



Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik  
Fachgebiet Elektrische Energieversorgung  
Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann



Leibniz  
Universität  
Hannover

# Basiswissen Netzanbindung



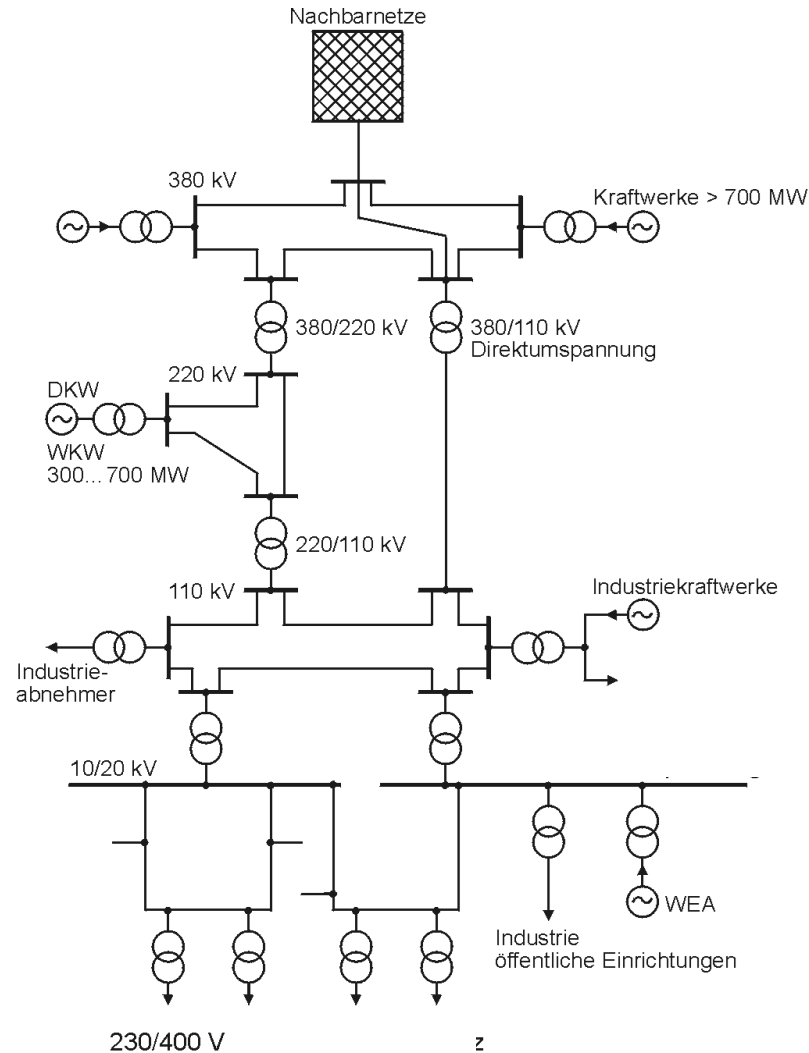
# Inhalt

- Einleitung
- Netzanschluss und Netzanschlusstechnik
- Verlegen von Seekabeln und Erdkabeln
- Zusammenfassung

