



Elektrische Energietechnik – Schlüsseltechnologie der Zukunft

Andreas Binder
Elektrische Energiewandlung



Volker Hinrichsen
Hochspannungstechnik



TU Darmstadt

abinder@ew.tu-darmstadt.de
hinrichsen@hst.tu-darmstadt.de

Warum eine Veranstaltung zur

Elektrischen Energie ?

Sie ist

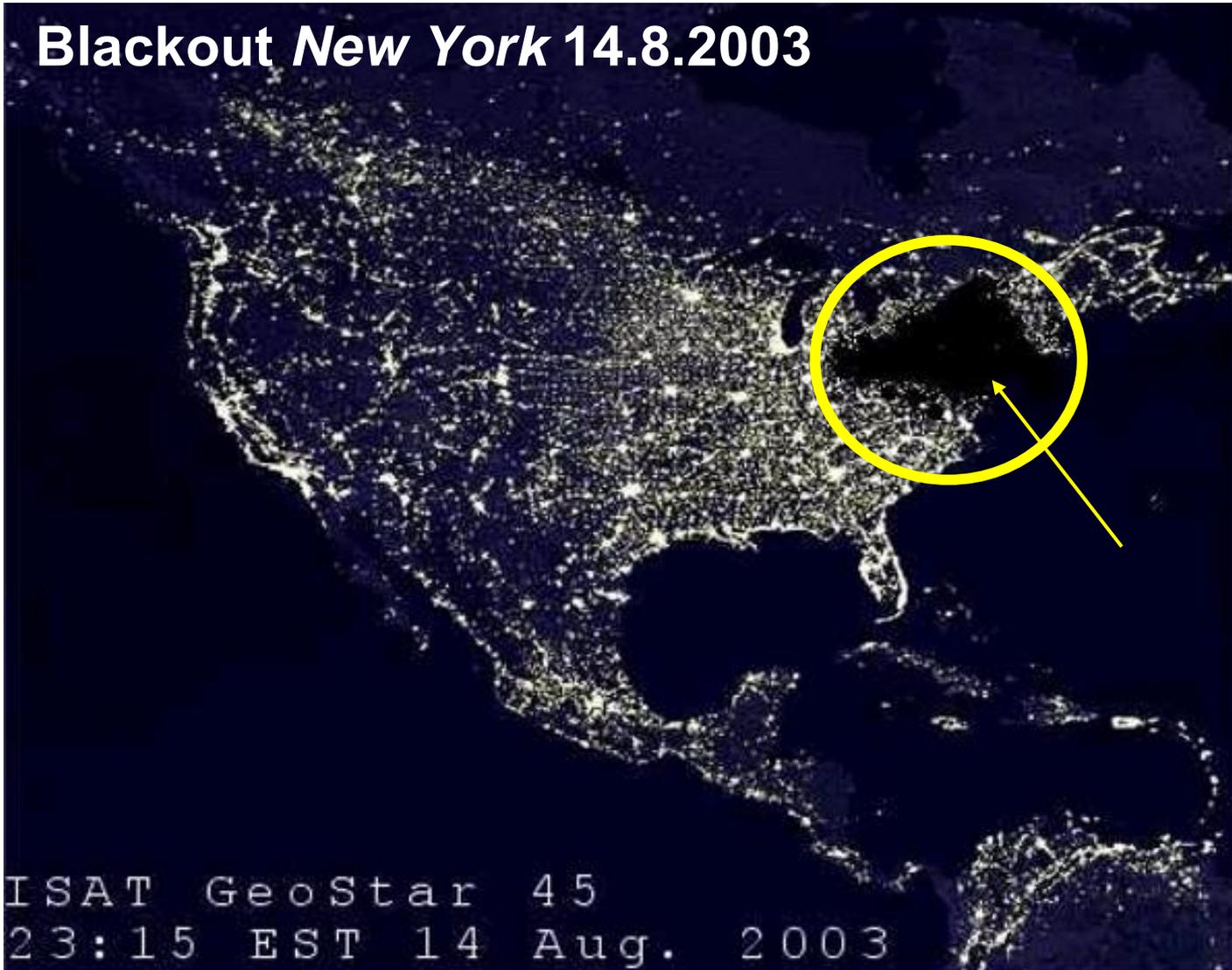
„die“

Schlüsseltechnologie unserer Zukunft !

Elektrische Energietechnik ist „die“ Schlüsseltechnologie der Zukunft, denn sie

- ist nahezu universell einsetzbar,
- hat noch ungehobenes Nutzungspotential,
- ist eine der Säulen unseres Wohlstands,
- ist aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken,
- nimmt deshalb weltweit an Bedeutung zu.

Blackout New York 14.8.2003



Blackout *Italien* 28.9.2003



Verfügbarkeit Deutschland (2005)

- Deutschland hat weltweit die beste Verfügbarkeit elektrischer Energie
- Statistische Maßzahl: "Nichtverfügbarkeit je Einwohner und Jahr"

Nichtverfügbarkeit (Beispiele):

Deutschland: 23 Minuten / (Einwohner · Jahr)

Großbritannien: 78 Minuten / (Einwohner · Jahr)

USA: 200 Minuten / (Einwohner · Jahr)

Quelle: VDN



Wenn über **elektrische Energie** und **Klimawandel** gesprochen wird, denken viele an die Erzeugung elektrischer Energie.

Wir sprechen über die „**Energiekette**“

- **Erzeugung**,
- **Verteilung** und
- **Nutzung** elektrischer Energie

und ihren **Einfluss auf unseren Wohlstand**.

- **Grundbegriffe zur Energie**
- **Fakten zur elektrischen Energie**
- **Elektrische Energieerzeugung – heute und morgen**
- **Elektrische Energieverteilung – Herausforderungen**
- **Effiziente Nutzung elektrischer Energien**
- **Energie-Ingenieure/-innen – Zeitgemäße Ausbildung**
- **Ausblick**



Die **Energie** in einem
abgeschlossenem System
(unser Universum) ist
KONSTANT !





Energie W : 1 Wattsekunde = 1 W·s = 1 Joule = 1 J

Beispiel:

