DC-Anwendungen in Gebäuden

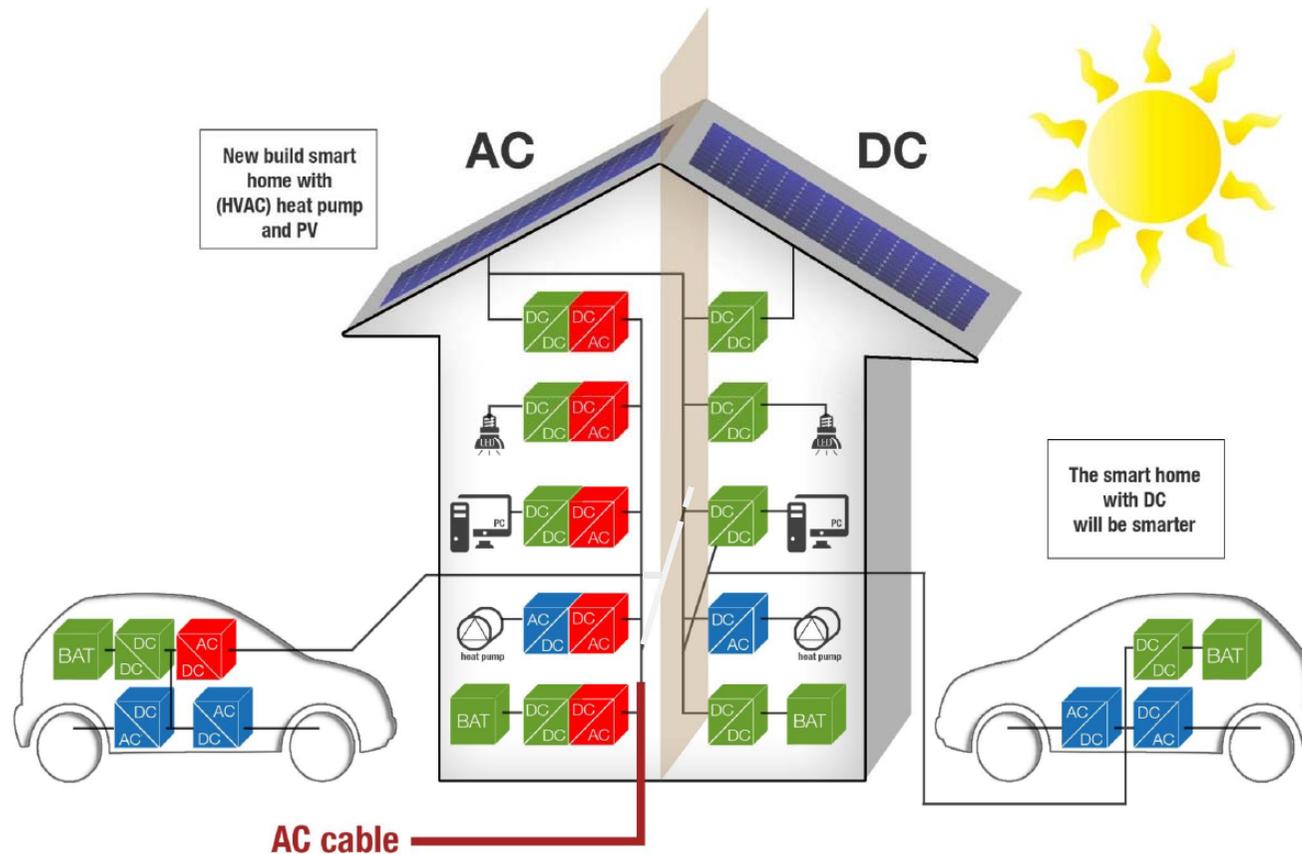
Smart Home – Heute noch klassisch an das AC-Niederspannungsnetz angeschlossen