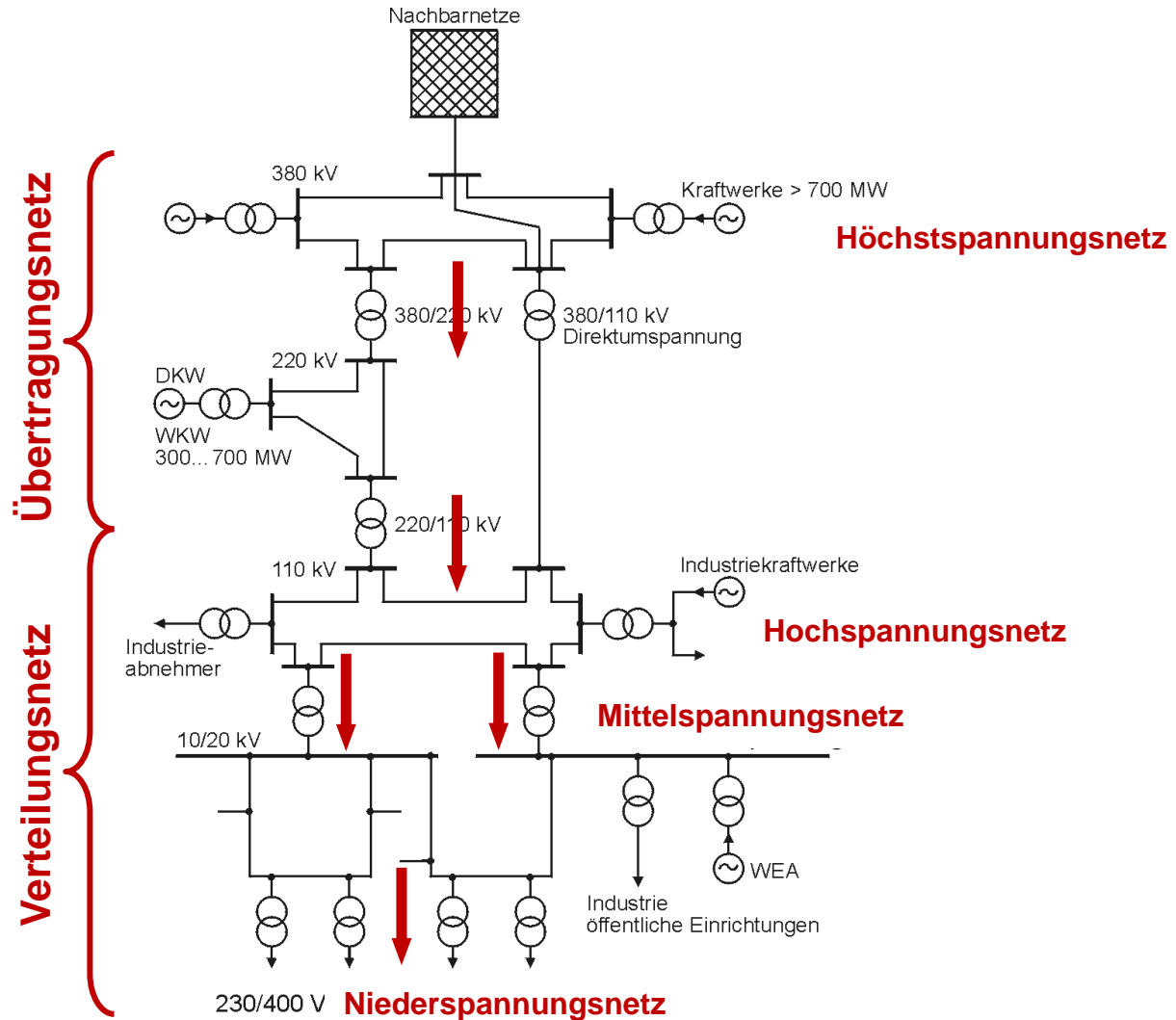
# Inhalt

- Einleitung
- Netzanschluss und Netzanschlusstechnik
- Verlegen von Seekabeln und Erdkabeln
- Zusammenfassung