1 Liter Wasser (= 1 kg) um 1 Grad erwärmt, benötigt 4187 Ws = 1 kcal

Zeit t : 1 Sekunde = 1 s

Leistung P = „Energie pro Zeit“ $P = W / t$

1 Watt = 1 W

1 PS = 1 Pferdestärke = 736 Watt

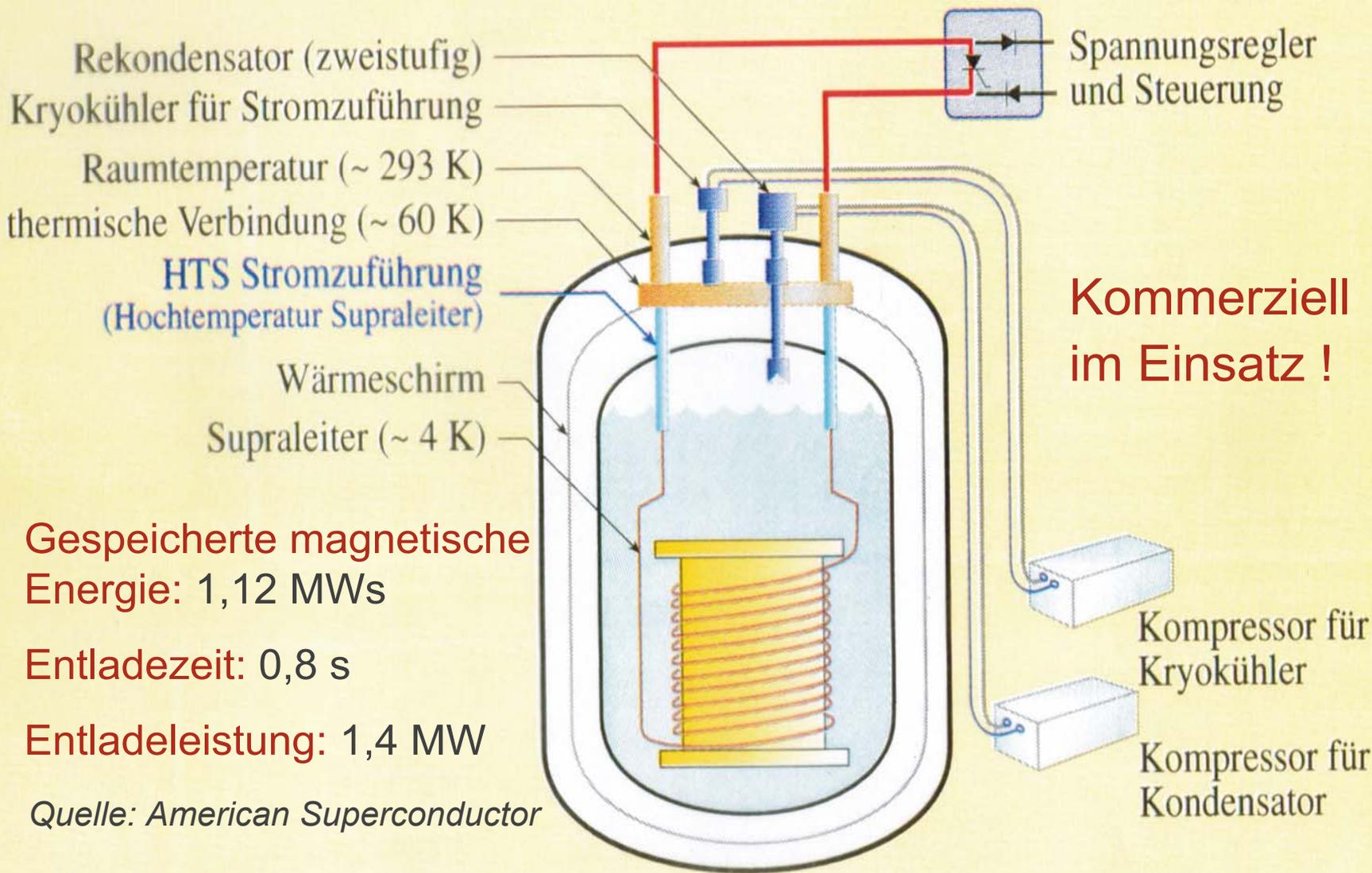
Elektr. Leistung = Strom x Spannung ($P = U \cdot I$)

Beispiel: Tauchsieder

Spannung $U = 230$ V, Strom $I = 5$ A: Leistung $230 \times 5 = 1150$ Watt



Supraleitender magnetischer Energiespeicher



**Kommerziell
im Einsatz !**

**Gespeicherte magnetische
Energie: 1,12 MWs**

Entladezeit: 0,8 s

Entladeleistung: 1,4 MW

Quelle: American Superconductor

Wirkungsgrad der Energieumwandlung

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{zugeführte Leistung}}$$

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$



Beispiel: 11-kW-Elektromotor, Wirkungsgrad 88%

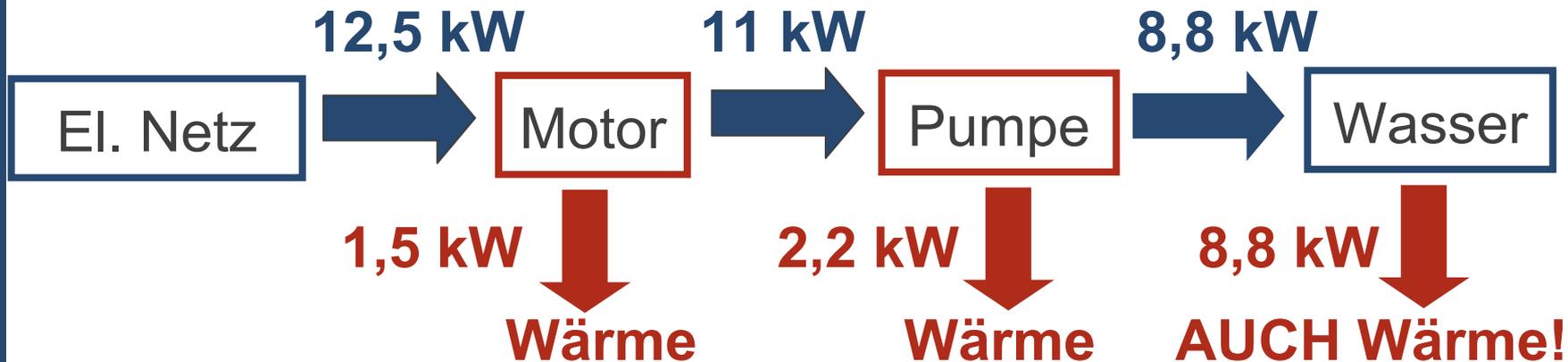
- Umwandlung von **elektrischer** in **kinetische Energie** („mechanische Energie“)
- Zugeführte Leistung: $P_{zu} = P_{ab} / \eta = 11 / 0,88 = 12,5 \text{ kW}$
- Verlustleistung: $P_{zu} - P_{ab} = 12,5 - 11,0 = 1,5 \text{ kW} = \text{Wärme!}$

Verlustenergie = Thermische Energie

Beispiel: 11-kW-Elektromotor als Pumpenantrieb

Wirkungsgrade: Motor 88%, Pumpe 80%

- Verlustleistung: Motor: 1,5 kW, Pumpe: 2,2 kW
- Betriebszeit: 1 Jahr = 8760 Stunden
- Verlustenergie Motor $W = 1500 \times 8760 = 13,14$ Mio. Wh



Wir heizen unsere Erde auf. Das CO₂ hilft uns dabei !