Quelle: Stieneker: Potential of DC Distribution Systems, 21.04.2016

DC-Anwendungen in Gebäuden

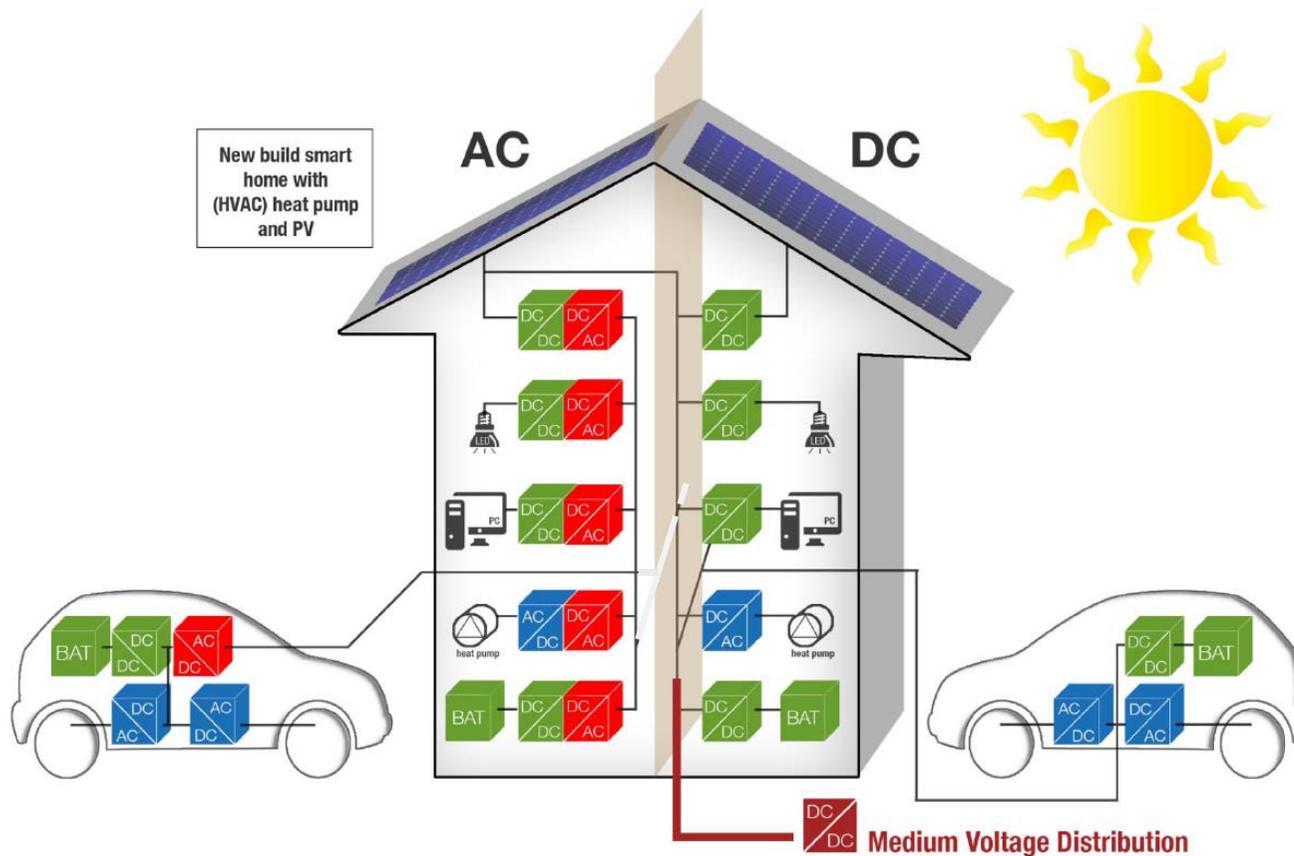
Smart Home mit LVDC-Verteilnetz im Gebäude von morgen