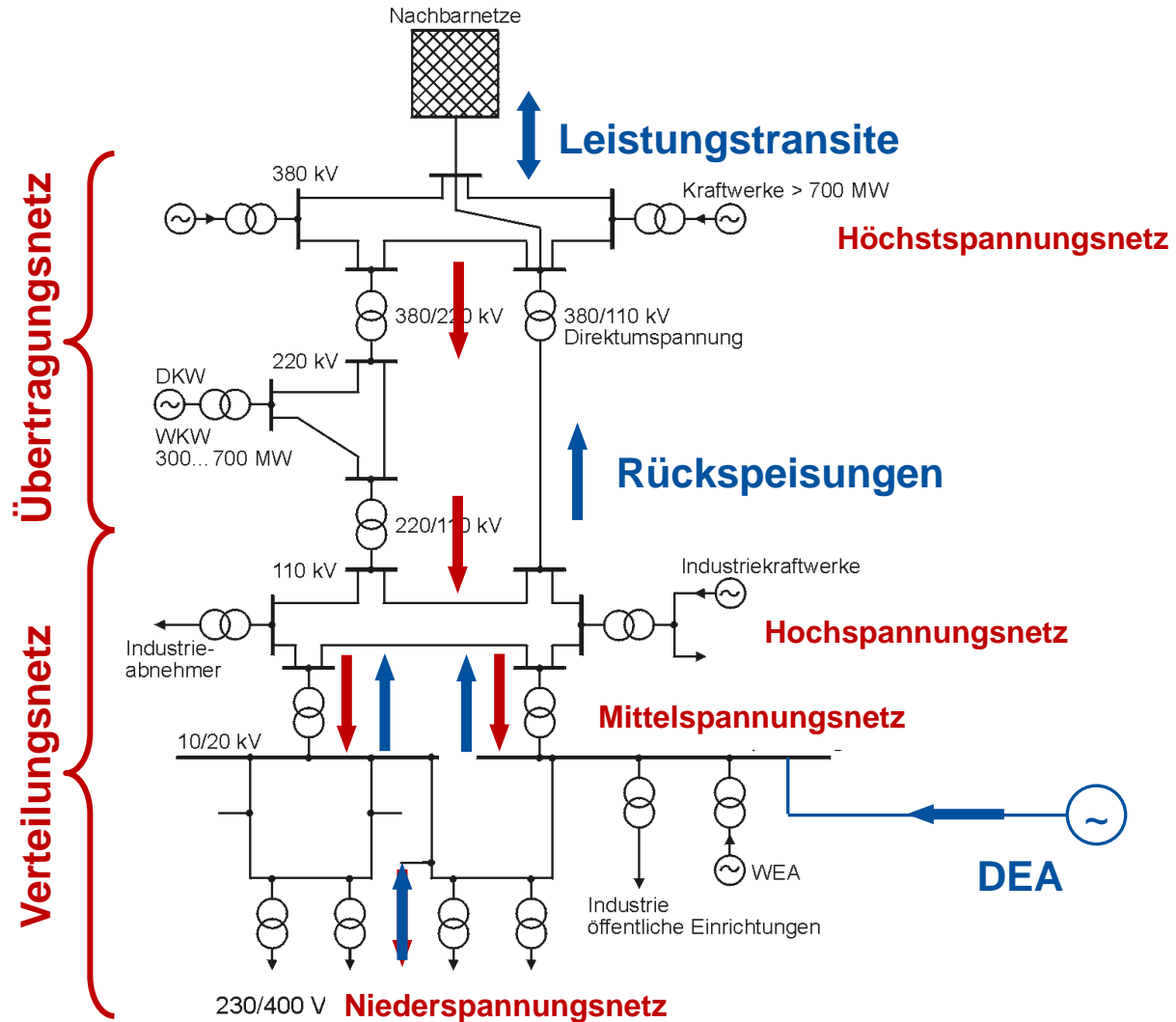
# Aufbau von Elektroenergiesystemen



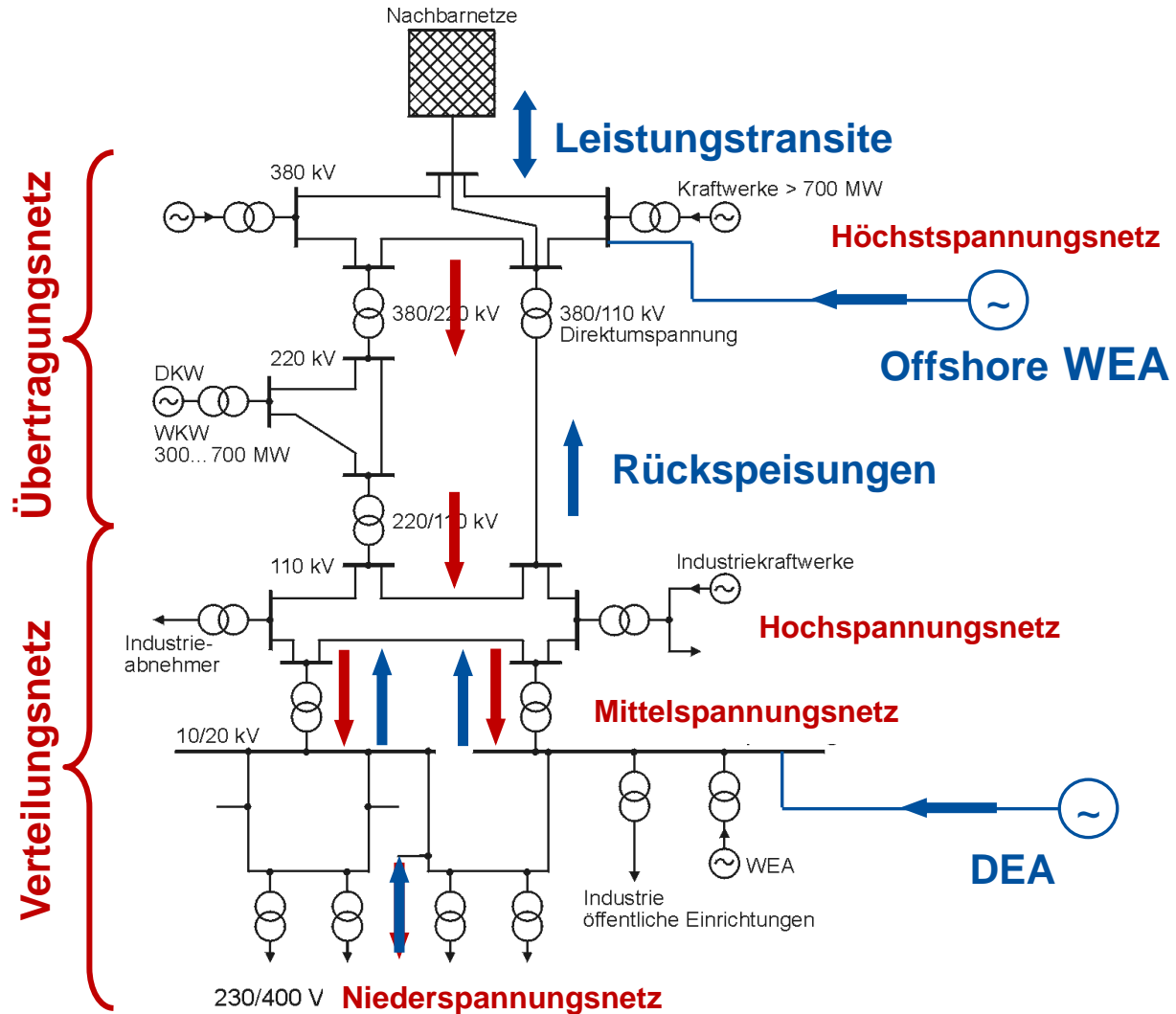
# Aufbau von Elektroenergiesystemen



# Aufbau von Elektroenergiesystemen



# Aufbau von Elektroenergiesystemen



# Aktuelle Netzsituation

- Politischer und gesellschaftlicher Rahmen
  - Wirtschaftliche, umweltfreundliche und sichere Energieversorgung
  - Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen
  - Änderung der Erzeugungsstruktur