- Grundbegriffe zur Energie
- **Fakten zur elektrischen Energie**
- Elektrische Energieerzeugung – heute und morgen
- Elektrische Energieverteilung – Herausforderungen
- Effiziente Nutzung elektrischer Energien
- Energie-Ingenieure/-innen – Zeitgemäße Ausbildung
- Ausblick



Weltweiter Energiebedarf

1 PJ = 1 Peta-Joule = 1 000 000 Milliarden Ws = 10^{15} J

- Welt (2005): Primärenergiebedarf: 446 000 PJ
Einwohner: 6,5 Milliarden
Im Mittel in 2005: **68,6 GJ pro Einwohner**

1 GJ = 1 Giga-Joule = 1 Milliarde Ws = 10^9 J

- Energie pro Kopf: Mittelwert 68,6 GJ = 100%

USA	EU	S-Amerika	Asien	Indien
410%	220%	45%	21%	11%

- Anteil Primärenergie (Welt = 100%)

USA	Europa	China	GUS
22,2%	18,2%	14,7%	10,1%
-0,1%		+9,5%	

- Anteil Asien + Australien: 32,5% **(+5,5%)**

Große Wachstumsraten des Energiebedarfs in Asien (China, Indien), aber längerfristig auch in Afrika !

Energieträger weltweit 2005

	Erdöl	Kohle	Erdgas	Regenerativ	Kernkraft	Summe
2003	35,3%	24,1%	20,9%	13,3%	6,4%	446 000 PJ
2030	34,1%	22,9%	24,2%	14,1%	4,7%	683 000 PJ

(Quelle: Int. Energieagentur 2005)

(+ 53 %) !

- Erdölreserven: 75% in den OPEC-Ländern
- Erdöl bleibt mittelfristig erster Energieträger!

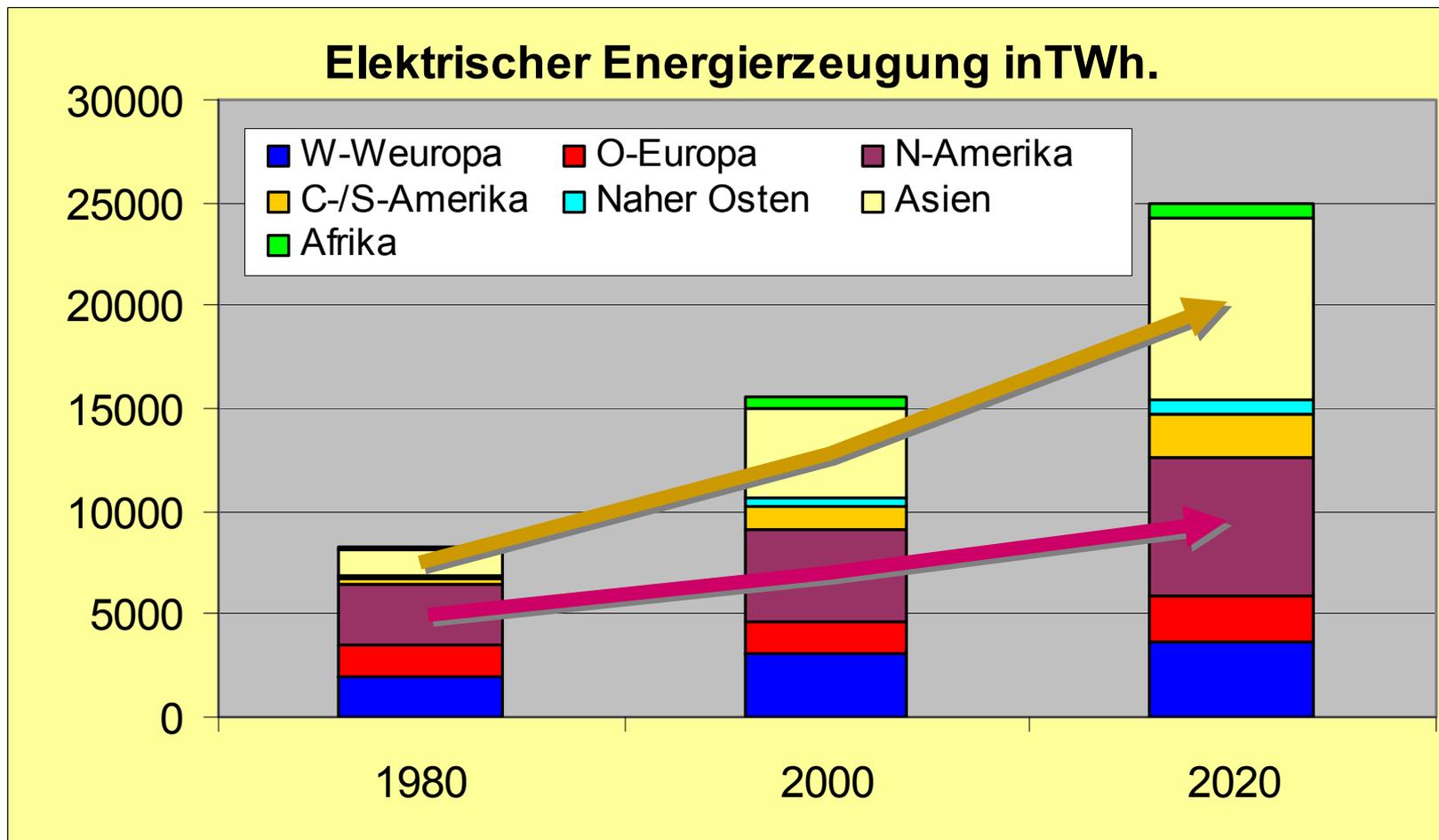
• Weltbevölkerungswachstum (in Mrd.):

1980	2000	2020
4,4 (+1,6% p.a.)	6,1 (+1,2% p.a.)	8,0 (+ 82 %) !



Elektrische Energie weltweit

Asien und Nord-Amerika werden das Welt-Energieszenario der nächsten 20...30 Jahre bestimmen !



Quelle: VDN

1 TWh = 1 Tera-Wh = 1 000 Milliarden Wh = 10^{12} Wh



Energieverbrauch 2004 Deutschland

- Bereitgestellte Endenergie: 9 240 PJ = 2 566 TWh
- Endenergieverbrauch je Einwohner (82,3 Mio.):
 $2\,566\text{ TWh} / 82\,300\,000 = \underline{31\,000\text{ kWh pro Jahr}}$
- 2 566 TWh Endenergieverbrauch in Deutschland:

Haushalt	30 %
Verkehr	28 %
Industrie	26 %
Gewerbe/Handel/Dienstleistungen	16 %

DAVON 20 % ELEKTRISCHE ENERGIE !

