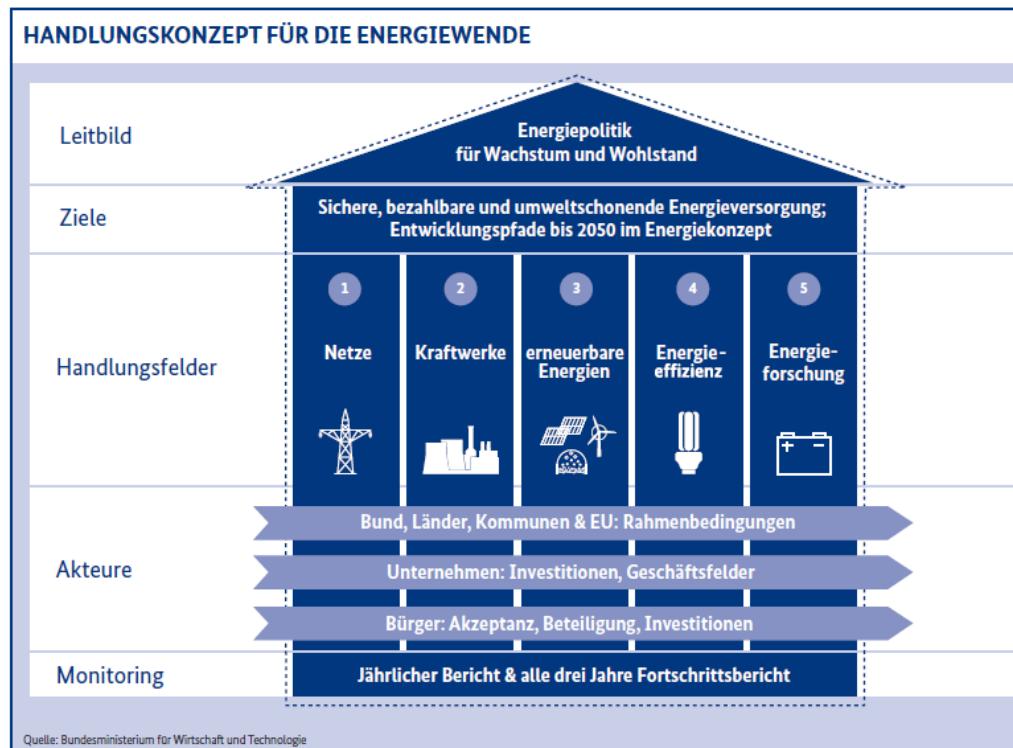


# Das elektrische Energieversorgungsnetz für die Energiewende

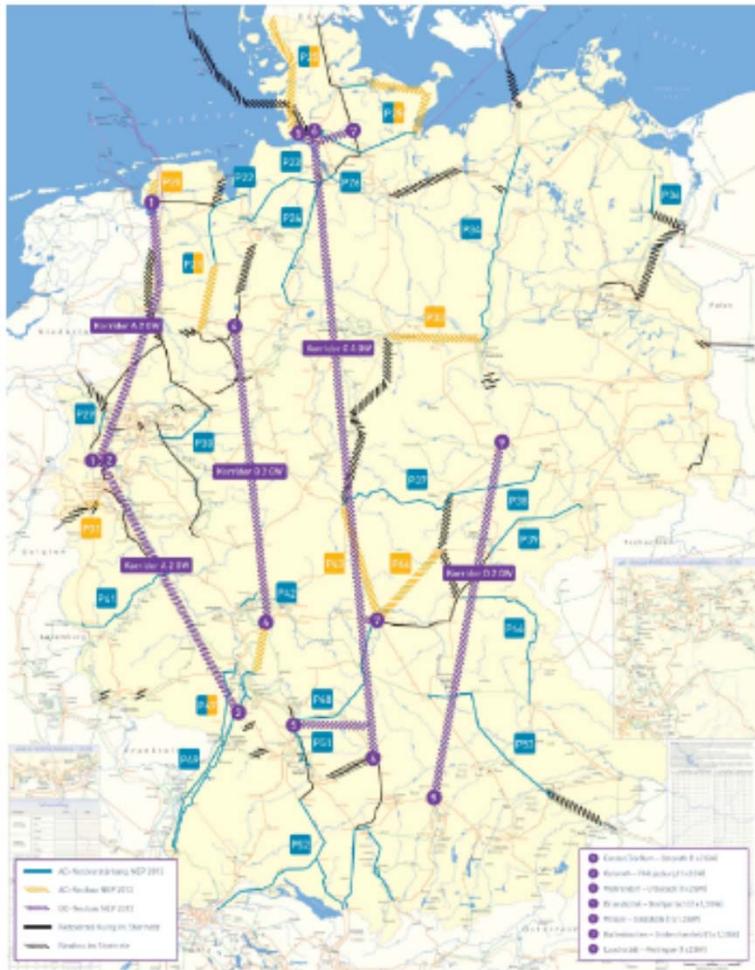
Prof. Dr.-Ing. Jutta Hanson  
12. November 2012



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



# Das Netz für die Energiewende



- Grundbegriffe
- Die großen Änderungen im Energiesektor
  - Struktur der heutigen Energieversorgung
  - Energieerzeugungsstruktur Heute und Morgen
- AC- und DC-Übertragungstechnologien
- Netzentwicklungsplan
- Verteilnetz
- Speichertechnologien

# DAS ENERGIEVERSORGUNGSNETZ FÜR DIE ENERGIEWENDE



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## GRUNDBEGRIFFE

# Grundbegriffe

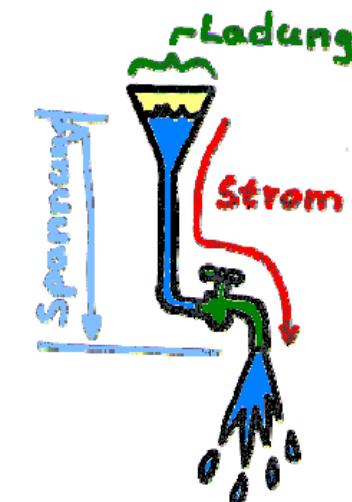
## "Elektrische Spannung und Strom"



- Eine **elektrische Spannung** entsteht durch Verschiebung oder Trennen von Ladungen. Eine elektrische Spannung kann nur zwischen zwei Punkten mit unterschiedlichem Potential auftreten.
  - Einheit Volt: V, kV



- Ein **Strom** kann fließen, wenn eine Spannung ansteht und der Stromkreis geschlossen ist. Je mehr Elektronen durch einen Leiter je Zeiteinheit fließen, desto höher ist die Stromstärke.
  - Einheit Ampere: A, kA



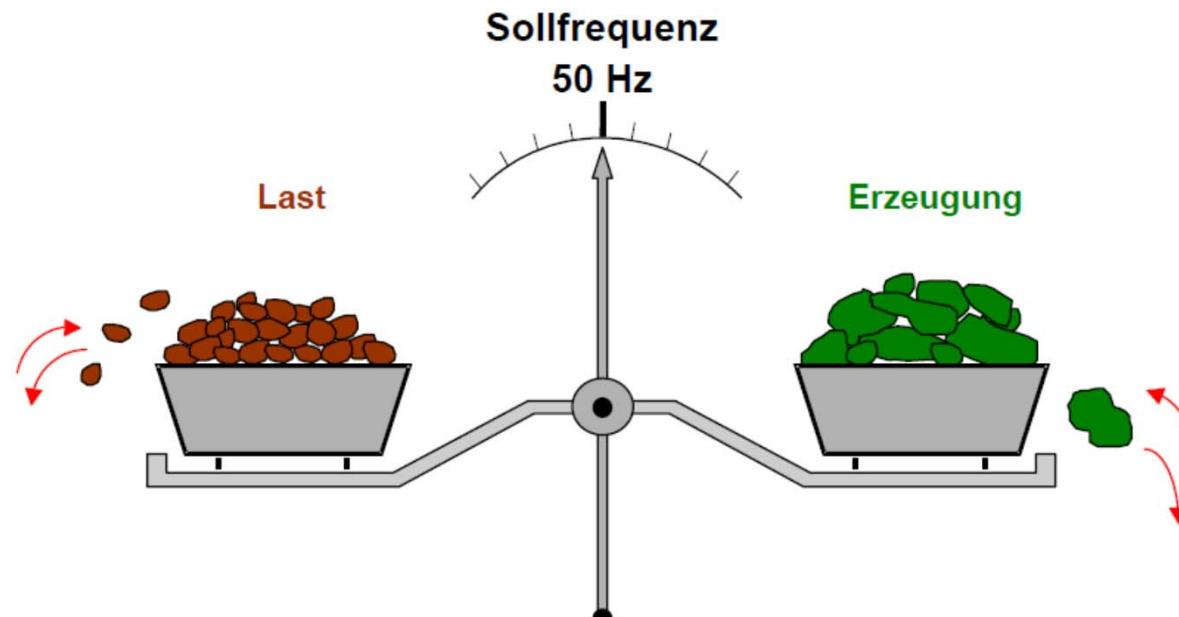
# Grundbegriffe

## "Elektrische Leistung und Arbeit"



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- Leistung = Strom  $\times$  Spannung kW, kVA, MW, MVA
- Arbeit = Leistung  $\times$  Zeit kWh, MWh, TWh

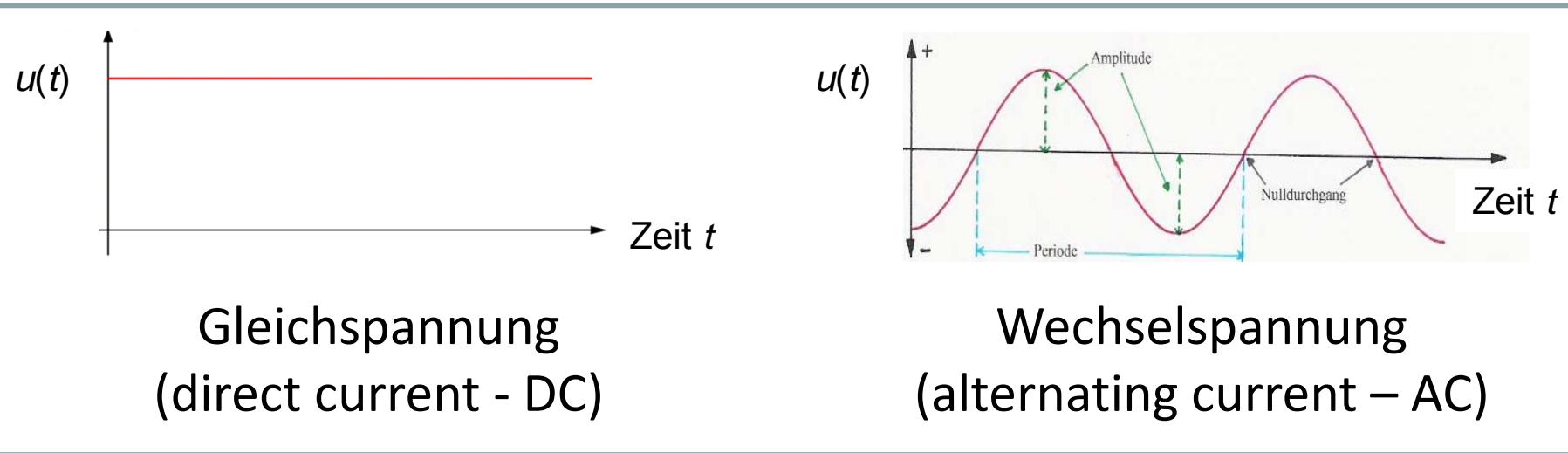


Quelle: Th. Weber, Schneider Electric

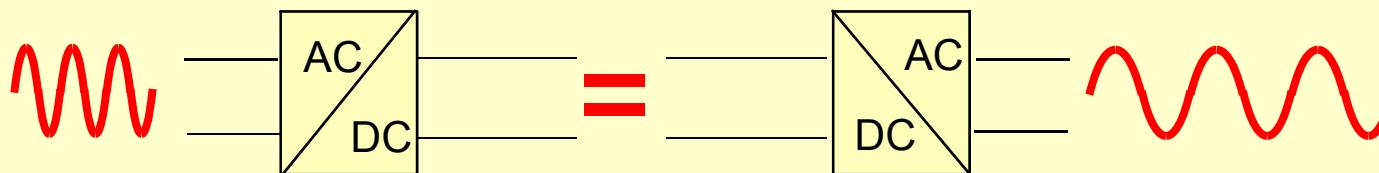
# Gleichspannung, Wechselspannung, HGÜ



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



## Prinzip der Hochspannungsgleichstromübertragung



# DAS ENERGIEVERSORGUNGSNETZ FÜR DIE ENERGIEWENDE



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## DIE GROßen VERÄNDERUNGEN IM ENERGIESEKTOR

# Globale Treiber für eine andere elektrische Energieversorgung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Bild:  
<http://view.stern.de>  
Download: 28.12.11



Bild:  
<http://idw-online.de>  
Download: 28.12.11

## ■ Wachstum

- Bevölkerung
- Wirtschaft - vor allem in den Schwellenländern

## ■ Nachhaltigkeit

- Umweltverschmutzung – lokal
- Klimawandel – global
- Endlichkeit der Ressourcen