    - Steigerung des Anteils der regenerativen Energiequellen an der Stromversorgung auf 35 % bis 2020
    - Kernenergieausstieg und Ersatz thermischer Erzeugungskapazität
  - Intensivierung des europäischen Stromhandels
  - Anreizregulierung, effiziente Netzbetreiber, kostenoptimale Netze



# Entwicklungstendenzen

- Neue Übertragungs- und Verteilungsaufgaben
  - Änderung der Erzeugungs- und Verbrauchsschwerpunkte
  - Zunehmende dezentrale Erzeugung
  - Intensivierung des europäischen Stromhandels
- Aus- und Umbau der Stromnetze ist notwendig
  - Netzentwicklungsplan / Offshore-Netzentwicklungsplan
  - 2.800 km neue und 2.900 km modernisierte Höchstspannungsleitungen bis 2022
  - Verstärkung der Haupttransportwege
  - Ausbau der Kuppelleitungskapazitäten
  - Ausbau / Umstrukturierung der Verteilungsnetze

# Inhalt

- Einleitung
- Netzanschluss und Netzanschlussstechnik
- Verlegen von Seekabeln und Erdkabeln
- Zusammenfassung

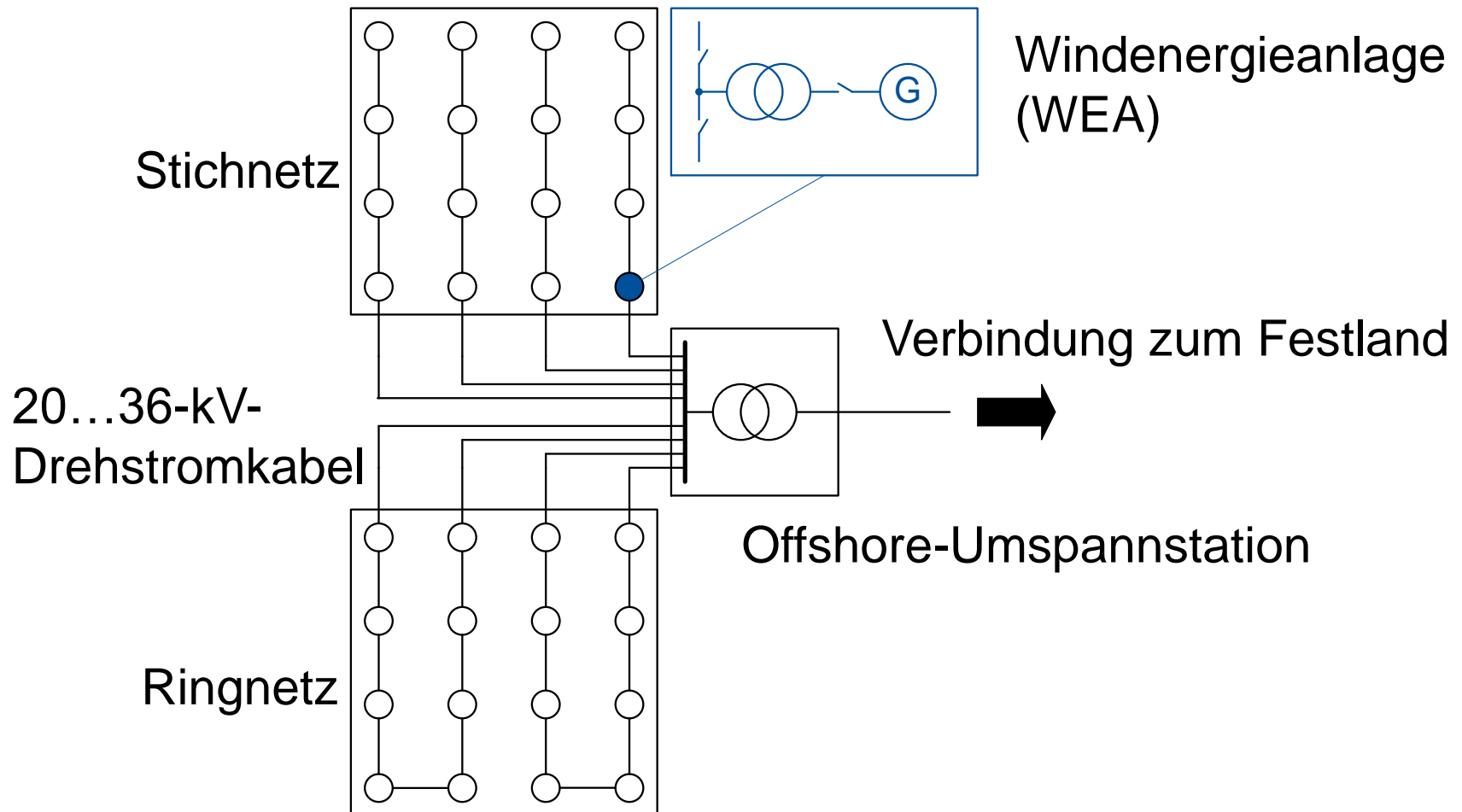
# Netzanschluss und Netzanschlusstechnik