Quelle: Stieneker: Potential of DC Distribution Systems, 21.04.2016

DC-Anwendungen in Gebäuden

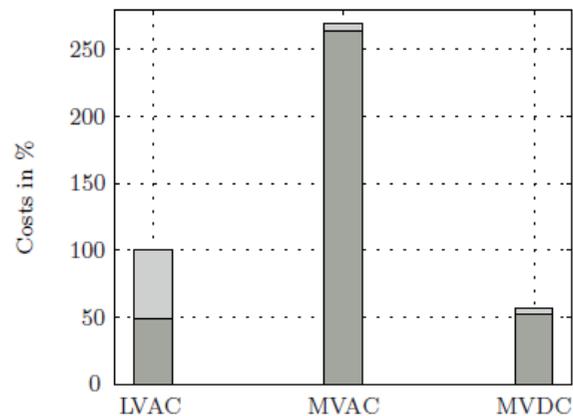
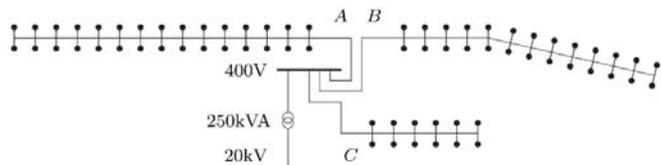
Und übermorgen? – Smart Home an ein MVDC-Verteilnetz angeschlossen



Quelle: Stieneker: Potential of DC Distribution Systems, 21.04.2016

Gleichspannung für das Verteilnetz

Ein Kostenvergleich



- Investitionskosten
- Betriebskosten

Standardszenario

- 400 V AC-Verteilnetz
- Vierleiter-Kabelnetz
- LVAC-Versorgung der Haushalte (4 Personen)
- 30 kW Anschlussleistung je Haushalt

MVAC-Szenario

- 6,6 kV AC-Verteilnetz
- Vierleiter-Kabelnetz
- LVAC-Versorgung der Haushalte (4 Personen)
- 30 kW Anschlussleistung je Haushalt

MVDC-Szenario

- ± 5 kV DC-Verteilnetz
- Zweileiter-Kabelnetz
- LVDC-Versorgung der Haushalte (4 Personen)
- 5 kW Anschlussleistung je Haushalt

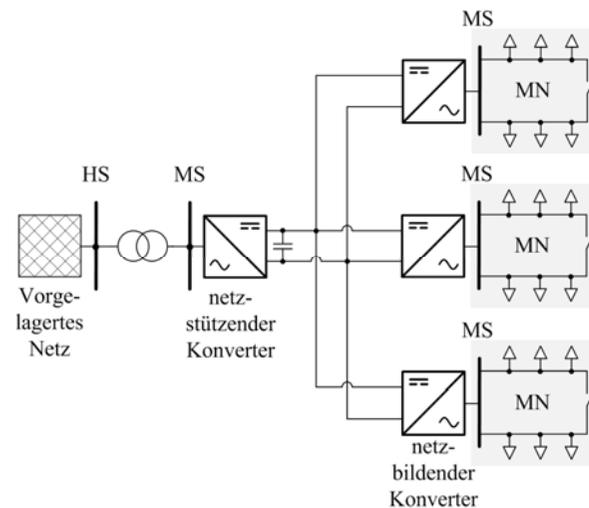
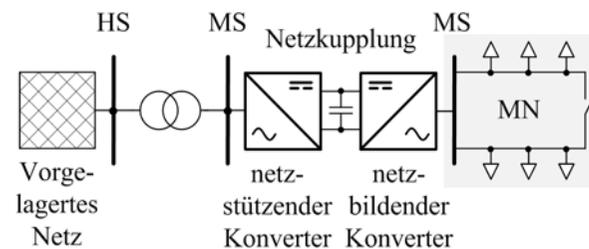
Quelle: Stieneker; De Doncker: MVDC Grid – Efficient Link for Energy Collection and Distribution, 03.11.2016