1 TWh = 1 Tera-Wattstunde = 1000 Milliarden Wh



224 „Energiesklaven“ je Einwohner

- Antikes Rom (100 n. Chr.):

- 20 Mio. römische Bürger - 120 Mio. Sklaven
6 Sklaven je römischer/-m Bürger/-in
- 1 Sklave leistet etwa $1/10$ PS = 75 W
- 8 Arbeitsstunden, ca. 360 Tage pro Jahr = 780 MJ pro Jahr
- Je römischem Bürger verfügbar: $6 \cdot 780$ MJ = 4 680 MJ/a

4680 MJ = 1300 kWh pro Jahr

- Modernes Deutschland (2004 n. Chr.):

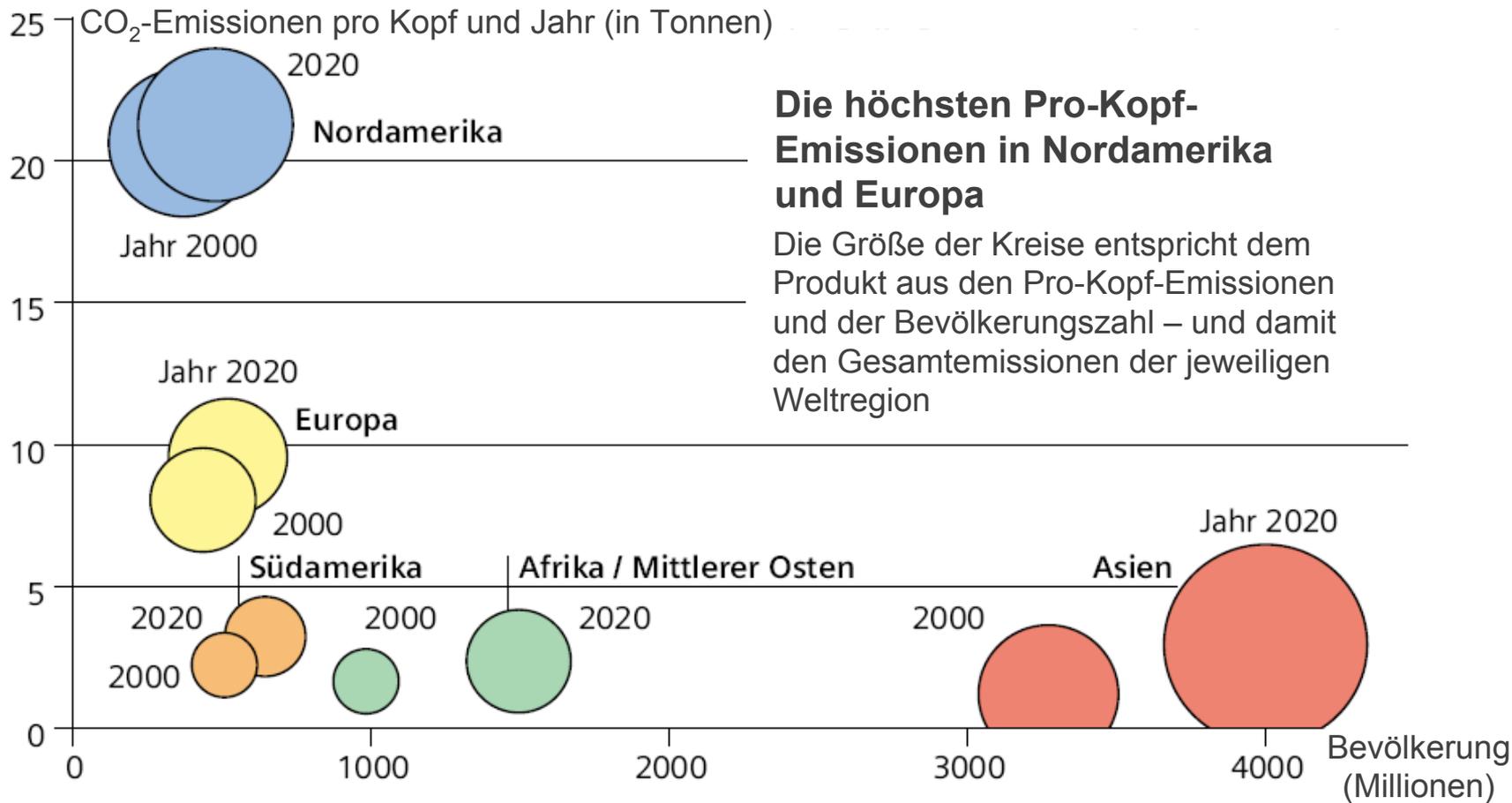
Primärenergie: 14 440 PJ

Je Einwohner: $14\,440 \text{ PJ} / 82,3 \text{ Mio.} = 175\,455 \text{ MJ}$

224 Energiesklaven je Einwohner/-in *)

*) $224 = 175\,455 / 780$

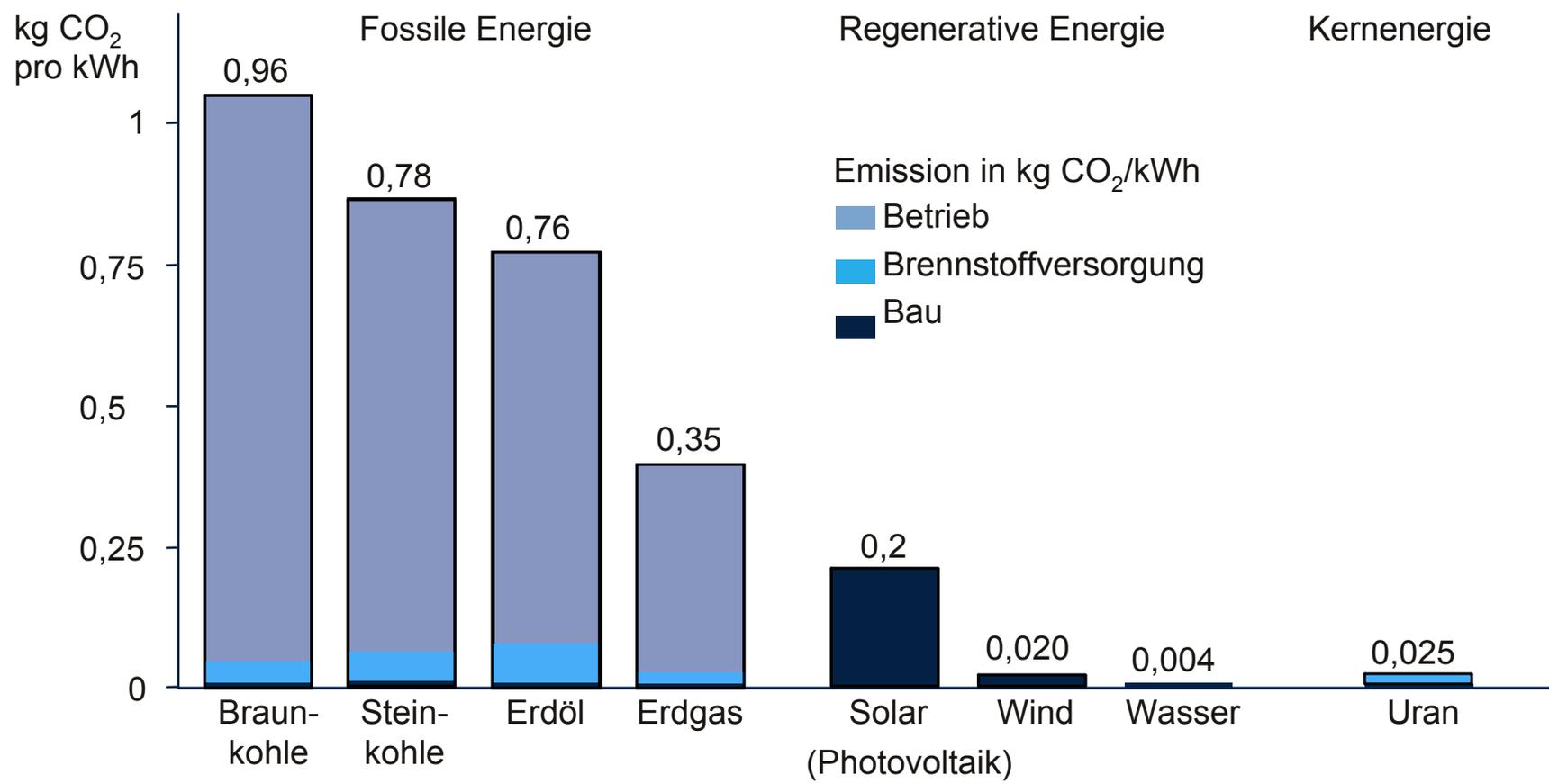
CO₂-Emission



Quelle: Siemens, Pictures of the Future, Frühjahr 2007

CO₂-Emission

CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung in verschiedenen Kraftwerkstypen