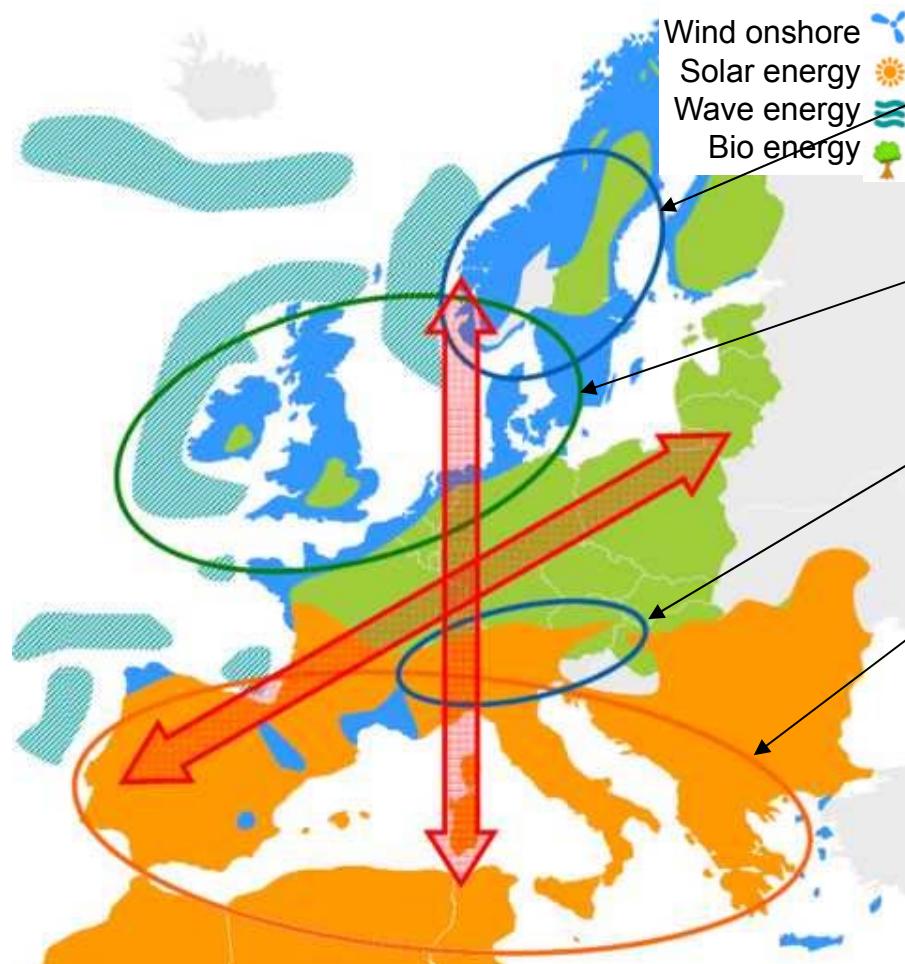
## ■ Elektrische Energie gewinnt weiter an Bedeutung und wird zum größten Teilsektor (IEA)

# Zentraler Treiber des Wandels in Europa Umbau des Erzeugungssystems



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Source: DG Energy,  
European  
Commission



Neue Wasserkraft- und Pump-  
speicherkraftwerke in Skandi-  
navien

Mehr als 25 GW Windenergie in  
Nord- und Ostsee

Neue Wasserkraft- und Pump-  
speicherkraftwerke in den Alpen

Neue Solarkraftwerke in Süd-  
europa, Nordafrika und dem  
Mittleren Osten

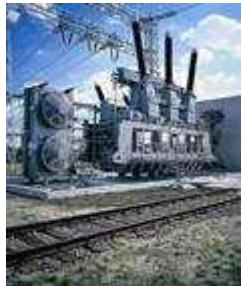
Zentraleuropa wird  
zur Drehscheibe  
für Stromaustausch  
und Stromhandel

# Elektrische Energieversorgung

## Die Lösung bis heute

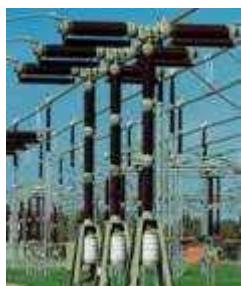


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



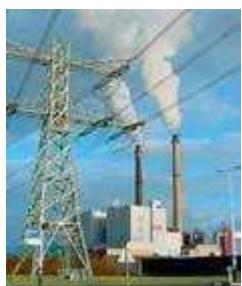
### ▪ **Drehstromsystem**

- einfache Umwandlung von und in mechanische Energie
- einfache Spannungswandlung, Stromunterbrechung
- Frequenz als systemweite Führungsgröße



### ▪ **Verbrauchsnahe Erzeugung**

- wirtschaftlich: Primärenergietransport i.a. günstiger
- robust: kurze Leitungen, regionale Teilsysteme



### ▪ **Lastführung des Versorgungssystems**

- Erzeugung und Verbrauch müssen jederzeit ausgeglichen sein!
- Ausgleich fast ausschließlich auf der Erzeugungsseite
- Energiespeicherung bevorzugt auf Primärenergieseite

# Die deutsche Energiewende

## Grundlegende Veränderungen in der Erzeugungsstruktur



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



- **Verbrauchsferne** Erzeugung in großen Einheiten
  - Windenergie, insbesondere Offshore
  - Wasserkraft (Speicher) – Alpen, Skandinavien
  - Wegfall der Erzeugung großer Kernkraftwerksblöcke im Süden Deutschlands
  - Sonnenenergie – Südeuropa, Nordafrika
- **Dezentrale** Erzeugung in kleinen Einheiten
  - Photovoltaik
  - Kraft-Wärme-Kopplung
- **Volatile** Erzeugung
  - Windenergie
  - Sonnenenergie

# Neue Erzeugungs- und Verbraucherstruktur



Treiber	Betroffener Systembereich				
	Konv. Erzeugung	Übertragung	Verteilung	Betrieb	Anwendung
Verbrauchs- ferne Erzeugung		<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Ferntransporte</li><li>▪ Overlaynetz AC/DC</li></ul>			
Dezentrale Erzeugung			<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Fernüberwach- barkeit und -steuerung</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Kommuni- kation</li><li>▪ Steuerung</li></ul>	
Volatile Erzeugung	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Teillast- fähigkeit</li><li>▪ Flexibilität</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Überregionaler Ausgleich</li><li>▪ Overlaynetz AC/DC</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Dezentrale Speicher</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Demand/ Load Side Management</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Speicher</li><li>▪ Demand/ Load Side Management</li></ul>
Neue Verbraucher (Elektromobilität)			<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Lade- infrastruktur</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Demand/ Load Side Management</li></ul>	

Quelle: Kreusel, ETG-Kongress 2011

# Neue Erzeugungs- und Verbraucherstruktur → Neues Netz



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Erzeugung



Traditionelle  
Kraftwerke



Solarkraftwerke



Windparks



Verteilte  
Erzeugung

## Übertragung und Verteilung



## Verbrauch



Intelligente  
Zähler



Haus-  
automatisierung



Elektrofahrzeuge



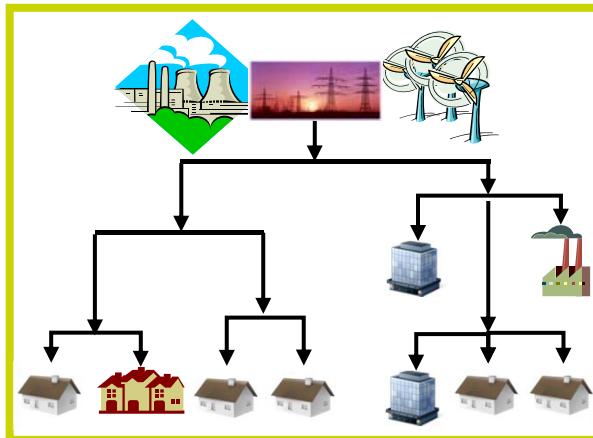
Industrie

# Evolution der Netze

## Vom traditionellen Aufbau zu zukünftigen Konzepten

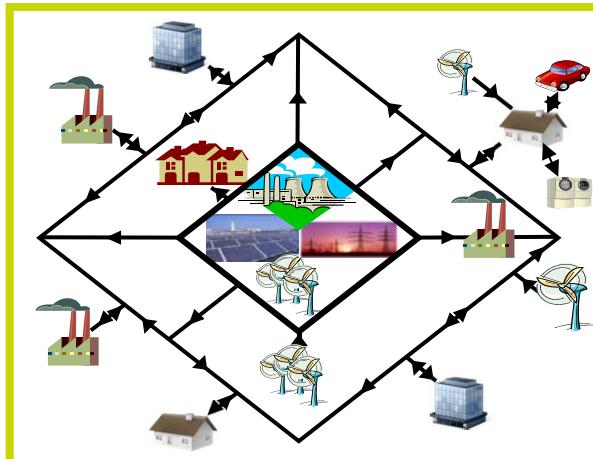


Traditionelles  
Netz



- Zentrale Stromerzeugung
- Gerichteter Leistungsfluss
- Lastgeführter Betrieb der Erzeugungsanlagen
- Betriebsführung basiert auf Erfahrung
- Begrenzter Netzzugang für neue Erzeuger

Zukünftiges  
Netz



- Zentrale und dezentrale Erzeugung
- Volatile Erzeugung aus "Erneuerbaren"
- Verbraucher werden auch Erzeuger
- Kein gerichteter Lastfluss
- Last folgt auch Erzeugung
- Betriebsführung basiert auf Echtzeitdaten

# DAS ENERGIEVERSORGUNGSNETZ FÜR DIE ENERGIEWENDE



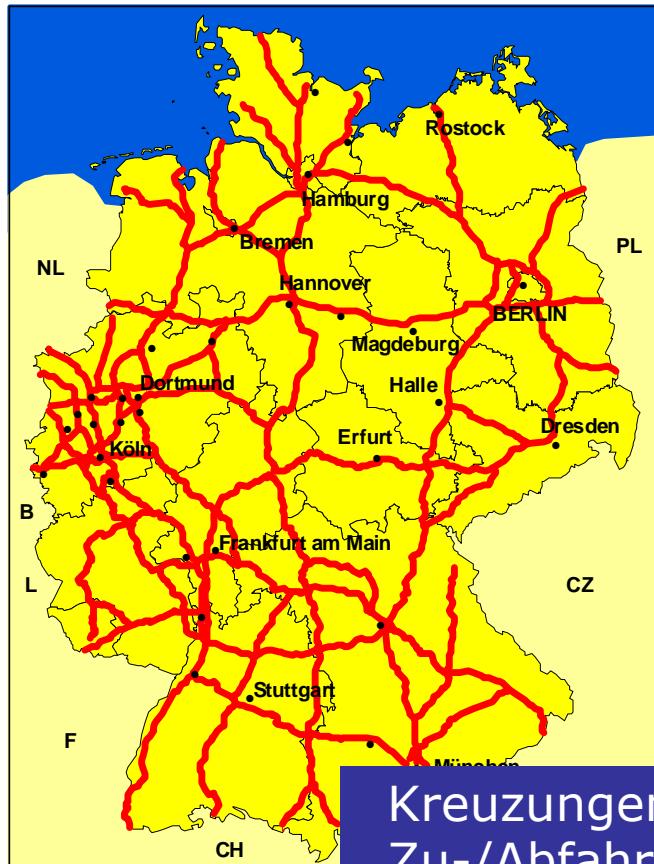
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## STRUKTUR DER HEUTIGEN ENERGIEVERSORGUNG

# Straßennetz - Elektrisches Netz



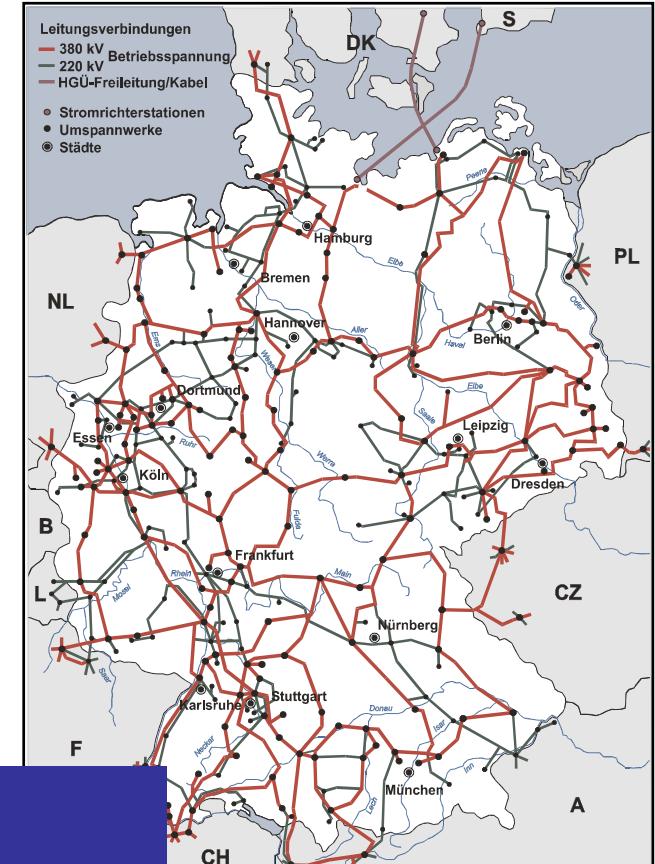
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Autobahnnetz