- Prinzipieller Aufbau



Quelle: TenneT TSO GmbH

# Interne Verbindung der Windenergieanlagen in einem Windpark



# Interne Verbindung der Windenergieanlagen in einem Windpark

- Entfernung zwischen den WEA etwa 500 – 800 m
- Maximale Kabellänge zwischen den WEA bis zu 1.000 m
- Anlagencluster von 30 – 40 MW
- Anlagenleistung ab 5 MW
- Stichleitungen:
  - Kostengünstig
  - Bevorzugt
- Ringleitungen:
  - Redundanz
  - Geringere Verluste



Kabelaufhängung auf Transformatorplattform

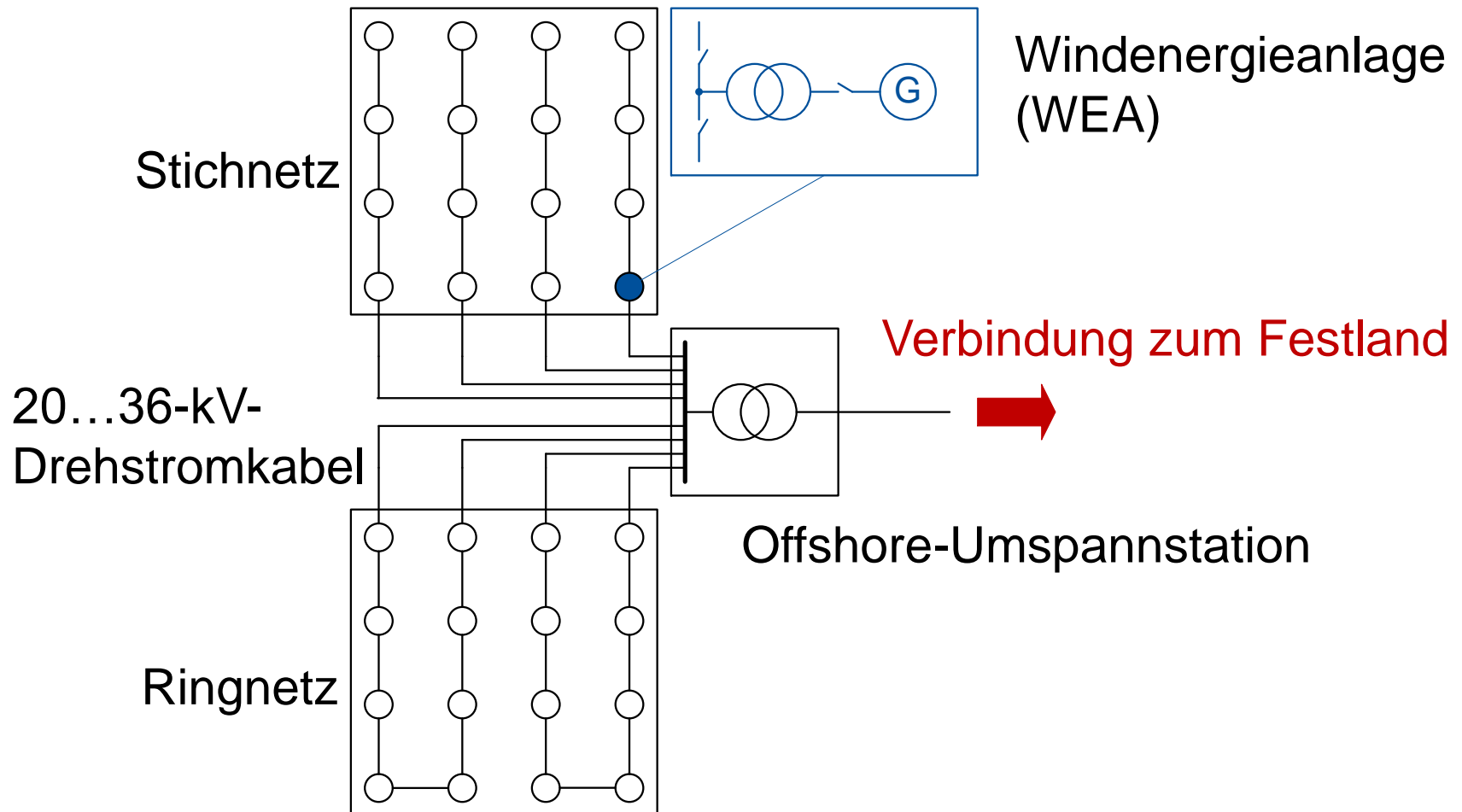
Quelle: Nexans



Kabeleinführungen an Offshore-WEA

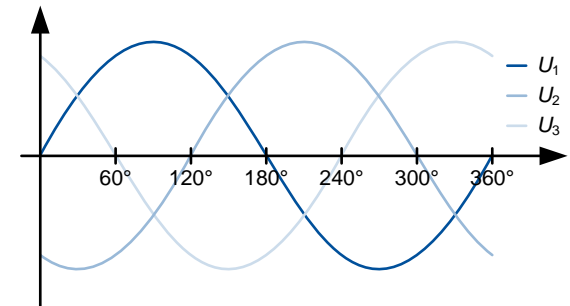
Quelle: Nexans

# Verbindung zum Festland

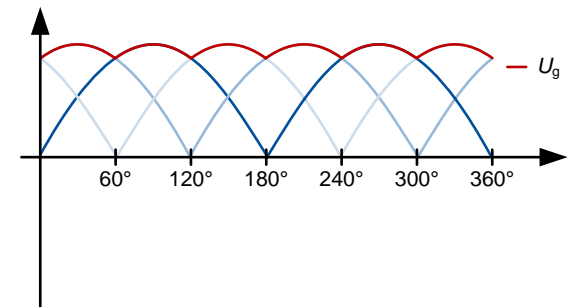


## Verbindung zum Festland

- Drehstrom (3-Phasensystem, HDÜ)
  - Sinusförmige Verläufe von Spannungen und Strömen mit einer Frequenz von 50 Hz
  - Phasenverschiebung um  $120^\circ$
  - Natürliche Stromnulldurchgänge
- Gleichstrom (+/-, 2 Leiter, HGÜ)
  - Gleichstrom und Spannung mit geringer Welligkeit
  - Keine natürlichen Nulldurchgänge
  - Oberschwingungen