Quelle: Siemens



Wir fassen zusammen:

Deutschland:

- Pro Jahr **el. Energiebedarf ca. 510 TWh**, leicht steigende Tendenz
- Für diesen Endenergiebedarf (100%) müssen wegen der Umwandlungs- und Transportverluste **175 % an Primärenergie** (Kohle, Öl, Kernenergie, Gas) bereitgestellt werden, davon ca. 3/4 durch **Import**.
- Bereitstellung **elektrischer Energie benötigt rund 38 %** des jährlichen Primärenergiebedarfs.
- Dabei entstehen **ca. 30 %** der von Deutschland **verursachten CO₂-Emission** (Kernenergie, regenerativ: wenig CO₂!).

- Grundbegriffe zur Energie
- Fakten zur elektrischen Energie
- **Elektrische Energieerzeugung – heute und morgen**
- Elektrische Energieverteilung – Herausforderungen
- Effiziente Nutzung elektrischer Energien
- Energie-Ingenieure/-innen – Zeitgemäße Ausbildung
- Ausblick



Elektrische Energieerzeugung – Energemix (*Deutschland 2006*)

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik



Wind 5%



Wasser 3,5%



Biomasse 3,1%

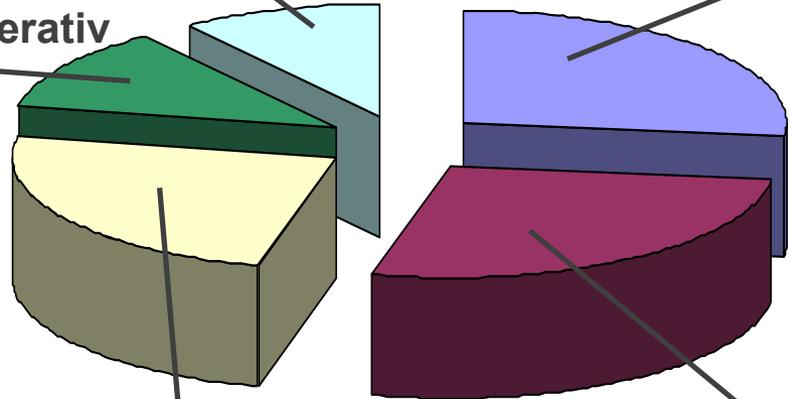


PV 0,3%



Erdgas + Sonstige 10%

**Regenerativ
11,9 %**



Steinkohle 27%



Kernkraft 24,1%



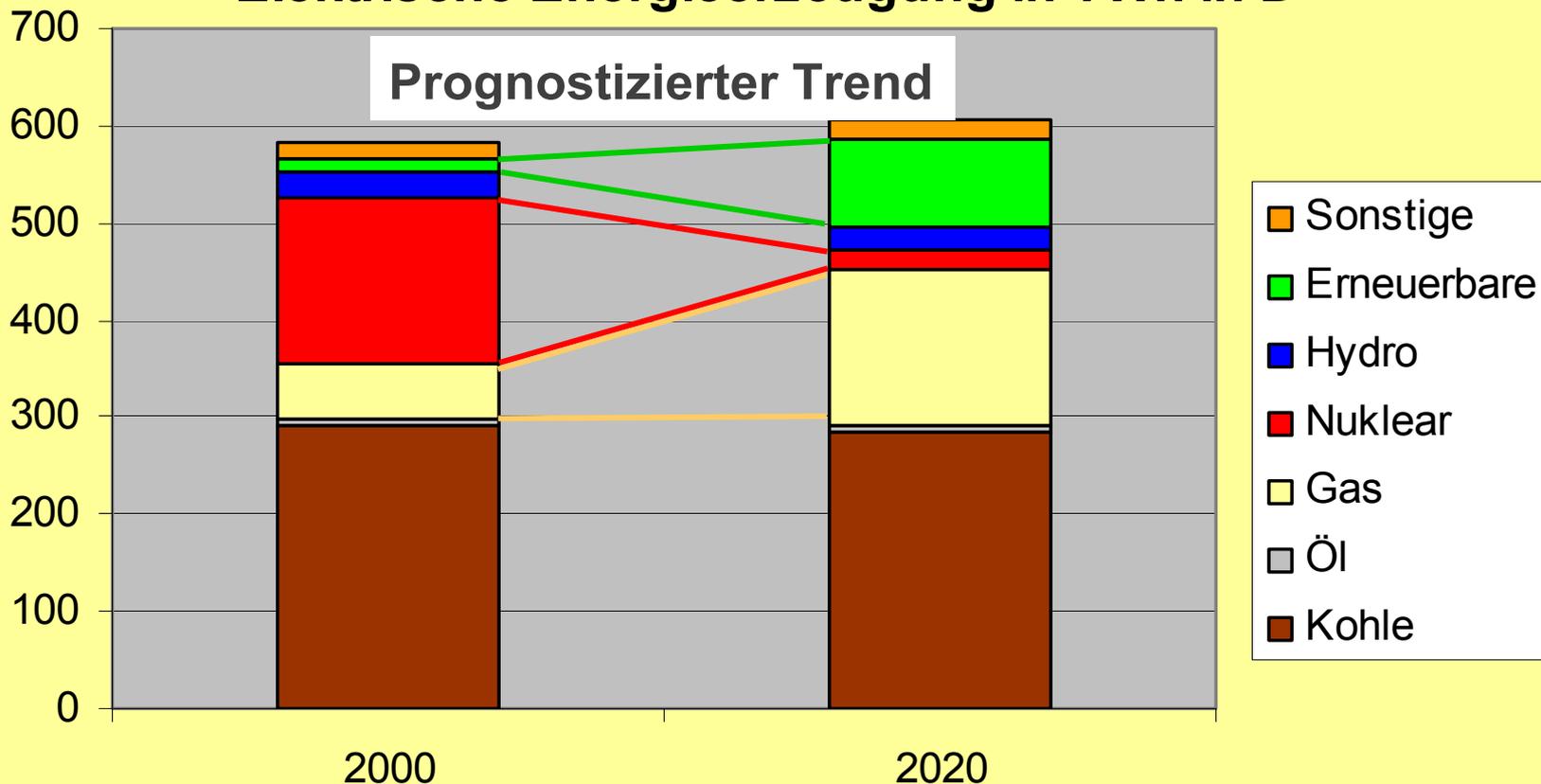
Braunkohle 27%



Elektrische Energieerzeugung - Trend

Deutschland

Elektrische Energieerzeugung in TWh in D

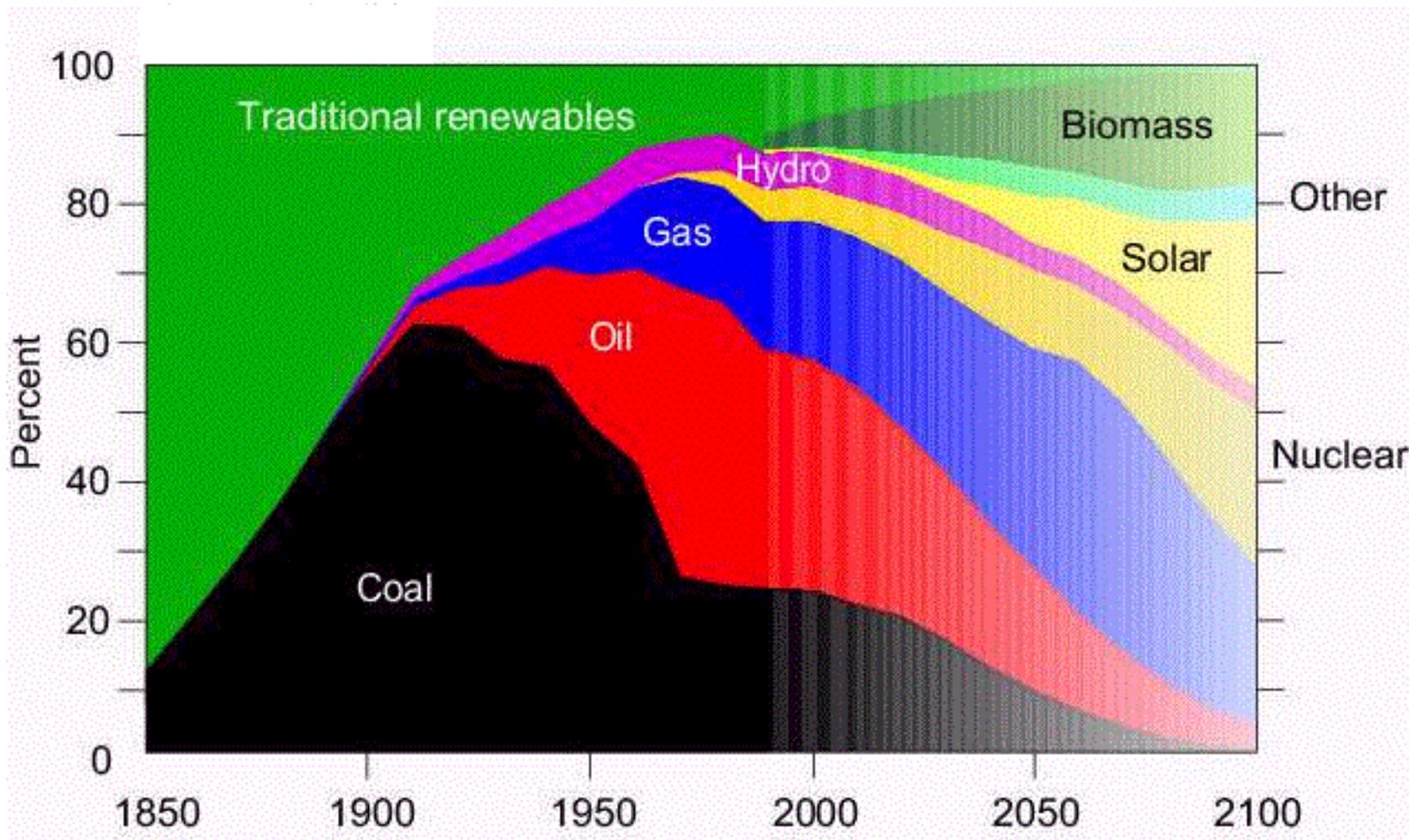


Quelle: VDN



Elektrische Energieerzeugung - Trend

Langfristiges Energieszenario – Welt



Quelle: WEC



Herausforderung "Echtzeit-Betrieb"

Der Netzbetreiber hat praktisch **keinen Einfluss** auf die Netzlast und das Verbraucherverhalten.

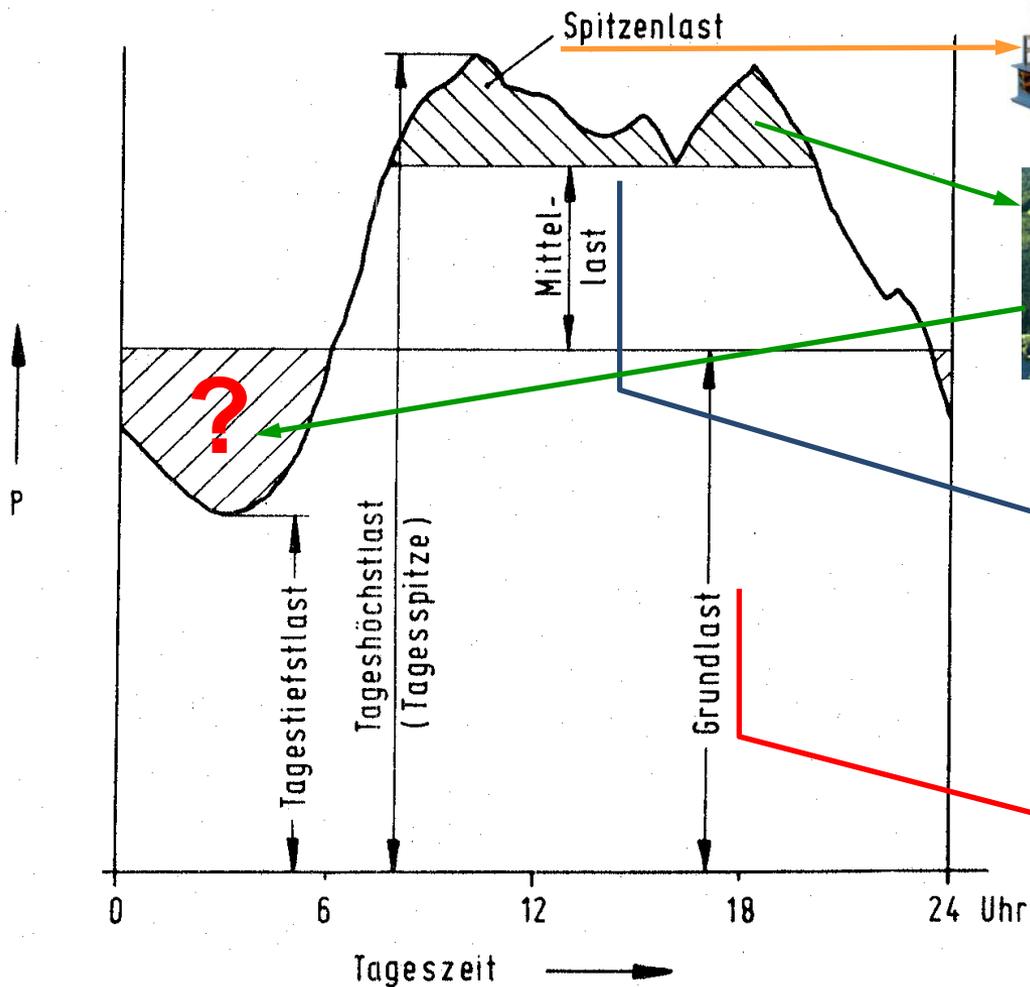
Verbrauch und Einspeisung müssen zu jedem Zeitpunkt **im Gleichgewicht** sein.