Kreuzungen  
Zu-/Abfahrten

↔ Netzknoten  
↔ Kraftwerke,  
Umspannstationen



380-kV-/220-kV-Netz

# Netzebenen - Spannungsebenen



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Autobahnen

Fernverkehr

Höchstspannungsnetz  
380/220 kV

**Übertragung**

Bundesstraßen

Regionalverkehr

Hochspannungsnetz  
110 kV

Kreisstraßen

Nahverkehr

**Verteilung**

Anliegerstraßen

Hausanschluss

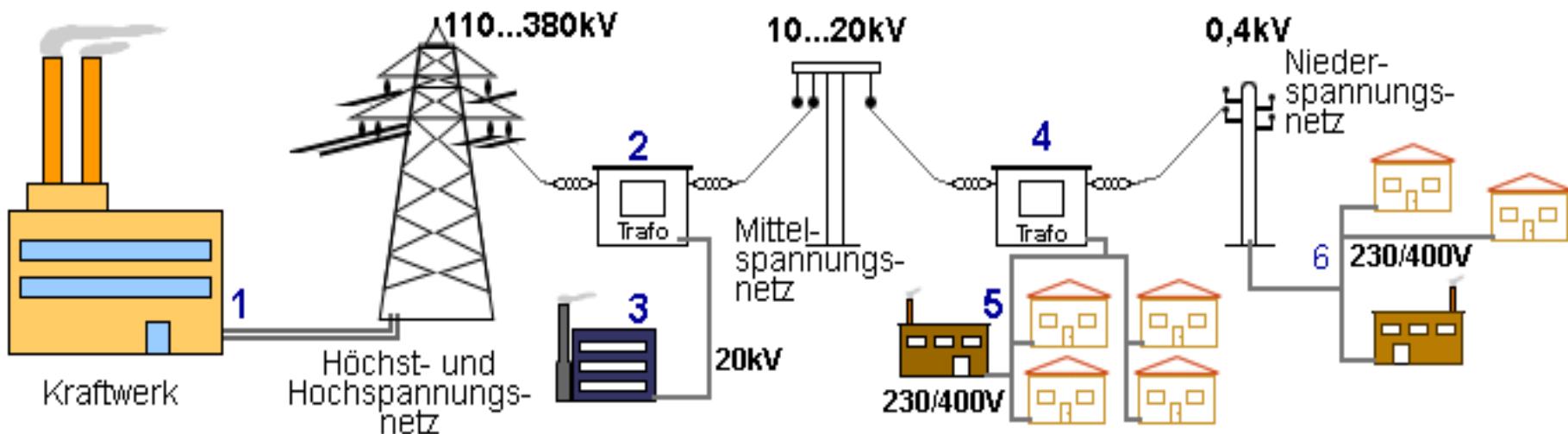
Mittelspannungsnetz  
20/10 kV

Niederspannungsnetz  
0,4 kV

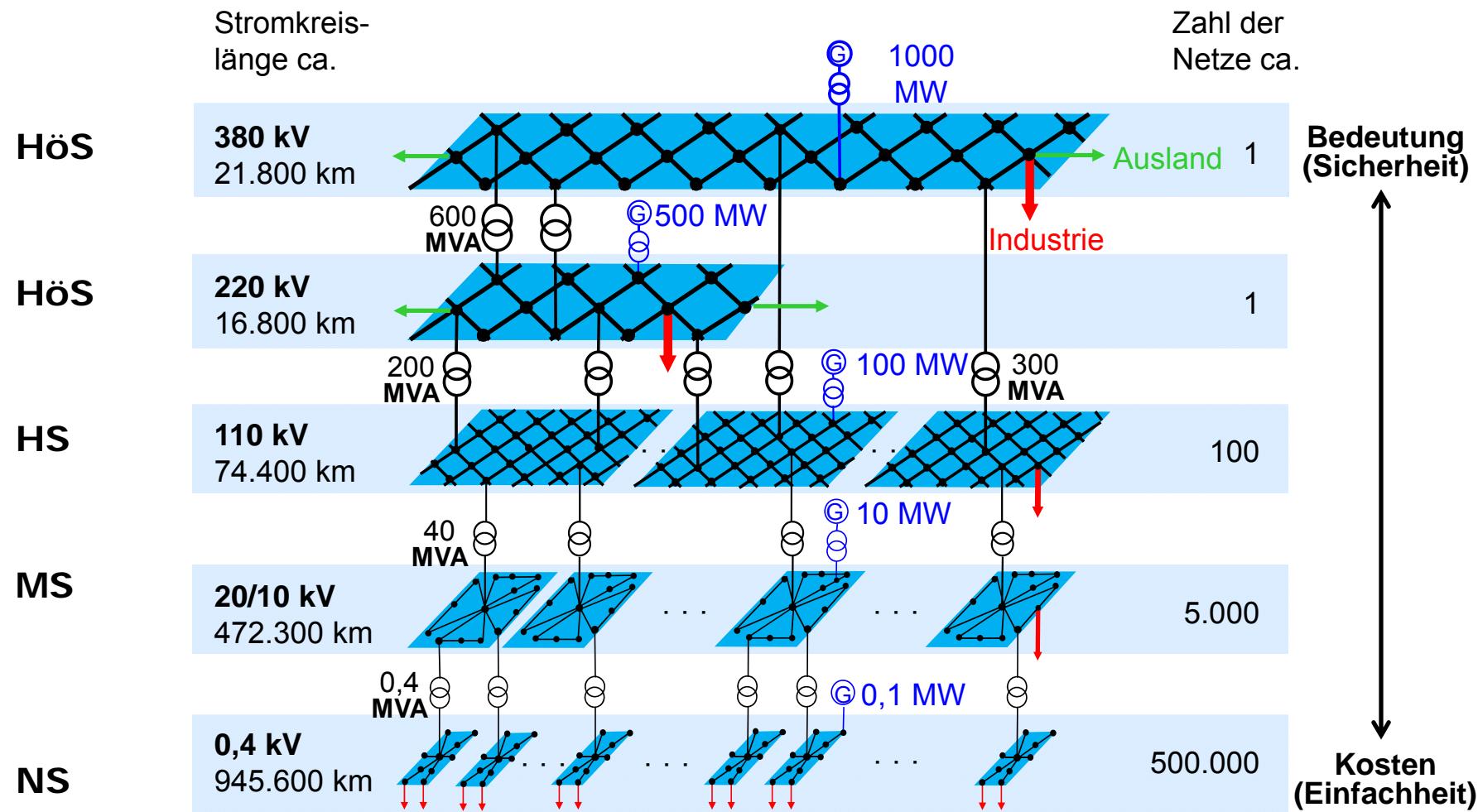
# Spannungsebenen in Deutschland



- **Höchstspannung (HöS)** 220 kV, 380 kV
- **Hochspannung (HS)** 110 kV
- **Mittelspannung (MS)** 6 kV, 10 kV, 20 kV, 30 kV
- **Niederspannung (NS)** 400 V, 500 V, 690 V



# Spannungsebenen und Netzstruktur in Deutschland



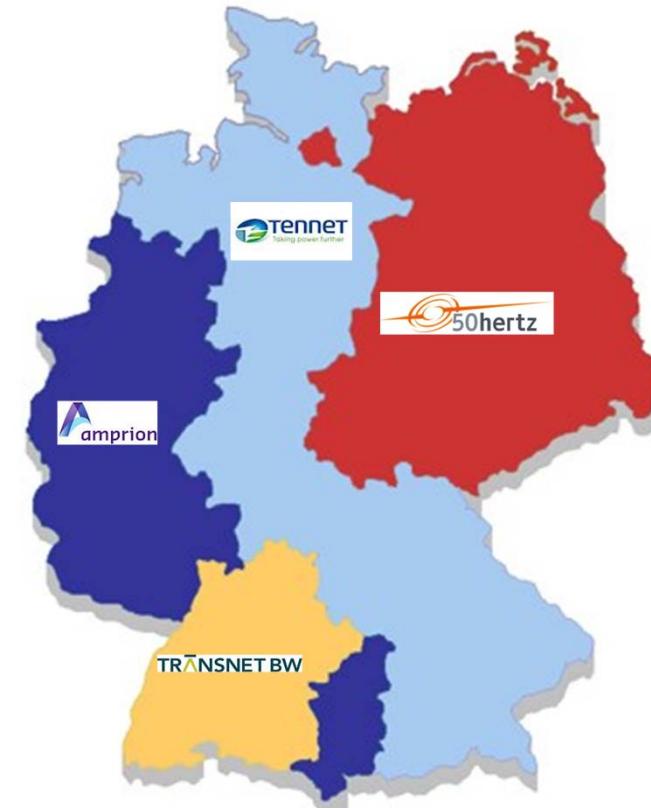
# Übertragungsnetzbetreiber und Verbundnetz



Für eine Übertragung der elektrischen Energie über größere Entfernungen sind hohe Spannungen wegen der Übertragungsverluste unerlässlich.

## Die Vorteile eines Verbundnetzes sind:

- **Erzeugungsausgleich** zwischen Kraftwerken unterschiedlicher Primärenergiebasis bzw. Kostenstruktur oder technischer Leistungsfähigkeit.
- Ausgleich der Unterschiede im **Lastkurvenverlauf** zwischen den elektrischen Netzen der Verbundunternehmen.
- Möglichkeit der **Unterstützung bei einem Störungsfall** bzw. Energieaustausch.
- **Verminderung der Investitionen** in neue Erzeugungsleistungen aufgrund der Austauschmöglichkeiten.