Abkürzungen: LV: Low Voltage, MV: Medium Voltage

Mögliche neue Anwendungsfelder

MVDC-Kurzkupplung

Beispiel



Vorteile

- Übertragung von Wirkleistung mit frei einstellbarem Leistungsfluss
- Entkopplung von Netzen
 - Unabhängige Regelung der Blindleistung und damit der Spannung für beide Netze
 - Unabhängige Sicherstellung der Spannungsqualität in beiden Netzen
 - Symmetrierung von Schiefasten

Mögliche Anwendungsfälle

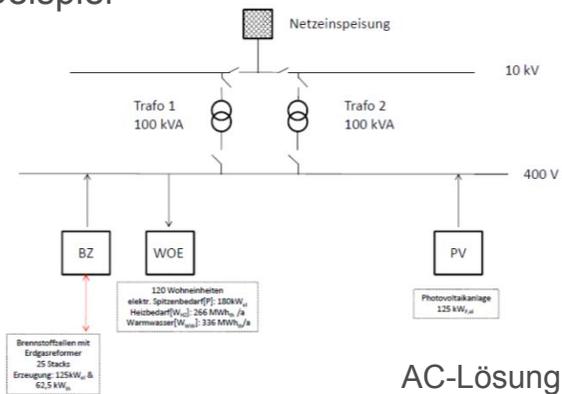
- Versorgung von Sonderkunden mit hohen Qualitätsanforderungen
- Gewollter Inselbetrieb (bei ausreichender Erzeugung im Inselnetz)
- Reduktion von Netzausbau
- ...

Quelle: Prieb; Schocke: ETG Task Force „Gleichspannung in der elektrischen Energieverteilung“

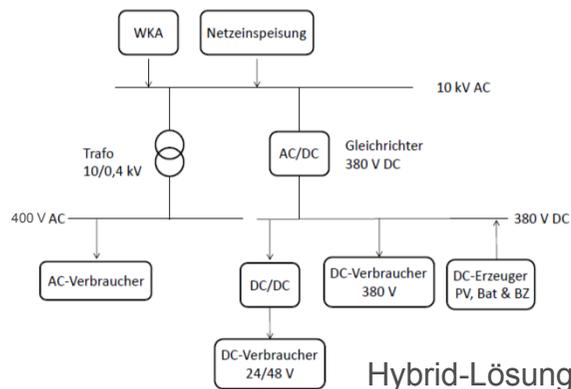
Mögliche neue Anwendungsfelder

Parallele AC/DC-Versorgungsstrukturen (Hybridnetze)

Beispiel



AC-Lösung



Hybrid-Lösung

Vorteile:

- Direktversorgung von Gleichstromverbrauchern wie LED-Beleuchtung, Elektromobile, Pedelecs, IT-Anlagen, PCs, ...
- Anschluss von PV-Anlage, Batterie-speicher und Brennstoffzelle über DC/DC-Wandler anstelle von Wechselrichtern (Effizienz)

- Geringere Verluste

Nachteile:

- Zusätzliches Niederspannungskabel

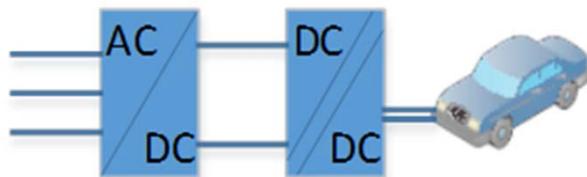
Quelle: Rethmeier: ETG Task Force „Gleichspannung in der elektrischen Energieverteilung“