Drehstrom mit  $120^\circ$  Phasenverschiebung



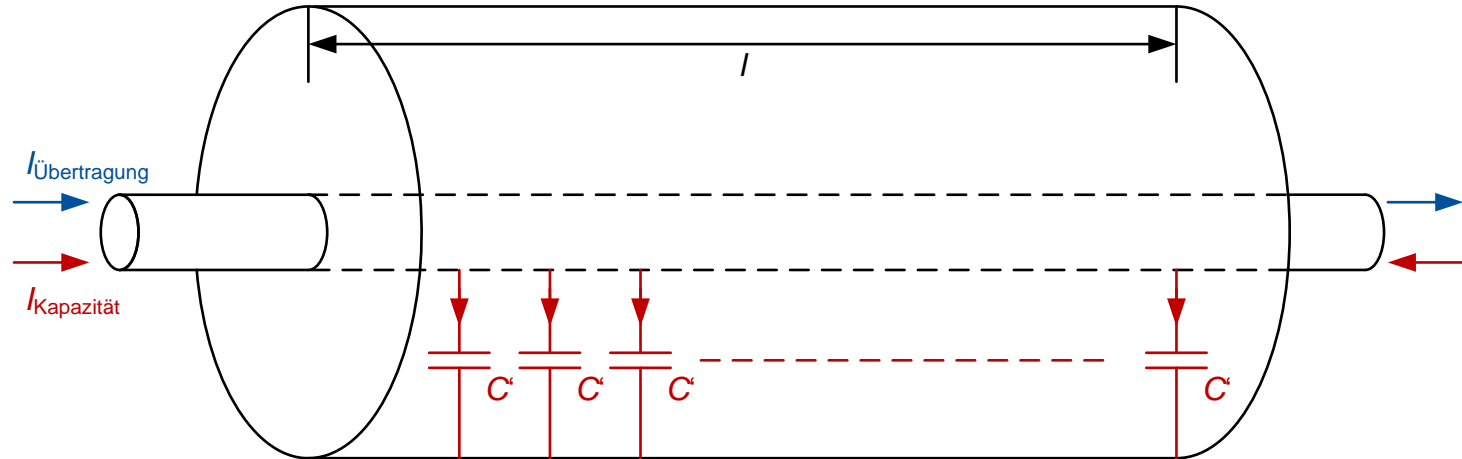
Gleichstrom mit geringer Welligkeit

# Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung

- Einfache, bewährte Technik
- Hohe Verfügbarkeit
- Begrenzte Übertragungskapazität
- Fester Isolationsstoff, Isolationsabstände bei 380 kV: 30 mm
- Begrenzte Reichweite: 150 kV, 1.200 mm<sup>2</sup> Cu, ca. 2500 MVA, ca. 100 km
- Kapazitiver Ladestrom



# Kapazitiver Ladestrom



$$I_{\max} = \sqrt{I_{\text{Übertragung}}^2 + I_{\text{Kapazität}}^2}$$

$$I_{\text{Übertragung}} = \sqrt{I_{\max}^2 - I_{\text{Kapazität}}^2} = \sqrt{I_{\max}^2 - (\omega C' l U)^2}$$

Das Produkt  $lU$  ist begrenzt: Länge, Spannung, Kompensation

# Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung CSC-HGÜ

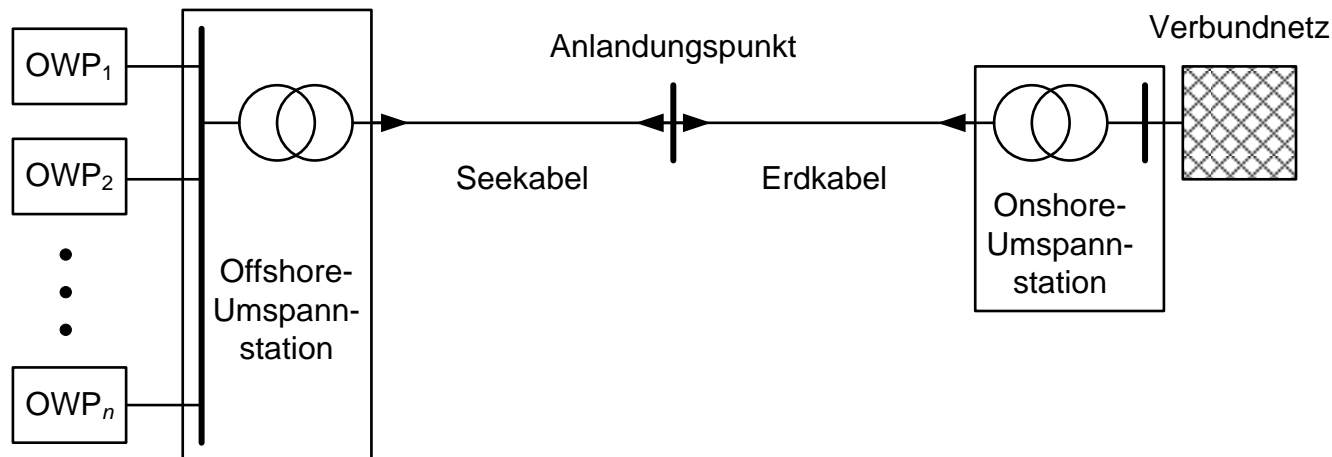
- Bewährte thyristorbasierte Technik (Baltic Cable)  
Kupplung asynch. Netze, Punkt-zu-Punkt Verbindung
- Freileitung und Masseisolierte Kabel
- VPE-Kabel wegen Umpolung bei Energieflussumkehr nicht einsetzbar
- Kein Ladestrom, kleinerer Spannungsabfall, bis zu 4.000 km
- Großer Blindleistungsbedarf,  $\sim 50 \% P_r$
- Großer Platzbedarf für Konverterstationen (80 m x 180 m für 600 MW)

# Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung VSC-HGÜ

- Entwicklung der Kabeltechnologie entscheidend für Entwicklung der VSC-HGÜ
- Freileitung und Masseisolierte sowie VPE-Kabel
- VPE-Kabel sind Einsetzbar, da Umkehrung des Energieflusses ohne Spannungsumkehr im Gleichspannungszwischenkreis möglich ist
- Kein Ladestrom, kleinerer Spannungsabfall, bis zu 4.000 km
- Kompaktere Umrichterstationen (60 m x 100 m für 1.000 MW)