# DAS ENERGIEVERSORGUNGSNETZ FÜR DIE ENERGIEWENDE



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## ENERGIEERZEUGUNGSSTRUKTUR HEUTE UND MORGEN

# Neue Energie für Deutschland

## Ziele der Bundesregierung

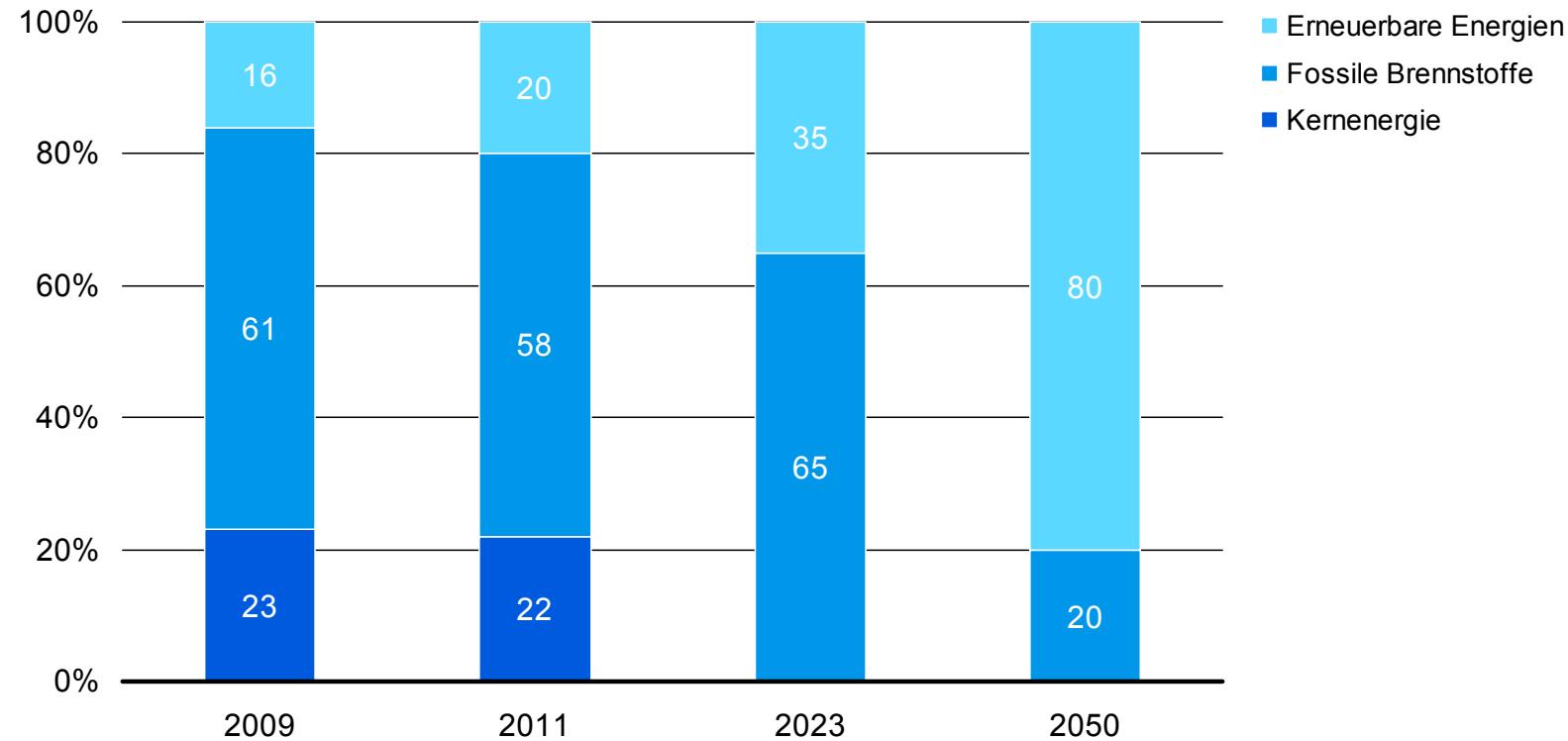


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

### Entwicklung des Strommix

#### Anteil an der Stromerzeugung in Prozent

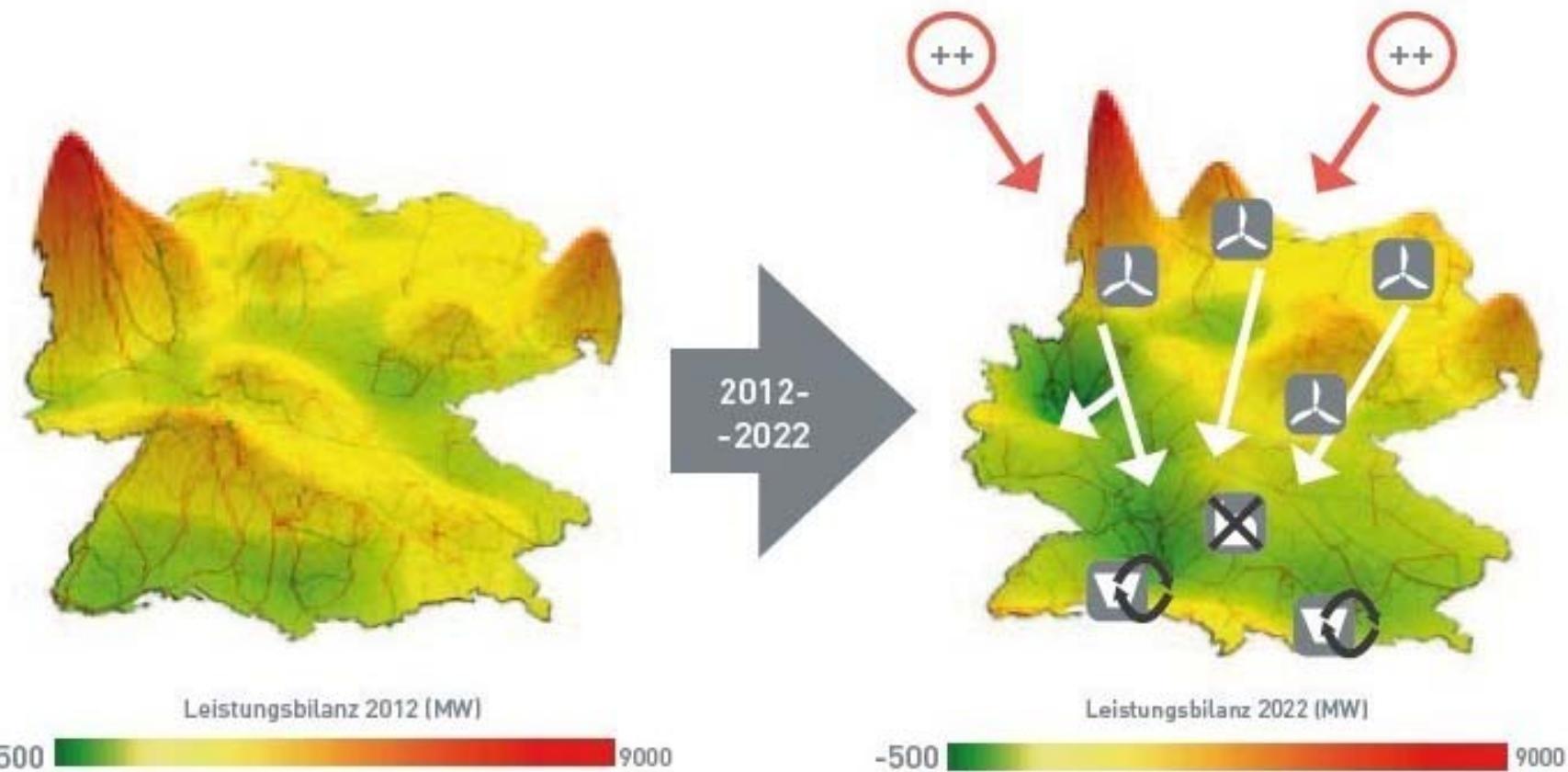
Quelle:  
Fortschritte für  
Deutschland.  
Halbzeitbilanz der  
Bundesregierung.  
[www.bundesregierung.de](http://www.bundesregierung.de), 03.11.2011



# Geänderte Erzeugungsstruktur laut Netzentwicklungsplan



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

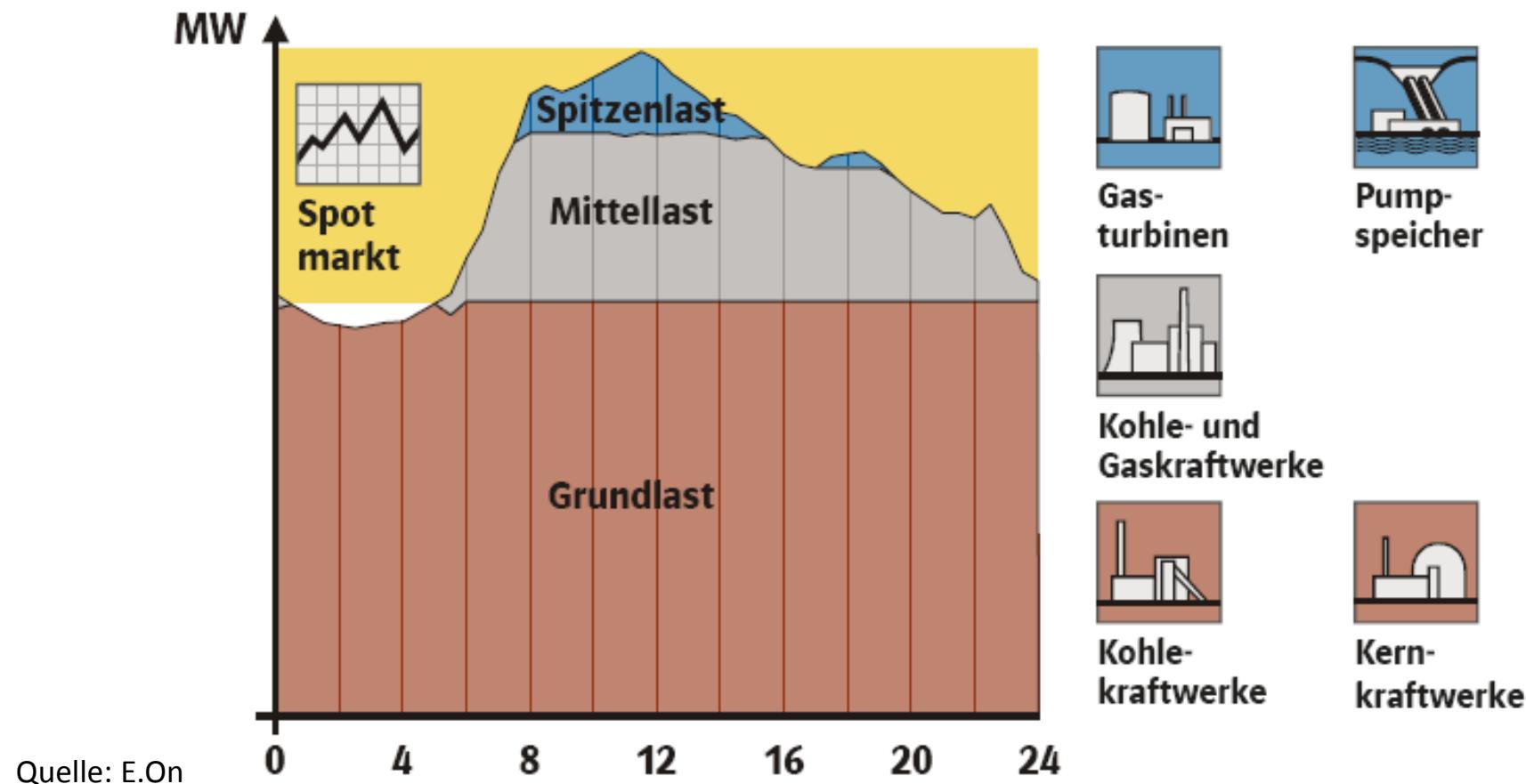


Quelle: [www.netzentwicklungsplan.de](http://www.netzentwicklungsplan.de)

# Bislang: Netzbelastung und Kraftwerkseinsatz sind prognostizierbar



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

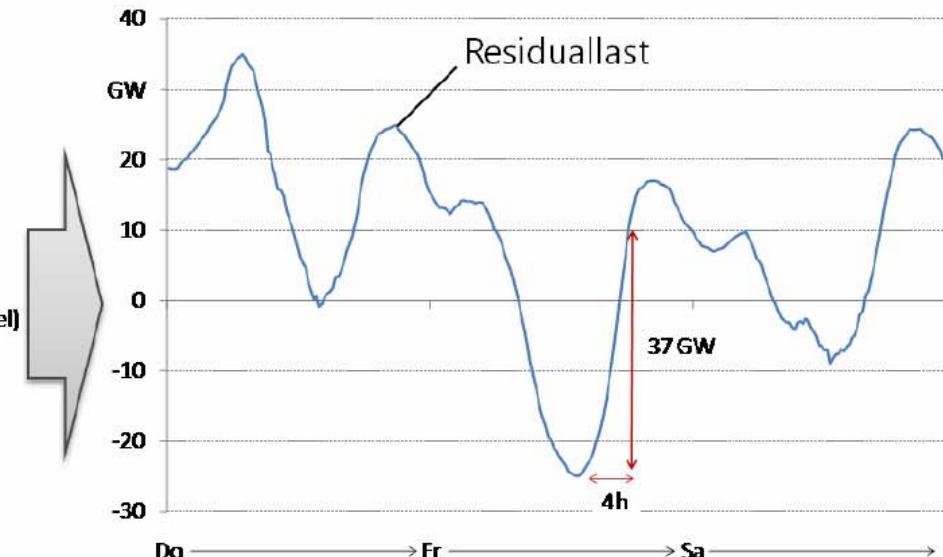
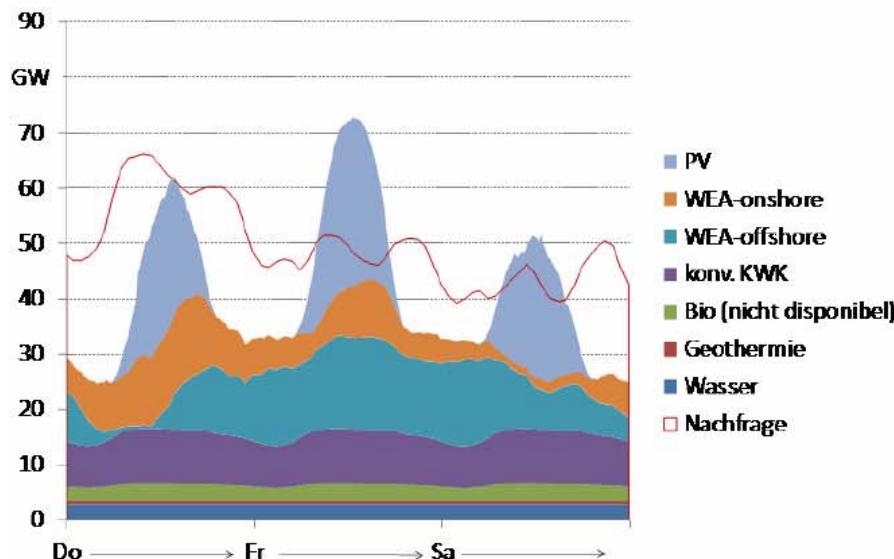
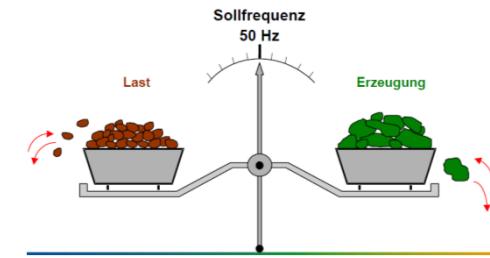


# Zukünftig: Eine erhöhte Kraftwerksdynamik wird gefordert



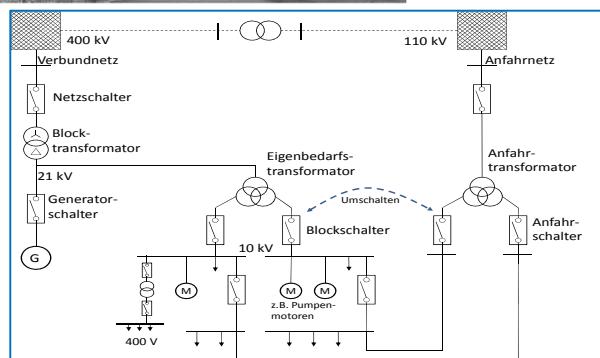
Beispielhafter Verlauf der Erzeugung aus erneuerbaren Energien und Nachfrage (links)

→ resultierende Residuallast (rechts)



Quelle: Studie Consentec, 2011

# Zukünftige Anforderungen an die thermischen Kraftwerke



Quelle: Oeding/Oswald, Elektrische Kraftwerke und Netze, 7. Auflage 2011, Springer-Verlag, Berlin und Heidelberg.