Mögliche neue Anwendungsfelder

Gleichstromnetz zur Versorgung von Ladesäulen für Elektromobilität



Standard Gleichstrom-Schnellladetopologie



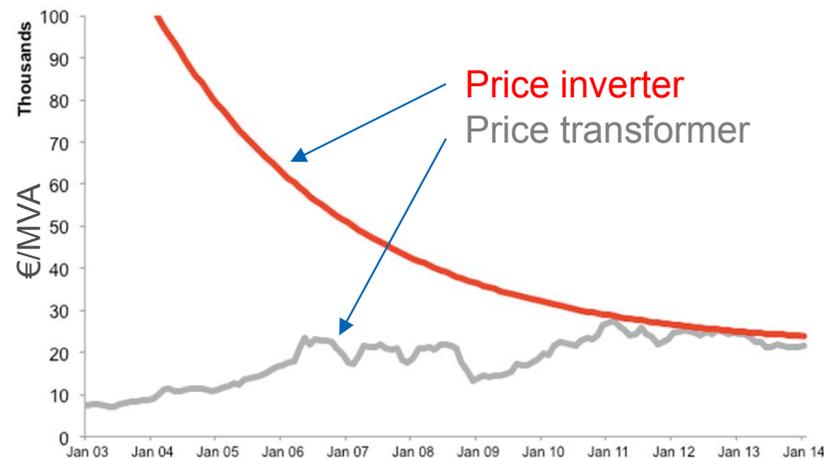
Vergleich Versorgung aus DC-Netz gegenüber Versorgung aus AC-Netz

- + kompakterer DC/DC-Wandler anstelle von AC/DC-Wandlern
- + Einfachere Regelung, da keine Synchronisation mit AC-Netz sowie keine Oberwellenspezifikationen
- + höherer Wirkungsgrad
- Stabilität am Gleichstromnetz wenig erforscht
- AC-Front-End könnte netzstützend eingreifen (Blindleistungsbereitstellung)
- Schutz im Fehlerfall

Quellen: Biskoping: ETG Task Force „Gleichspannung in der elektrischen Energieverteilung“

Fallende Preise für Silizium sind Treiber für den vermehrten Einsatz von Leistungselektronik in der Energieversorgung

Trends

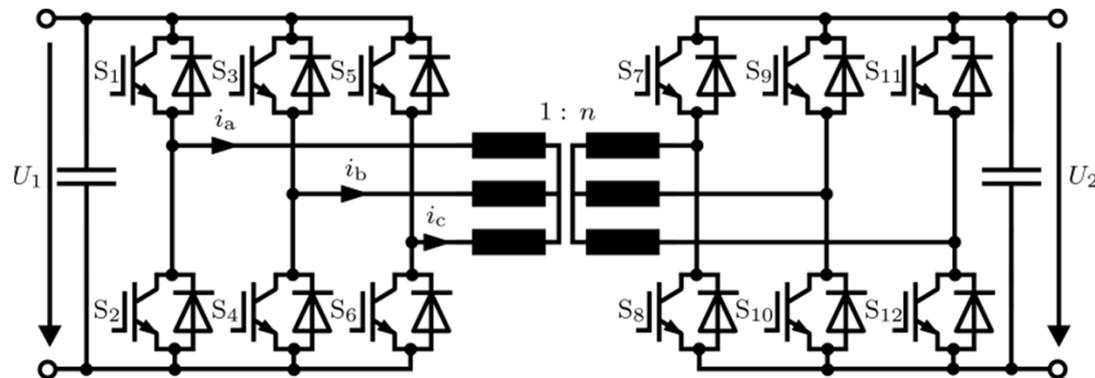


- Stetig steigende Preise für Metalle (Cu, Al, Si-Stahl)
- Fallende Preise für Silizium wegen
 - steigender Produktionsmengen
 - neuen Generationen von Leistungshalbleitern
 - neuer Materialien
 - höheren Schaltfrequenzen und Spannungsebenen
- Wechselrichterkosten von 500 €/kVA auf 25 €/kVA in letzten 25 Jahren, Prognose: 5 €/kVA im Jahr 2020
- **2013:** Wechselrichterkosten gleich auf mit 50-Hz-Transformatorkosten bei ~20 €/kVA