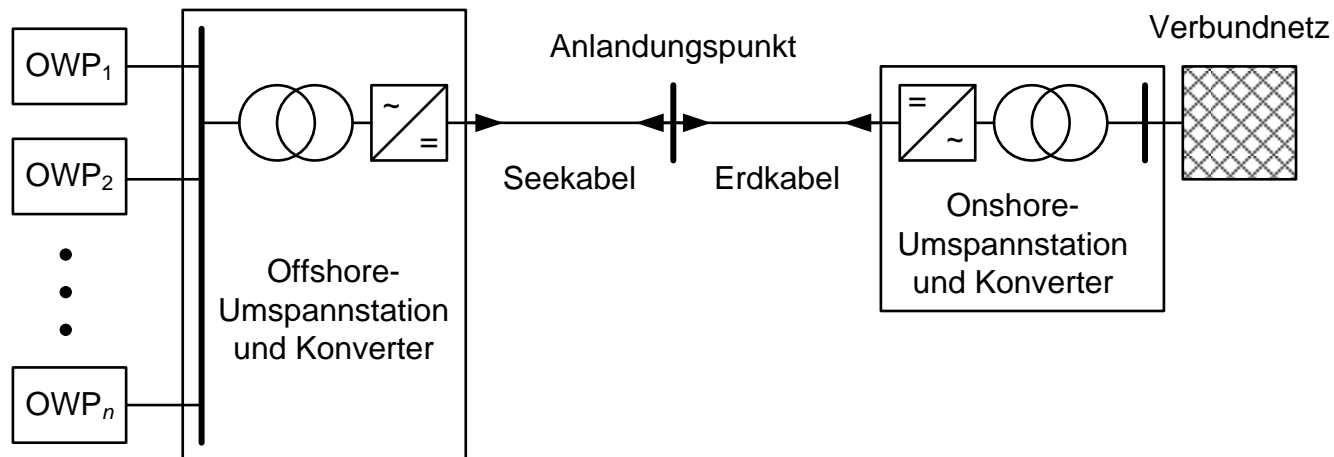
# Netzanschluss über Drehstromverbindung

- Beispiel:
  - Offshore-Testfeld, DOTI (30 m Wassertiefe)
  - Ca. 60 km AC-Seekabel, ca. 6 km AC-Erdkabel, 60 MW
  - Anschluss an 110-kV-UW Hagermarsch



# Netzanschluss über Gleichstromverbindung

- Beispiel:
  - BorWin OWP „BARD Offshore 1“ (40 m Wassertiefe)
  - Ca. 125 km DC-Seekabel, ca. 75 km DC-Erdkabel, 400 MW
  - Anschluss an 380-kV-UW Diele



# Offshore Umspannstationen



Offshore Umspannstation alpha ventus

Quelle: DOTI



Offshore Umspannstation und Konverter BorWin alpha

Quelle: TenneT TSO GmbH

# Inhalt

- Einleitung
- Netzanschluss und Netzanschlussstechnik
- Verlegen von Seekabeln und Erdkabeln
- Zusammenfassung

# Verlegen von Seekabeln



Kabelverlegeschiffe

Quelle: Tennet TSO GmbH



Spülschlitten zum Einspülen der Kabel am Meeresboden

Quelle: Tennet TSO GmbH



Einfräsen von Kabeln in den Wattboden

Quelle: Tennet TSO GmbH



# Verlegen von Erdkabeln



Horizontalbohrung zur Kabelverlegung

Quelle: Tennet TSO GmbH



Kabelgraben

Quelle: Tennet TSO GmbH



Anlanden von Kabeln auf Nordenei

Quelle: Tennet TSO GmbH

# Inhalt

- Einleitung
- Netzanschluss und Netzanschlusstechnik
- Verlegen von Seekabeln und Erdkabeln
- Zusammenfassung

# Zusammenfassung

- Die zukünftige Netzsituation in Deutschland wird bestimmt durch:
  - Änderung der Erzeugungsstruktur
  - Europäischer Strommarkt
- Erforderlich sind:
  - Netzverträgliche Integration regenerativer und dezentraler Energieerzeugungsanlage
  - Ausbau der Hochspannungs- und Höchstspannungsnetze für den regionalen und überregionalen Energietransport
  - Übernahme von Kraftwerkseigenschaften durch EEG-Erzeugungsanlagen
  - Aktiver Beitrag der WEA zur Systemsicherheit

**Vielen Dank für Ihr Interesse!**

Dipl.-Ing. Torsten Rendel  
[rendel@iee.uni.hannover.de](mailto:rendel@iee.uni.hannover.de)