- Hohe Laständerungsgeschwindigkeit (Gradienten)
- Niedrige Mindestlast
- Häufiges An- und Abfahren
- Hohe Wirkungsgrade im Teillastbereich

## Heute sind Kraftwerke optimiert auf

- Max. Leistung
- Max. Wirkungsgrad
- Max. Lebensdauer
- Min. Betriebskosten
- Min. Emissionen

# DAS ENERGIEVERSORGUNGSNETZ FÜR DIE ENERGIEWENDE



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## AC-ÜBERTRAGUNGSTECHNOLOGIEN

# Übertragungstechnologien

## 380-kV-Freileitung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

### 380-kV-Freileitung

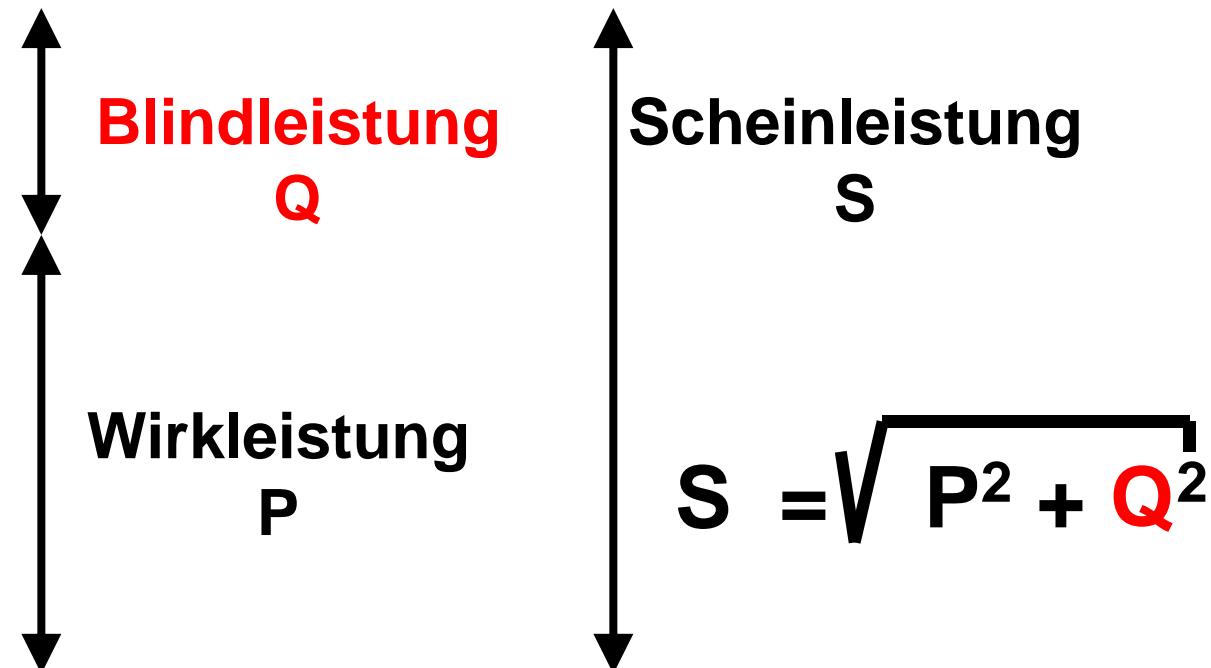
- 1,8 bis 2,5 GVA (je System)
- Schutzstreifen 2 \* 40m
- Geringe Trassenpflege
- ca. 1 Mio. €/km (Doppelsystem)

- + Betriebserfahrungen seit 70 a
- + Hohe Verfügbarkeit (AWE)
- + Robust / Überlastbarkeit
- + Lange Nutzungsdauern 80 a

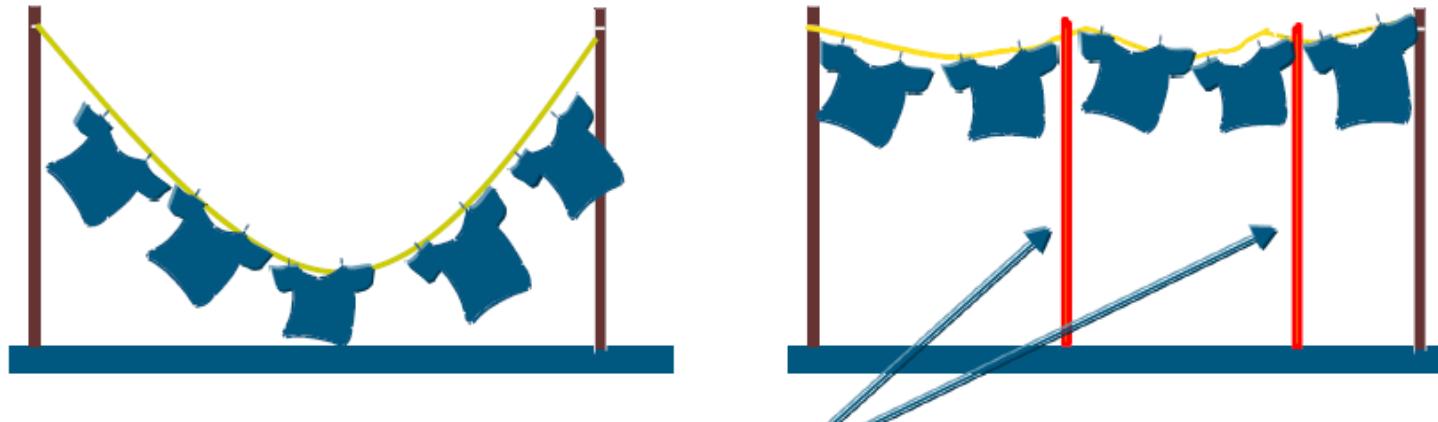
- Sichtbarkeit → Akzeptanzprobleme
- Atmosphärische Beeinflussung



# Leistungsbegriffe



# Spannungsprofil einer Freileitung bei hohen Leistungsübertragungen



- Durchhang
- Anzahl der Wäschestücke
- Pfosten (braun)
- Stützer (rot)  
"Systemdienstleistungen"
- Wäsche darf den Boden nicht berühren
- Abstand der Wäsche zum Boden

- = Spannungsprofil
- = Übertragungsleistung
- = Kraftwerke im Betrieb
- = zusätzliche Blindleistungskompensationseinrichtungen (Kondensatoren oder FACTS)
- = "Stabilitätskriterium"
- = Abstand zur Stabilitätsgrenze

# Übertragungstechnologien

## 750-kV-Freileitung



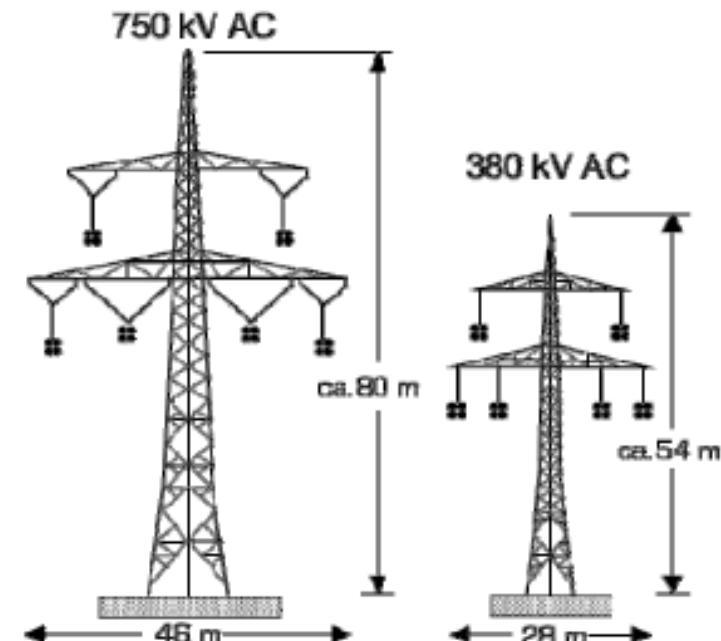
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

### 750-kV-Freileitung

- 5,0 bis 7,0 GVA (je System)
- zusätzliche Transformatoren
- Schutzstreifen 2 \* 45m

- + Betriebserfahrungen im Ausland
- + Hohe Verfügbarkeit (AWE)
- + Überlastbarkeit

- Sichtbarkeit → Akzeptanzprobleme
- Systemintegration



# Übertragungstechnologien

## 380-kV-Kabel



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

### 380-kV-Kabel

- ca. 1,0 GVA (je System)
- max. ca. 50 km möglich
- Kabelgraben ca. 15m + Muffenbauwerke
- Trassenpflege
- *Kosten 4 - 10-fach gegenüber Freileitungen*



Quelle: ABB

- + Geringe Sichtbarkeit
- + Wartungsfreiheit (quasi)
- + Atmosphärische Unabhängigkeit

- Hohe Investitionskosten
- Geringe Überlastbarkeit  
→ schwieriger Systembetrieb
- Anpassung Schutzsystem
- Geringe Betriebserfahrungen
- Bodenaustrocknung, Muffen

# Stichworte zu "Kabel"



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Cross-Bonding und  
Muffenboxen für AC-Kabel



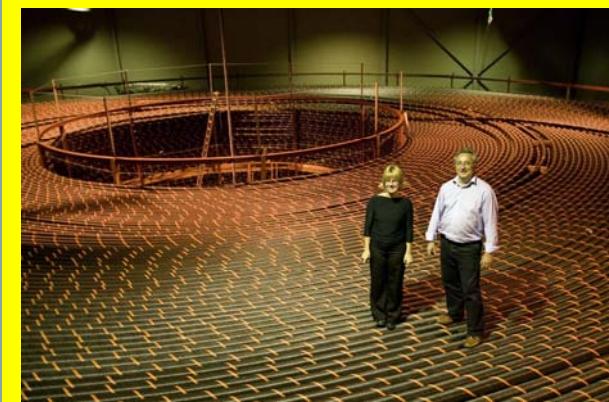
**Kirchhoff'sche Regel:**  
"Der Strom nimmt  
den Weg des geringsten  
Widerstandes"



Quelle: ABB



Muffen für Land-  
und Seekabel



# Übertragungstechnologien

## Gasisolierte Leitungen (GIL)



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

### 380-kV-Gasisolierte Leitung

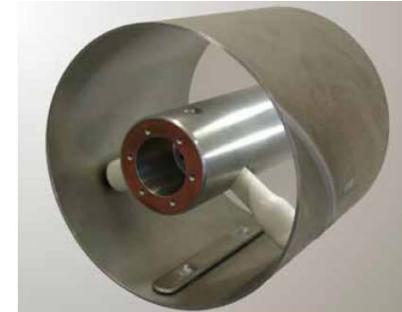
- ca. 3 GVA
- Isoliermedium Treibhausgas
- Verlegung in Erde oder Tunnel
- *Kosten 6 - 12-fach gegenüber Freileitungen*

- + Übertragungsleistung
- + Gleches Betriebsverhalten wie eine Freileitung
- + Geringe Trassenbreite

- Hohe Investitionskosten
- Geringe Impedanz → Parallelbetrieb zur Freileitung schwierig
- Wenig Betriebserfahrungen,
- bislang nur kurze Strecken (<1km) realisiert



Quelle: Amprion



Quelle: Siemens

# Bewertungskriterien für den Vergleich von Übertragungstechnologien



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Technische Eigenschaften

- Bautechnik
- Bauzeit
- Verfügbarkeit – Lieferung
- Lebensdauer
- Betriebserfahrung
- Aufwand für Störungsbeseitigung
- Entwicklungspotenziale bis 2020

## Wirtschaftlichkeit

- Investitions-, Betriebs- und Verlustkosten

## Umwelteinwirkung

- Flächenverbrauch (mit Blick auf Flächenbedarf, Trassenbreite, Nutzungseinschränkungen für die Trasse)
- Ökologische Auswirkung (hinsichtlich Störung des Vogelflugs, Einschränkungen bei einer Bepflanzung, Gefahr der Bodenaustrocknung)
- Ökologische Auswirkungen im Fehlerfall (hinsichtlich einer Gefährdung der Umwelt durch Austritt umweltschädlicher Stoffe)
- Beeinträchtigung des Landschaftsbildes (visuelle Wirkung wie z.B. die optische Zerschneidung des Landschaftsbildes)
- Akzeptanz

## Systemverhalten/Systemkompatibilität

- Blindleistungsverhalten
- Verhalten im Störungsfall (Redundanz des Systems)
- Auswirkungen auf das Kurzschluss-Niveau
- Möglichkeit der Vernetzung mit dem vorhandenen Drehstrom-System
- Thermische Zeitkonstante
- Fähigkeit zur Lastflusssteuerung
- Beeinflussung der Systemstabilität (Regelbarkeit, Spannungsstabilität)

Quelle: dena-Netzstudie

# Freileitung, Kabel, GIL

## Schlussfolgerungen



- Aus technischer Sicht bestimmen **Leistung, Übertragungslänge und Topographie** entscheidend die Ausführungsform und damit die Kosten.
- Allgemein gültige Entscheidungskriterien sind wegen der **Mannigfaltigkeit der einflussgebenden Parameter** praktisch unmöglich.
- Für den Entscheid - Freileitung oder Untergrund - ist projektbezogen eine Abwägung zwischen den **Kosten und den nicht monetisierbaren Kriterien** zu treffen.
- Die Wahl der Betriebsart - **AC oder DC** – hat im Wesentlichen technische Aspekte, sie spielt aber für die nicht monetisierbaren Kriterien eine untergeordnete Rolle.