Auch die "lächerliche" Leistung von 60 W muss von irgend einem Kraftwerk **genau in dem Moment** bereitgestellt werden, in dem sie abgerufen wird.



Typische Tageslastkurve – KW-Typen



Gasturbinen
Wasserkraft
Fremdbezug



Pumpspeicher



Kohlekraftwerke



Kernkraftwerke

Kalorische Kraftwerke: Strom aus thermischer Energie

- Stein-/Braunkohleverbrennung → Wasserdampf → el. Strom
- Kernspaltungsenergie → Wasserdampf → el. Strom
- Erdgasverbrennung → Rauchgas → el. Strom

Zugeführte therm.
Leistung P_{zu}
Heißdampf-
temperatur T_{zu}



Abgeführte el.
Leistung P_{ab}
Kondensat-
temperatur T_{ab}

Bestmöglicher Wirkungsgrad
= Idealer *Carnot*-Prozess:



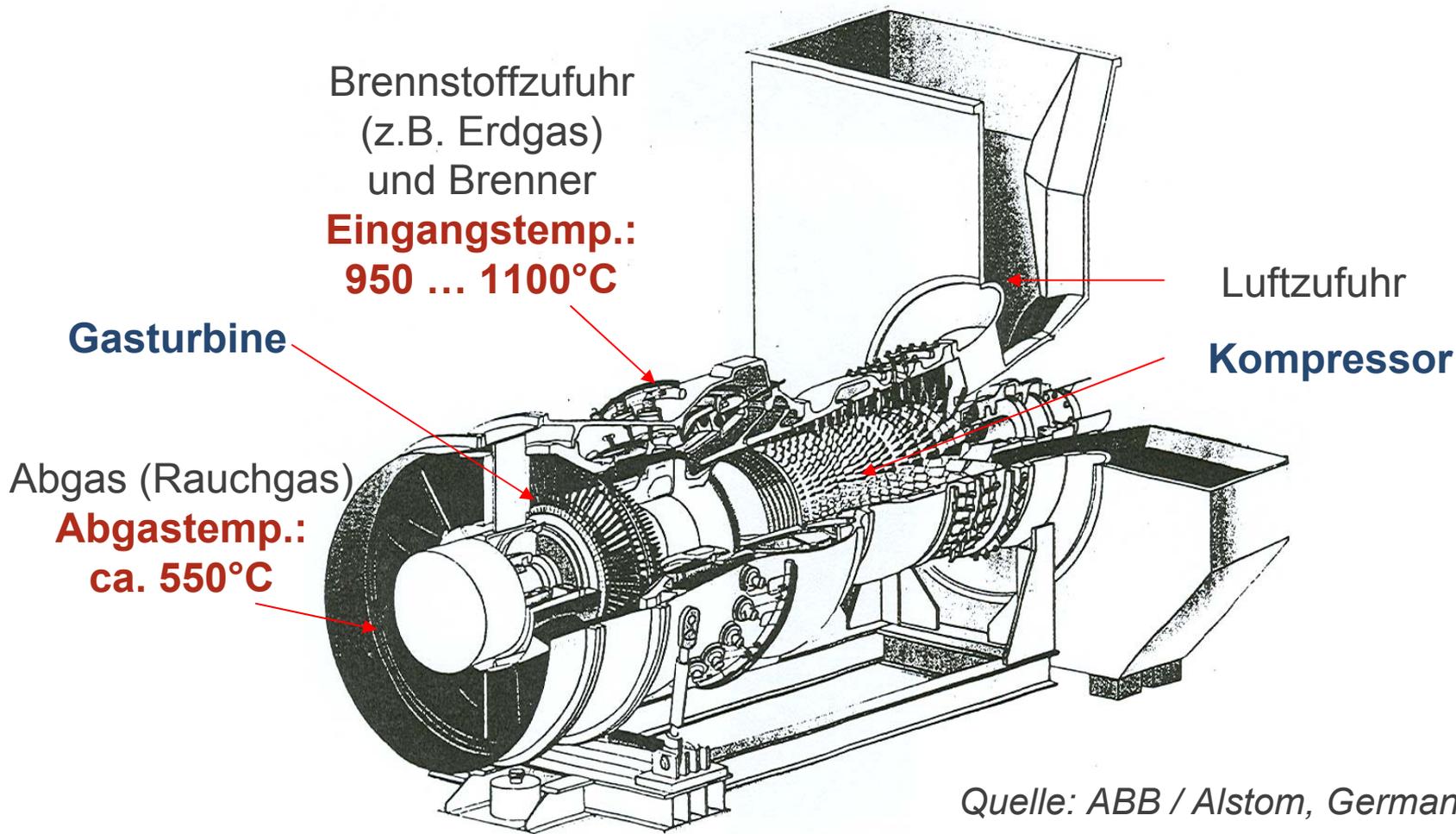
Abwärmeleistung
im Kühlmittel P_d

$$\eta_{\text{Carnot}} = P_{ab} / P_{zu} = 1 - T_{ab} / T_{zu}$$

Gasturbine

Gasturbinen: Maximalleistung ca. 350 MW

Wirkungsgrad typisch ca. 35% (Grenze: Eintrittstemperatur!)



Quelle: ABB / Alstom, Germany



Kalorisches Kraftwerk – Gas- und Dampfprozess (GuD)

Wärmetauscher Rauchgasein-/austrittstemperatur: 550 °C / 100 °C
+273 K: 823 K / 393 K