Quelle: De Doncker: Future Urban Electrical Energy Supply Systems, 19.01.2016

Mittelspannungs-DC/DC-Wandler

Elektronischer Transformator – „Edison’s Missing Link“



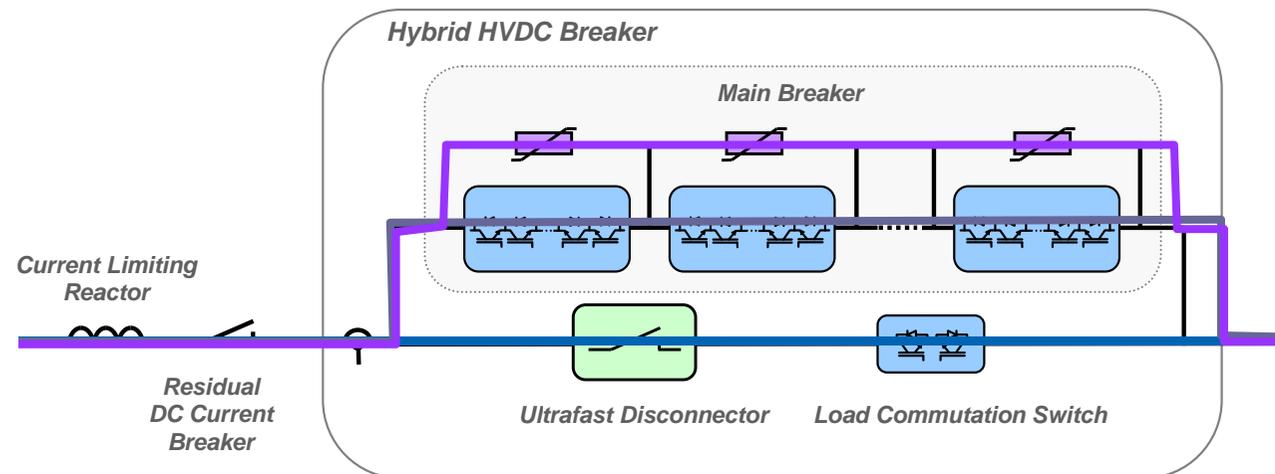
- 5 – 20 MW Leistung pro Einheit, skalierbar bis zu einigen GW
- Hohe Effizienz (bis zu 99,2 %)
- Mittelfrequenztransformator (500-2.000 Hz)
 - Gewichtsersparnis
 - Mit SiC-Bauelementen > 10 kHz

Quelle: De Doncker; Bachmann: Interfacing HVDC Grids with MVDC Grids in the Future Electrical Systems, 16.09.2016

Hybrider DC-Leistungsschalter

Schnelles Schalten im Millisekundenbereich

Betriebsstrom bis
2 kA
 Betriebsspannung
bis 320 kV_{DC}
 Abschaltzeit < 5 ms
 Abschaltstrom bis
9 kA
 Verluste < 0,01 %
 Einfach anpassbar
an Spannung und
Strom
 Strombegrenzung,
Funktionsprüfung im
Betrieb
 Ultra fast discon-
nector in SF₆-Tech-
nologie schützt den
Lastkommutierungs-
schalter



- **Normalbetrieb:** Strom fließt durch verlustarmen Laststrompfad (Low Loss Bypass)
- **Proaktives Schalten:** Lastkommutierungsschalter (Load Commutation Switch) sorgt für Übergang des Kurzschlussstroms in den Hauptschalter (Main Breaker), ultraschneller Trennschalter (Ultra Fast Disconnecter) öffnet unter sehr kleiner Spannungs- und Strombelastung
- **Fehlerklärung:** Hauptschalter kommutiert Fehlerstrom in die Überspannungsableiter, nachdem UFD geöffnet hat

Quelle: ABB

Gleichspannung für das Verteilnetz

Was gibt es noch zu tun?