# DAS ENERGIEVERSORGUNGSNETZ FÜR DIE ENERGIEWENDE



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## DC-ÜBERTRAGUNGSTECHNOLOGIEN

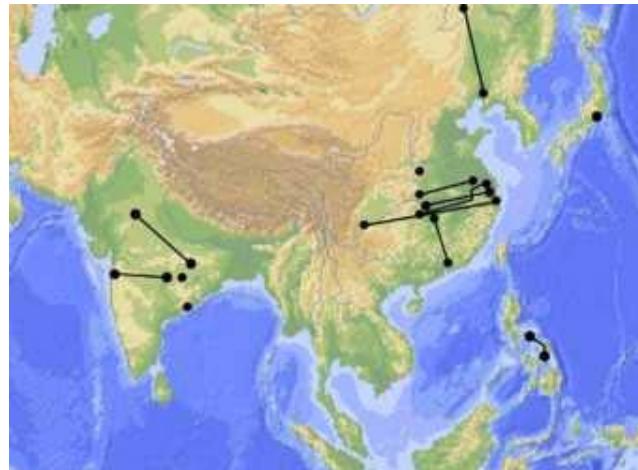
# Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)

## Effiziente Fernübertragung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

HGÜ-Projekte von  
ABB in Asien



HGÜ-Projekte von  
ABB in Europa



Quelle: ABB

### ▪ Vorteile:

- Geringe Verluste (Gleichstrom)
- Geringer Flächenbedarf
- Keine Längenbeschränkung, keine Stabilitätsprobleme
- Kabel über große Entfernung einsetzbar, da kein Blindleistungsbedarf

### ▪ Nachteile:

- Basiskosten für Umrichterstationen  
⇒ erst bei größeren Entfernungen wirtschaftlich interessant (auf See: ab ca. 80 km, an Land ab mehreren 100 km)
- Punkt-zu-Punkt-Verbindung (aber: selbst-geführte HGÜ vermaschbar)



- **Klassische Anwendungsbereiche**

- Asynchrone Verbindung verschiedener Drehstromnetze
- Weiträumiger Leistungstransport
- Elektrische Seekabelverbindungen

HGÜ classic



- **Neue Anwendungsbereiche**

- Anbindung von Offshore-Windparks
- Verstärkung und Stabilisierung bestehender Drehstromnetze durch parallelen Betrieb von HGÜ-Systemen (hybride Netze)

VSC-HGÜ

Quelle: ABB

# HGÜ-Technik

## Zwei Lösungen für unterschiedliche Anforderungen



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



### Netzgeführte HGÜ (HGÜ Classic)

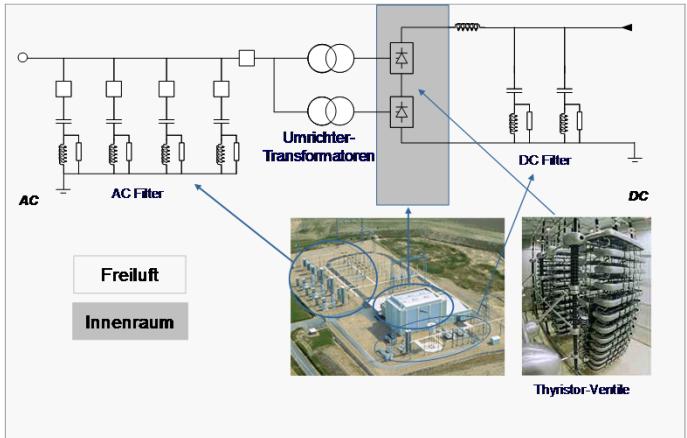
- Leistungsbereich: 300 – 6.400 MW
- Thyristor-Technik
- Freileitung oder Massekabel
- Leistungsregelung
- Fernübertragung großer Leistung



### Selbstgeführte HGÜ (VSC-HGÜ)

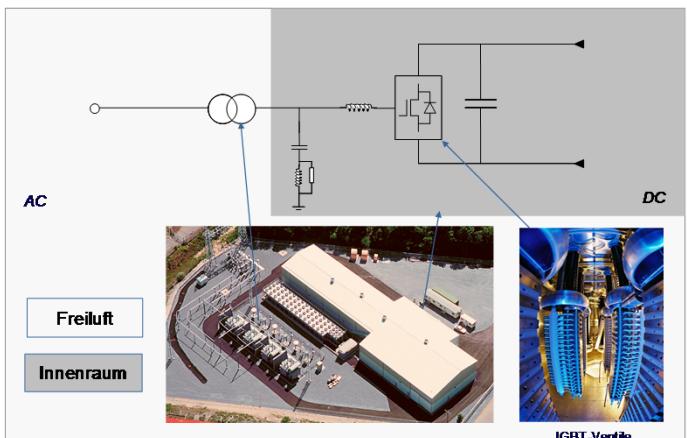
- Leistungsbereich: 200 – 2.400 MW
- IGBT-Technik
- VPE-Kabel oder Freileitung
- Leistungsregelung
- Vielfältige Anwendungen
- "Einfache" Realisierung von DC-Netzen

# HGÜ Classic und VSC-HGÜ Aufbau



## ▪ Netzgeführte HGÜ (HGÜ Classic)

- Thyristor-Technik
- Gleichstromzwischenkreis
- DC-Glättungsdrossel
- Stromrichtertransformator
- AC-Filter für Oberschwingungen (u. Blindleistung)



## ▪ Selbstgeführte HGÜ (VSC-HGÜ)

- IGBT-Technik
- Gleichspannungzwischenkreis
- DC-Kondensator
- AC-Glättungsdrossel
- (AC-Filter für Oberschwingungen)

Quelle: ABB

# HGÜ Classic und VSC-HGÜ Systemverhalten



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



600 MW, 200 x 120 x 22 m

- **Netzgeführte HGÜ (HGÜ Classic)**
- Induktiver Blindleistungsbedarf
- Kurzschlussleistung / stabiles Netz wird benötigt
- Minimaler Leistungsfluss erforderlich
- Leistungsflussumkehr nur mit Verzögerung bei Kabelsystemen
- Filterschaltungen notwendig bei sich ändernder Wirkleistung



550 MW, 120 x 50 x 11 m

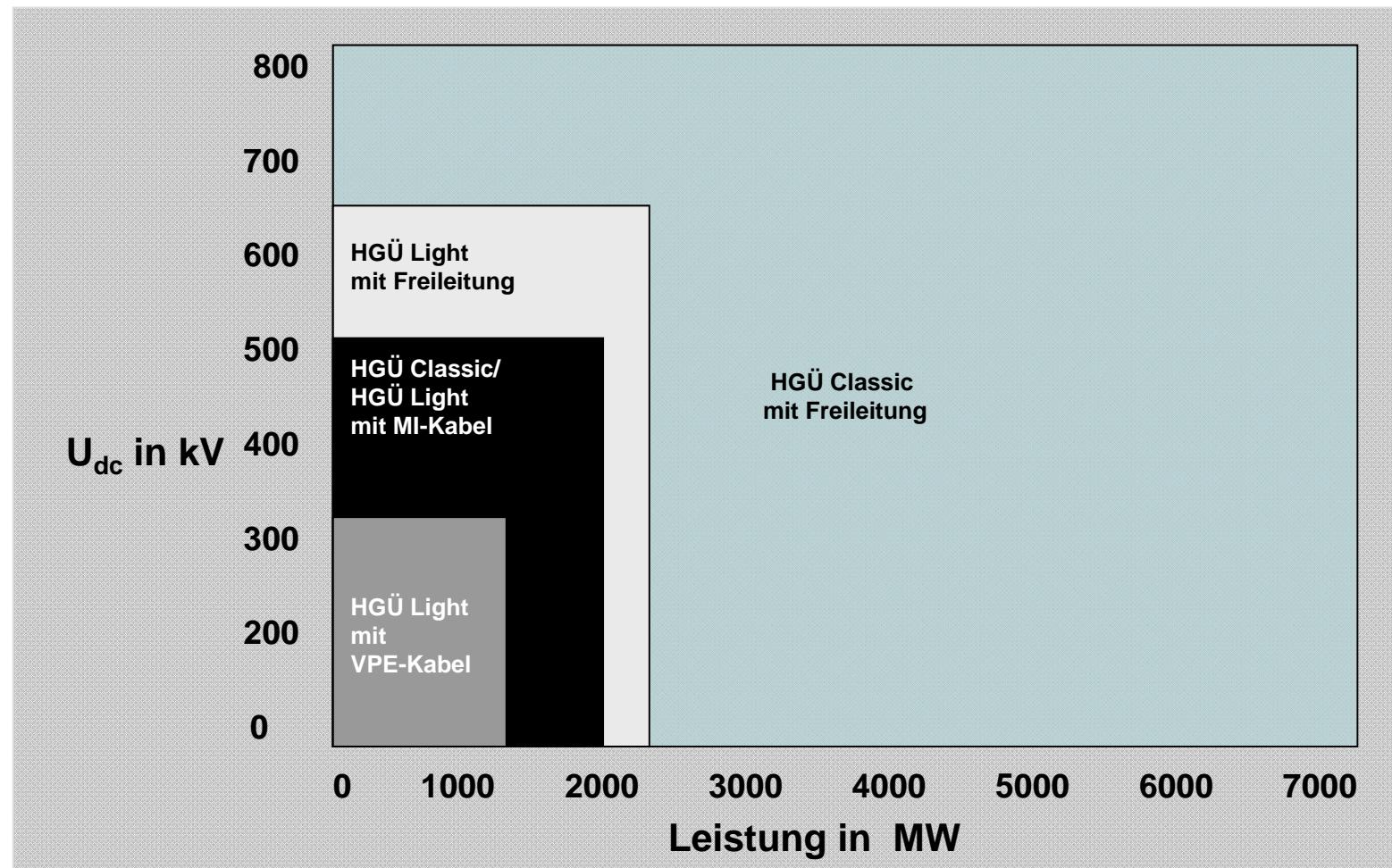
Quelle: ABB

- **Selbstgeführte HGÜ (VSC-HGÜ)**
- Unabhängige Blindleistungsregelung
- Benötigt keine Kurzschlussleistung
- Jeder Wirkleistungsfluss einstellbar
- Sofortige Leistungsflussumkehr
- Keine Filterschaltungen notwendig

# Einsatzbereiche HGÜ

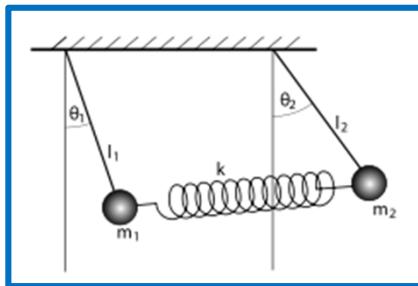


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: ABB

# Gleichspannungsnetze



## Kernfragen:

- Wie viel Schwungmasse braucht das Netz?
- Schutzkonzepte für die Beherrschung von Fehlern auf der Gleichstromseite
- Zusammenwirken eines Overlay-Netzes mit dem Drehstromnetz:
  - Hybrides AC-/DC-Netz
  - Überlagertes DC-Netz
- Neue Regelungsstrategien:
  - Leistungsregelung
  - Primärregelung  
(Definition "Führungsgröße")
  - Einfluss Massenträgheit



Quellen: Dii, Airtricity

# DAS ENERGIEVERSORGUNGSNETZ FÜR DIE ENERGIEWENDE



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## DC-ÜBERTRAGUNGSTECHNOLOGIEN PROJEKTBEISPIELE

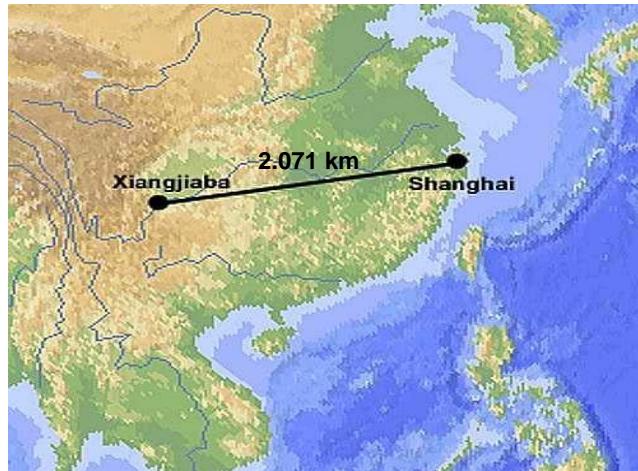
# Klassische HGÜ – Projektbeispiel

## UHVDC-Verbindung Xiangjiaba – Shanghai, China



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Nutzung der Wasserkraft zur Stromerzeugung in großer Entfernung von den Verbrauchszentren (Shanghai).



1-Phasen-Umrichter-Transformator.  
Nennscheinleistung:  
 $S_N = 297 \text{ MVA}$   
Nennspannungen:  
 $U_N = 515/158 \text{ kV}$   
Abmessungen:  
10,85 x 3,5 x 4,85 m  
(L x B x H)  
Gewicht: 260 t  
12 Stck. pro Pol



Quelle: ABB

- Leistung: 6.400 MW
- DC-Spannung:  $\pm 800 \text{ kV}$
- DC-Strom: 4.000 A
- Distanz: 2.071 km
- Verluste: < 7 %  
(Gesamtsystem)

Gründe für die Verwendung von HGÜ:

- Große Übertragungsdistanz
- Große Übertragungsleistung
- Kompaktheit: 40 % weniger Landverbrauch als bei einer Drehstromübertragung

# 800 kV DC Mauerdurchführung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: ABB

# Xiangjiaba – Shanghai, China Fengxian während des Baus



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: ABB

# Klassische HGÜ – Projektbeispiel Seekabelverbindung NorNed



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Asynchrone Ver-  
bindung der Dreh-  
stromnetze von  
Norwegen und den  
Niederlanden.



NorNed-Seekabel.  
Leiter: 2 x 790 mm<sup>2</sup>  
Kupfer  
Isolierung: Masse-  
imprägnierte Papier  
Abmessungen:  
217 x 136 mm  
Gewicht: 84 kg/m



Quelle: ABB

- Leistung: 700 MW
- DC-Spannung:  $\pm 450$  kV
- Distanz: 580 km  
(Kabel gefertigt und verlegt in Teilstücken bis 150 km Länge, Gesamtgewicht 47.000 t)
- Wassertiefe bis zu 410 m
- Verluste: < 4 %  
(Gesamtsystem)

Gründe für die Verwendung von HGÜ:

- Lange Seekabelverbindung
- Kopplung asynchroner AC-Netze
- Steuerbarer Leistungsfluss  
(Stromhandel)

# Netzanschluss Offshore-Windpark BorWin 1



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: ABB

Bemessungsleistung	400 MW
Länge Seekabel	125 km
Länge Landkabel	75 km

Einbindung in das 400-kV-Netz  
zur Erfüllung des Grid Code  
Erweiterbares Konzept Offshore

Einfache Betriebsweise  
Vermeidung von Schalthandlungen  
Blindleistungskompensation für Leerlauf  
Einfache Windparkregelung, z.B.  
konstanter Leistungsfaktor  
der WEA  
MS-Spannungsregelung

# BorWin 1: Umrichterstationen und Landkabellegung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Links: Absetzen der Plattform auf dem Sockel (Jacket) durch den „Thialf“, einem der weltweit größten Schwimmkräne.  
Rechts: Blick in den HGÜ-Ventilraum auf der Plattform.