- Normung und Standardisierung
 - Für MVDC-Netze existieren derzeit noch keine genormten Spannungsniveaus
 - Kriterien der Spannungsqualität am Kundenanschluss sind zu definieren
 - Regeln (Grid Codes) für den Anschluss von DC-Verbrauchern, DC-Erzeugern und Speichern (allg. Kundenanlagen) an ein öffentliches DC-Netz sind zu definieren
 - Betriebsmittelnormen Kabel und Freileitungen, Umrichter, Isolatoren, Mastkonstruktionen, Anschlussgarnituren, etc. sind zu definieren
- Netzbetriebsführung
 - HVDC-Konzepte lassen sich prinzipiell auch auf ein MVDC-Netz anwenden, für ausgedehnte DC-Verteilnetze mit einer Vielzahl von Verbrauchs- und Erzeugungsanlagen müssen diese Netzregelungskonzepte jedoch noch näher untersucht werden.
- Systemintegration
 - Systemintegration von aktiven Betriebsmitteln (aktive Gleichrichter, Wechselrichter, DC/DC Wandler etc.) erfordert eine sorgfältige Systemanalyse (Stabilität, Resonanzen, Oberschwingungen)

Quelle: Schnelle; Frey; Maibach: ETG Task Force „Gleichspannung in der elektrischen Energieverteilung“

Gleichspannung für das Verteilnetz

Was gibt es noch zu tun?

- Schutzkonzepte
 - Schutzkonzepte aus AC-Netzen (z.B. basierend auf Übertströmen) sind nicht direkt auf den Einsatz in DC-Netzen übertragbar oder sind zu teuer
 - Distanzschutz: Distanz zum Fehlerort wird mittels Messung der Impedanz bestimmt, die es im DC-Betrieb aber nicht gibt
 - Differentialschutz: Lässt sich anwenden, benötigt aber einen zusätzlichen Kommunikationskanal sowie zwei Leistungsschalter je zu schützendem Betriebsmittel (zu teuer)
 - Hinsichtlich Fehlererkennung (Schnelligkeit, um Überdimensionierung der Freilaufdiode zu reduzieren) und Fehlerlokalisierung in DC-Netzen gibt es noch Forschungsbedarf
 - Freischaltung von Fehlerströmen mittels DC-Leistungsschaltern wurden bzw. werden im Rahmen der HGÜ erforscht, Erkenntnisse können übertragen werden
 - Umrichter mit Vollbrückenmodulen können den Stromfluss von der AC-Seite auf den DC-Kurzschluss regeln

Quelle: Priebe: ETG Task Force „Gleichspannung in der elektrischen Energieverteilung“

Gleichspannung für das Verteilnetz: Entwicklungen und Optionen

Fazit

- Die Integration von Erneuerbaren Energiequellen (Wind, Solar) und Batteriespeichersystemen in die Verteilnetze,
 - immer mehr (massive) DC-Verbraucher (z.B. Elektromobilität),
 - die höhere Effizienz einer HVDC-MVDC-Verbindung im Vergleich zu einer HVDC-MVAC-Verbindung,
 - ein steuerbarer Leistungsfluss anstelle von "Ohm" und "Kirchhoff",
 - eine bessere Ausnutzung von Kabeln (kein Skin-Effekt, kein Blindleistungsbedarf),
 - die höhere Systemeffizienz (\Rightarrow geringerer (Leiter-)Materialaufwand) sowie
 - geringere Life-Cycle-Kosten aufgrund geringerer Wartungskosten,
 - legen einen Anschluss an DC-Netze bzw. eine Versorgung aus DC-Netzen nahe.
- Gründe genug für eine intensive technisch-wissenschaftliche Auseinandersetzung.

Wissensplattform und Experten-Netzwerk für die Energietechnik

VDE – Netzwerk Zukunft

Ihr Ansprechpartner :

Dr. Thomas Benz
Geschäftsführer ETG

Phone: +49 69 6308-346
etg@vde.com

Der Beitrag entstand mit freundlicher Unterstützung durch das E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen (Leitung: Prof. Dr. ir. Dr. h. c. Rik W. De Doncker) und der ETG Task Force „Gleichspannung in der elektrischen Energieverteilung“