Links: Verlegung des HGÜ-Landkabels  
Leiter: 2.300 mm<sup>2</sup> Al  
Isolierung: Vernetztes Polyethylen (VPE)  
Durchmesser: 96mm<sup>2</sup>  
Gewicht: 11 kg/m  
Verlegetiefe: 1-1,5 m  
Fertigungslänge:  
750 m pro  
Kabeltrommel  
Rechts: Herstellung der Erdkabelmuffen in einem speziellen Container („Muffenhaus“).



Quelle: ABB

# DAS ENERGIEVERSORGUNGSNETZ FÜR DIE ENERGIEWENDE



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

# DER DEUTSCHE NETZENTWICKLUNGSPLAN 2012

# Netzentwicklungsplan

## Ein Blick zurück



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- **2005: dena-Netzstudie-I**
  - Feststellung des Bedarfs von 850 km neuen Höchstspannungsleitungen bis 2015 (2011: 100 km gebaut)
- **2006: Infrastrukturplanungsbeschleunigungsgesetz**  
(Infra StrPlanBeschlG)
  - Beschleunigung der Planungs- und Genehmigungsverfahren
- **2009: Gesetz zum Ausbau von Energieleitungen**  
(Energieleitungsausbauigesetz - EnLAG)
  - Festlegung des Bedarfs an vordringlichen Übertragungsleitungen in einem gesetzlichen Bedarfsplan
- **2010: dena Netzstudie II**
  - Feststellung des Bedarfs von ca. 3.600 km zusätzlichen Leitungen bis 2020

# Netzentwicklungsplan

## Ein Blick zurück, *Forts.*



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- **28.09.2010:** Energiekonzept 2050 der Bundesregierung
- **15.03.2011:** Kernkraftmoratorium nach dem Reaktorunfall in Fukushima, Japan
- **30.05.2011:** Beschluss der Bundesregierung über den **Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022** und den systematischen Ausbau der Erneuerbaren
- **06.06.2011:** **Kabinettsbeschluss zur Beschleunigung der Energiewende**
- **28.07.2011:** **Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz (NABeG):** Planfeststellung für länderübergreifende oder grenzüberschreitende Höchstspannungsleitungen durch die Bundesnetzagentur im Rahmen einer Bundesfachplanung
- **31.05.2012:** **Netzentwicklungsplan 2012**

# Netzentwicklungsplan 2012

## Beschreibung der Szenarien



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Basis des Netzentwicklungsplans sind verschiedene Szenarien der zukünftigen Erzeugungsstruktur in Deutschland:

### Szenario A 2022: "Classic"

- Moderater Ausbau EE, höherer Anteil konv. Kraftwerke.

### Szenario B 2022: "Balanced"

**Leitszenario**

- Erhöhter Ausbau EE, höherer Anteil Gas-, kleinerer Anteil Kohle-KW.

### Szenario B 2032: "Balanced"

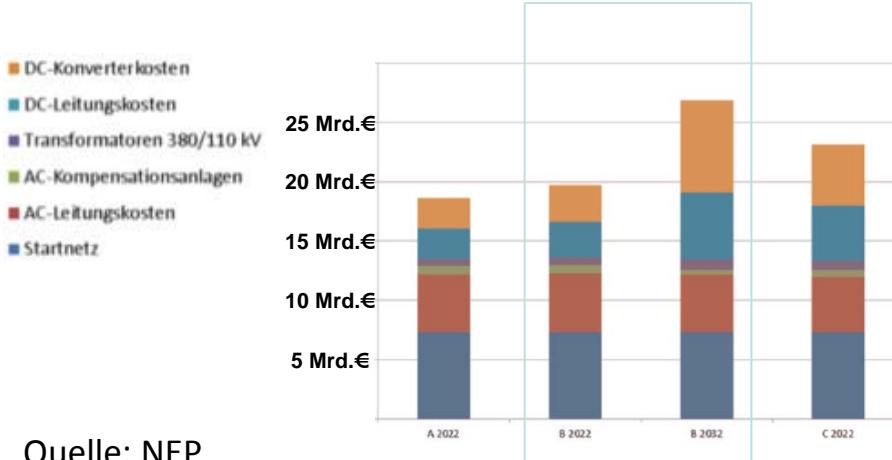
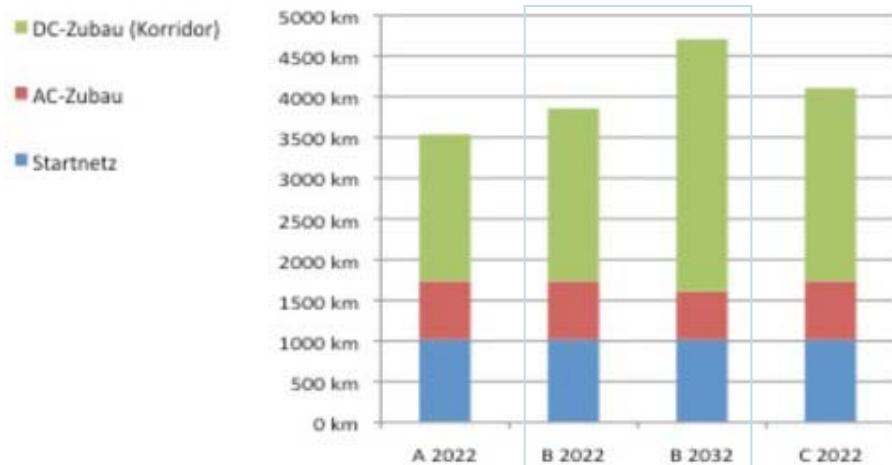
- Erhöhter Ausbau EE, höherer Anteil Gas-, kleinerer Anteil Kohle-KW.

### Szenario C 2022: "Renewable"

- Erhöhter Ausbau EE, höherer Anteil Gas-, kleinerer Anteil Kohle-KW.

# Netzentwicklungsplan 2012

## Investitionssummen der Szenarien

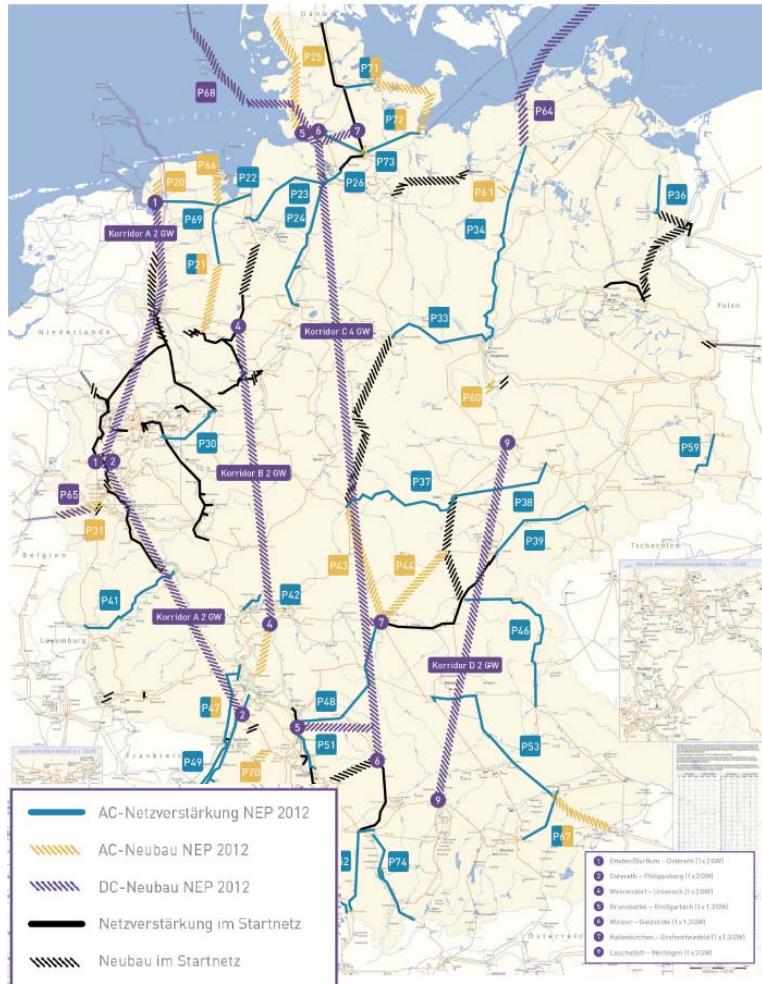


Quelle: NEP

- Erhöhter Anteil Erneuerbarer Energien führt zu einem erhöhten Bedarf an Netzausbau
- Bedarf an neuen Übertragungsstrecken liegt zwischen 3.500 und 4.000 km (vergleichbar mit dena I und II)
- Neben den EnLAG-Projekten großer Bedarf an HGÜ-Verbindungen in den nächsten 10 – 20 Jahren
- Klassische AC-Netzverstärkung ist nicht ausreichend, um das Übertragungsnetz zukünftig stabil betreiben zu können.

# Netzentwicklungsplan 2012

## Ausbau- und Verstärkungsbedarf bis 2022



**Szenario B erfordert folgende Netzausbau- und Verstärkungsmaßnahmen bis 2022:**

- 1.000 km neue 400-kV-AC-Leitungen (Projekte aus EnLAG und bereits geprüfte Projekte)
- 1.700 km Trassenneubau 400 kV
- 2.800 km Leitungsneubau 400 kV
- 1.300 km Um- bzw. Zubeseilung auf bestehendem Gestänge 400 kV
- 2.100 km HGÜ-Leitungen mit 400/500 kV, davon 300 km Umbau AC zu DC

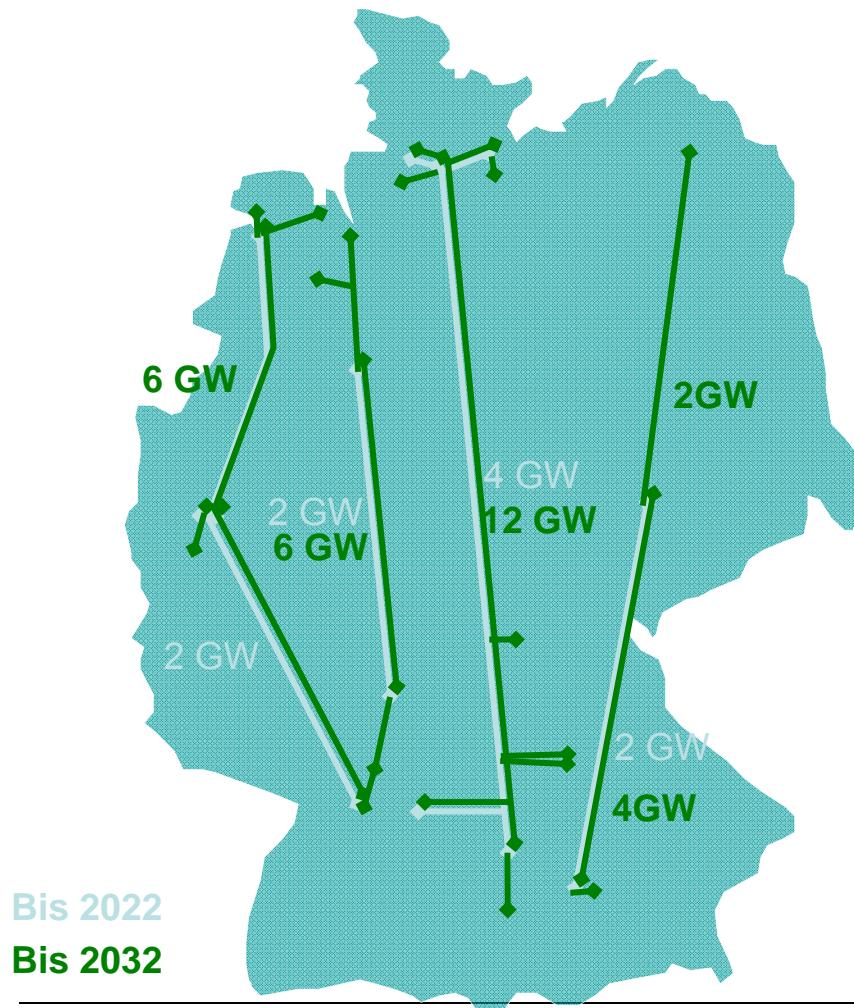
Investment:  $\approx$  20 Milliarden EUR

# Netzentwicklungsplan 2012

## HGÜ-Trassen bis 2032



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



**VSC-HGÜ gewählt, um AC-Netzausbau zu minimieren und Blindleistungsbedarf zu bedienen**

### **HGÜ-Verbindungen bis 2022:**

- 7 HGÜ-Systeme in vier Korridoren
- 11,9 GW – zusammengesetzt aus 2-GW- und 1,3-GW-Blöcken
- 2,120 km neue DC-Strecken inkl. 300 km Umbau AC zu DC

### **Zus. HGÜ-Verbindungen bis 2032:**

- 8 HGÜ-Systeme in den vier existierenden Korridoren
- 17,9 GW – zusammengesetzt aus 2-GW- und 1,3-GW-Blöcken
- 980 km neue DC-Leitungen

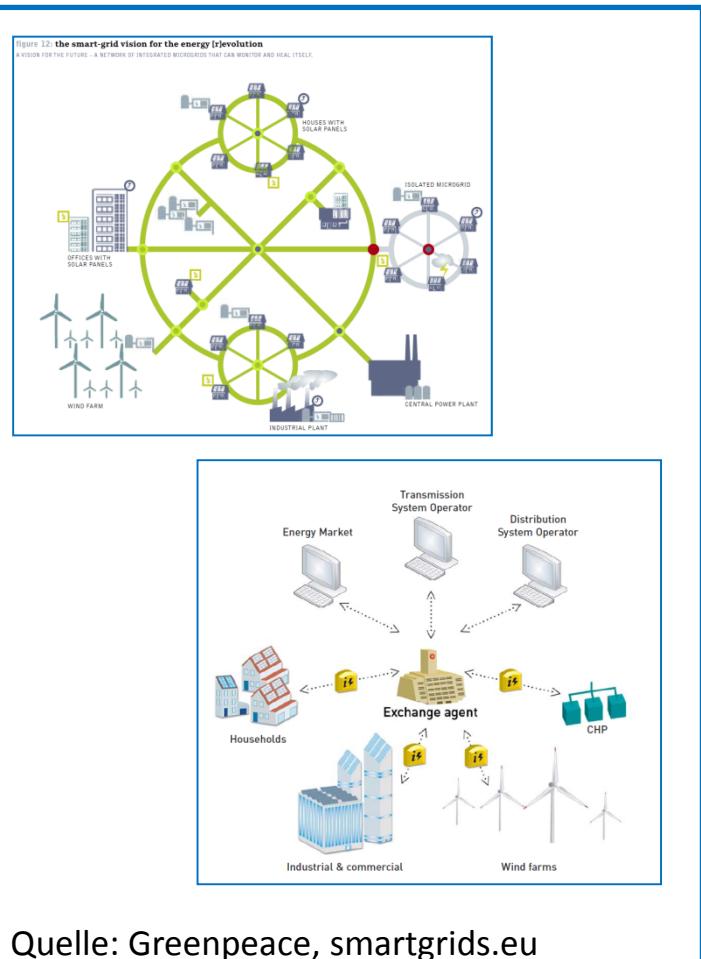
# DAS ENERGIEVERSORGUNGSNETZ FÜR DIE ENERGIEWENDE



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## HERAUSFORDERUNGEN DER VERTEILNETZE

# Leistungsumkehr im Verteilnetz



Kernthema:  
Integration fluktuierender dezentraler  
Erzeugungsanlagen

Ziel:  
Definition neuer Planungskriterien für  
Verteilnetze:

"Wie sieht das optimale Verteilnetz der  
Zukunft aus?"

Technische Details:

- **Spannungsprobleme**
- **Netzschutzkonzepte**
- Netzführungskonzepte
- "Virtuelle Kraftwerke"
- Systemdienstleistungen
- Einsatz von Speicherlösungen



## Netzqualität

- Spannungsregelung bei verteilten Energiequellen mit schwankender Einspeiseleistung
- Bedämpfung von Oberschwingungen bei Einsatz von Leistungselektronik
- Energiespeicher

## Automatisierung

- Kommunikationsinfrastruktur in Mittelspannungsnetzen für die Einbindung von Ortsnetzstationen
- Inselbildung und Resynchronisierung
- Lastmanagement
- Autarke Netzstrukturen

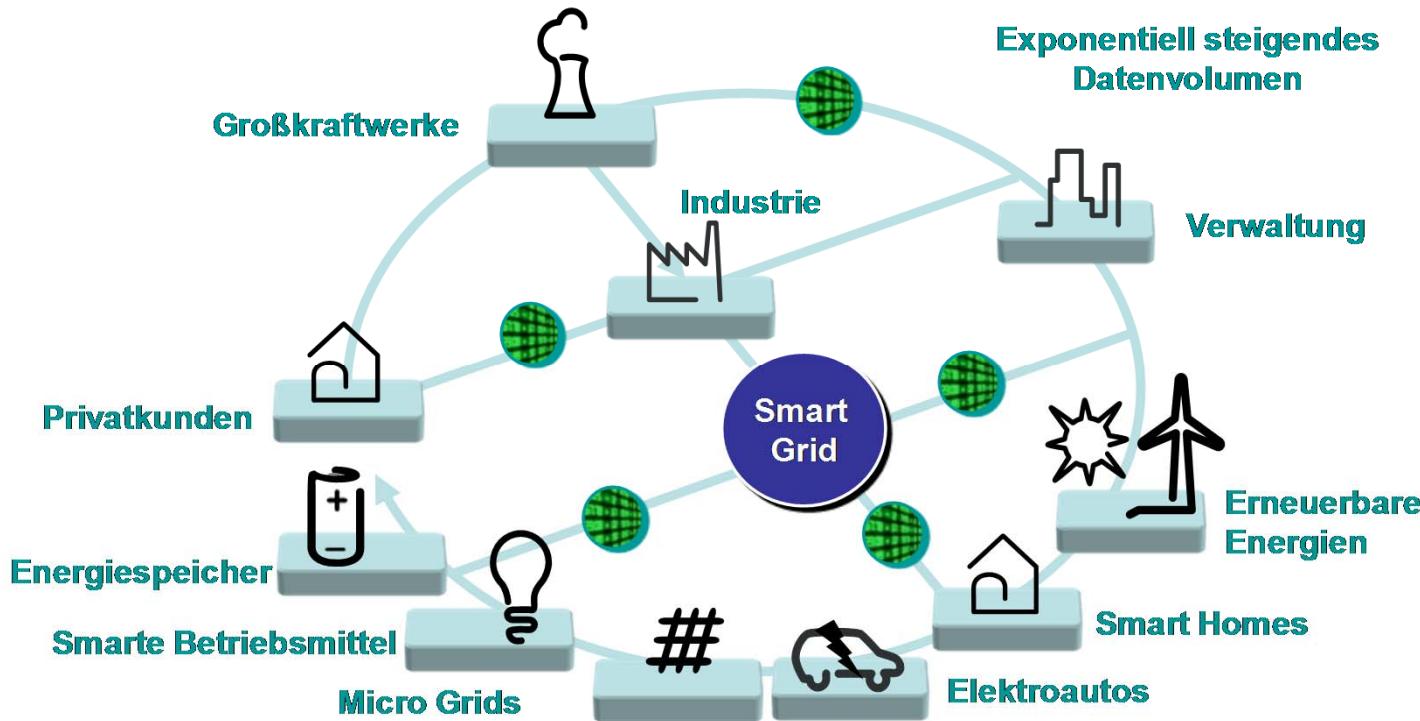
## Schutzkonzepte

- Spannungsstabilität z.B. Blindleistungsrichtungs- Unterspannungsrelais
- Gerichteter Schutz

## Betriebsmittelauslastung

- Bessere Nutzung vorhandener Betriebsmittel

# Systemführung im "Digitalen Zeitalter"



- Aufteilung der Erzeugung zentral / dezentral
- Aggregierte Regelung und verbesserte Koordination
- Vereinfachte Integration in das Netz und den Markt

# DAS ENERGIEVERSORGUNGSNETZ FÜR DIE ENERGIEWENDE



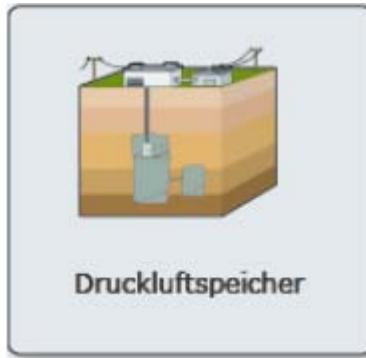
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## SPEICHERTECHNOLOGIEN

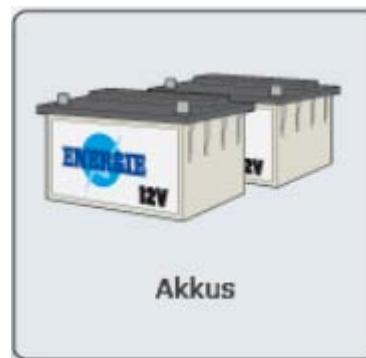
# Speichertechnologien



Pumpspeicherwerk



Druckluftspeicher



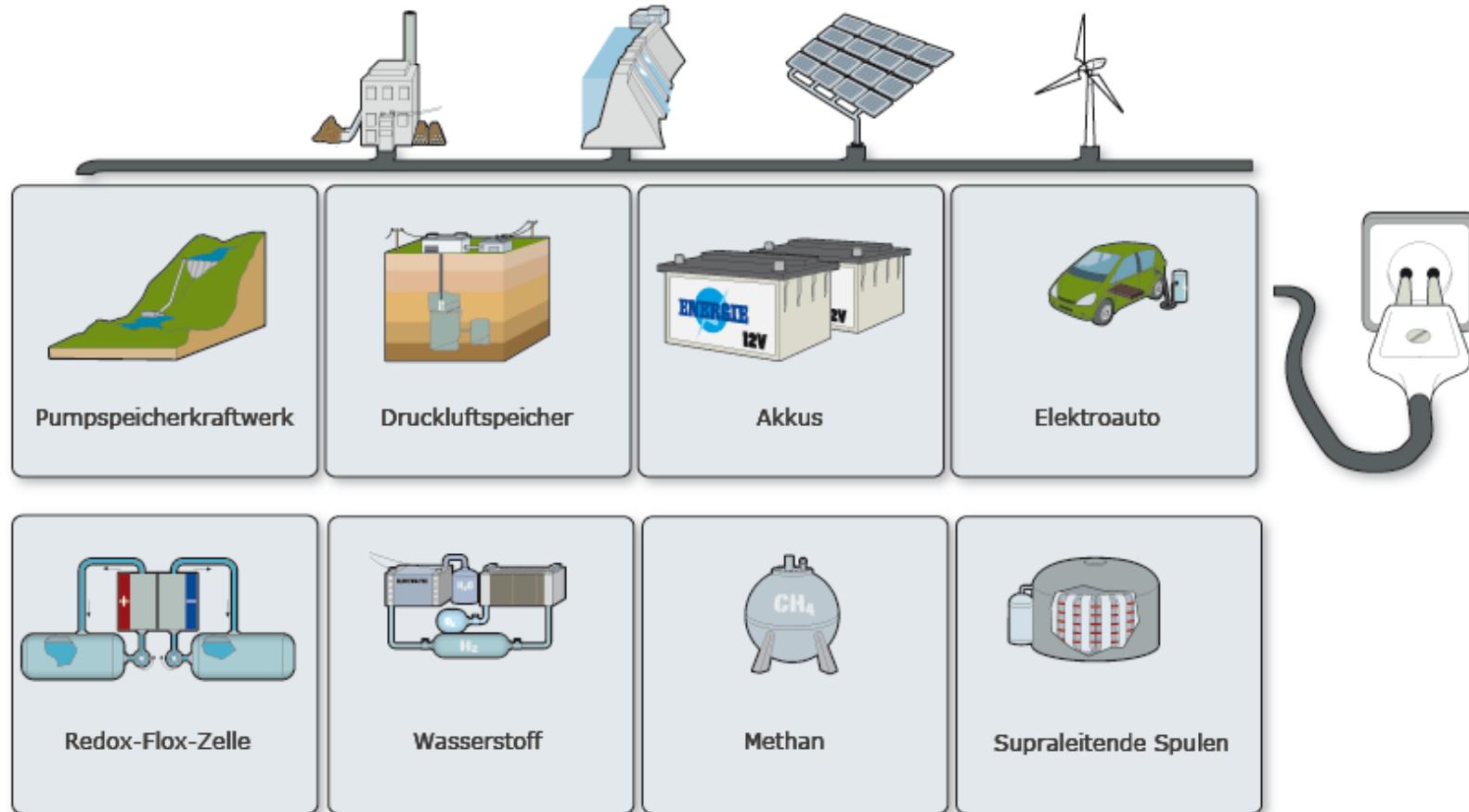
Akkus



Methan

- Effektive Speicherung
- Geologisches & geografisches Potential beschränkt
- 0,04 TWh Speicherkapazität
- Geologisches & geografisches Potential beschränkt
- Anlagen befinden sich noch im Versuchsstadium
- Dienen nur der kurzfristigen Speicherung von Strom
- Erdgasnetz als EE-Methanspeicher
- 210 TWh Speicherkapazität

# Speichertechnologien



Quelle: <http://www.wiwo.de/infografiken/infografik-stromspeicher-energie-auf-abruf/5501954.html>

# Zusammenfassung: Fragestellungen einer VDE-Studie



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

**Im Netz muss jederzeit die Leistung aller Erzeugung der Leistung der Summe aller Verbraucher entsprechen.**

- Wie sieht ein sicherer und stabiler Netzbetrieb bei überwiegend fluktuierenden Einspeisungen aus Wind und PV aus ?
- Können alle thermischen Kraftwerke abgeschaltet werden und nur mit Wind und PV das Netz geregelt werden ?
- Wie viel Energie kann wie lange gespeichert werden – sind die Speicherkapazitäten nach Leistung und Energie ausreichend ?
- Welche neuen Aufgaben kommen auf die thermischen Kraftwerke zu und wie können diese erfüllt werden ?

**VDE-Studie: Erneuerbare Energie braucht flexible Kraftwerke – Szenarien bis 2020**

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