$$\eta_{WT} = 1 - T_{ab} / T_{zu} = 1 - 393 / 823 = 52\%$$

Wasserdampf in der Turbine Ein-Austritt: 515 °C / 20 °C
+273 K: 788 K / 293 K

$$\eta_{DP} = 1 - T_{ab} / T_{zu} = 1 - 293 / 788 = 63\%$$

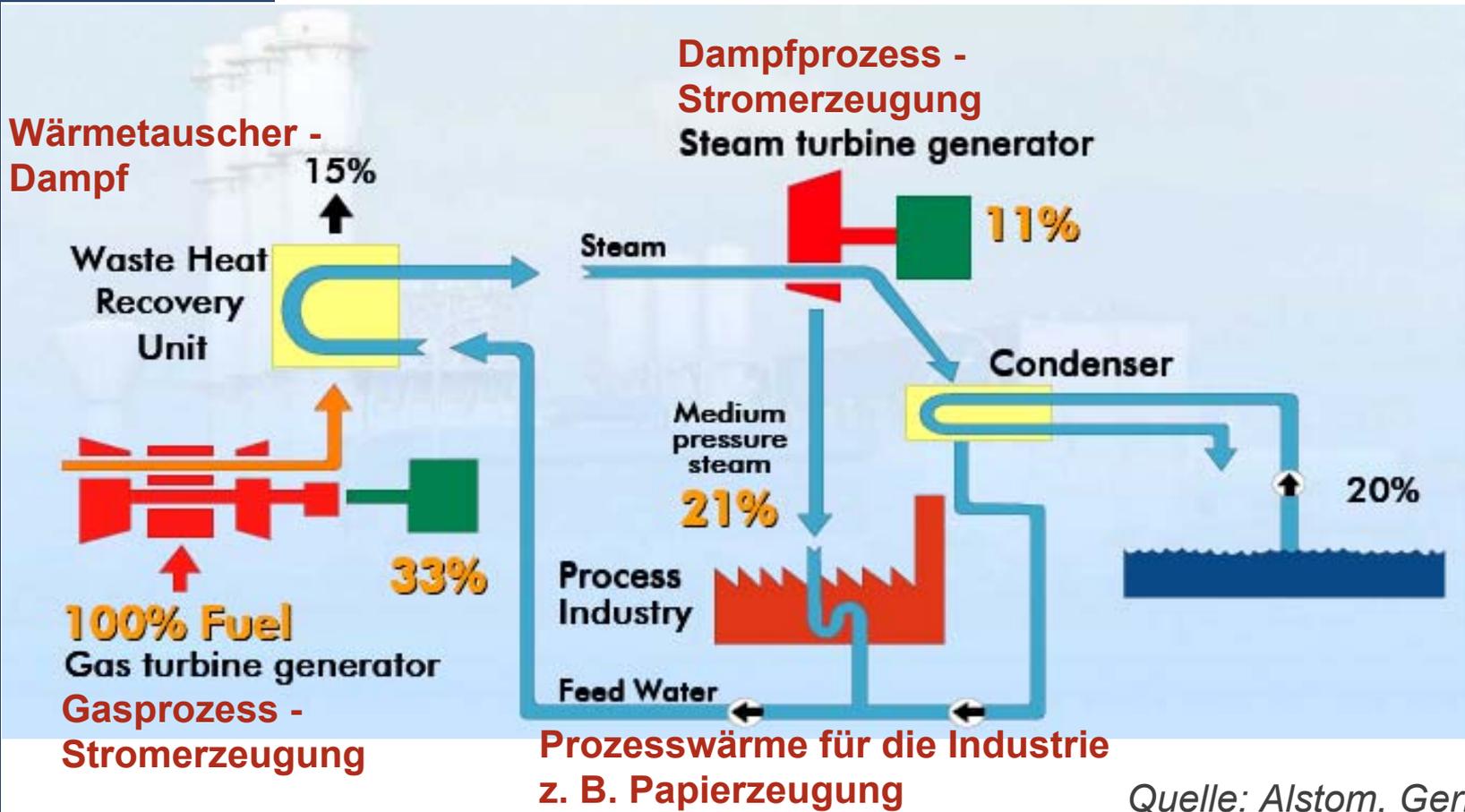
$$(1 - 0,4) \cdot 0,52 \cdot 0,63 = 0,2 = \mathbf{20 \% \dots 170 MW \text{ el. Leistung}}$$

Theoretischer elektrischer Wirkungsgrad: 0,4 + 0,2 = 0,6 = 60%

Elektrische Leistung: 340 + 170 = 510 MW

Erforderliche therm. Leistung (Gasbrennwert): 510/0,6 = 900 MW

Industrie-GuD-Kraftwerk – mit Kraft- Wärme-Kopplung (KWK)



Elektrischer Wirkungsgrad: $33 + 11 = 44\%$

Thermischer Wirkungsgrad: $44 + 21 = 65\%$

GuD-Kraftwerksprojekte mit erhöhtem Wirkungsgrad

GuD-Kraftwerk *Irsching/Bayern* (e.on): (fertig 2011)

530 MW elektrisch, Wirkungsgrad: **60%**

Weltspitze bzgl. Leistung und Wirkungsgrad

(zur Zeit: Weltspitze: 58,4 %)

- 40 000 Tonnen CO₂ p. a. durch Wirkungsgraderhöhung

z. Zt. weltweit im Mittel: GuD-Wirkungsgrade: **45 %**



Gasturbine: Numerische Strömungsoptimierung der Beschaufelung

Quelle: Siemens

- „Carnot“-Wirkungsgrad:

Erhöhung von Temperatur und damit Druck am Eingang:

a) **Kohlekraftwerke:** typisch 500 ... 550°C

Nun: 600°C (austenitischer statt ferritischer Stahl erforderlich)

Ziel: 700°C bei 350 bar

erwarteter Wirkungsgrad: **50%**

b) **Gasturbinenkraftwerke:** typisch 900 ... 1100°C

Ziel: 1300°C !

Welcher Werkstoff für diese Temperaturen ?

- Keramikbeschichtete Schaufeln
- Luftschleier um das Schaufelprofil



Quelle: Siemens AG

- **Im Versuchsstadium !** "CCS" = CO₂ Capture and Sequestration

Abgetrenntes CO₂ end-lagern

- in salinen Aquiferen, - in alten Öl-/Gasfeldern

- **Abscheidungsverfahren:**

a) *Rauchgaswäsche*: am weitesten entwickelt, nachrüstbar,
mehrere Kleinanlagen in Betrieb
energieaufwendig: **-10 ... 12 %-Punkte Wirkungsgrad**

b) *Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)*: Festbrennstoff
mit Sauerstoff in Synthesegas umgewandelt, in GuD-Kraftwerk
verbrannt, danach Abscheidung des CO₂

energieaufwendig: **-10 ... 12 %-Punkte Wirkungsgrad**
Pilotanlage 450 MW, RWE, bis 2014 errichtet

c) *Oxyfuel-Verfahren*: Einblasen von reinem Sauerstoff
Pilotanlage 30 MW *Schwarze Pumpe, Vattenfall*, ab 2008
-9 %-Punkte Wirkungsgrad

- **Ausbau Windenergie „off-shore“** (Wirkungsgrad ca. 45%)
 - Errichtung/Betrieb auf rauher See
 - verbesserte Windprognosen nötig
 - Zusätzliche Energieübertragung und Großspeicher ?
- **Ausbau Wasserkraft:** Weltweit möglich (Wirkungsgrad ca. 80%)
 - Deutschland: keine Ausbaureserven
- **Brennstoffzellenkraftwerke:** Gasturbine und Brennstoffzellen (GuB)
 - Wirkungsgradziel: 70% (Versuchsstadium ca. 300 kW)
 - Solid oxide fuel cell (SOFC) verarbeitet Wasserstoff aus dem reformierten Erdgas, Nachverbrennung durch Gasturbine
- **Fusionsenergie:** Aus schwerem Wasser wird Helium und Energie
 - Versuchsanlage ITER in Bau, *Cadarache/Frankreich*
 - 10 Mrd. Euro: Weltweites Verbundprojekt
- **Biomasse:** Verbrennung CO₂-neutral
- **Geothermie:** Ziel: 5 km tiefe Bohrungen

ITER-Tokamak-Fusionsexperiment

Plasma: Wasserstoffkerne verschmelzen bei 200 Mio. Grad zu Helium und Neutronen

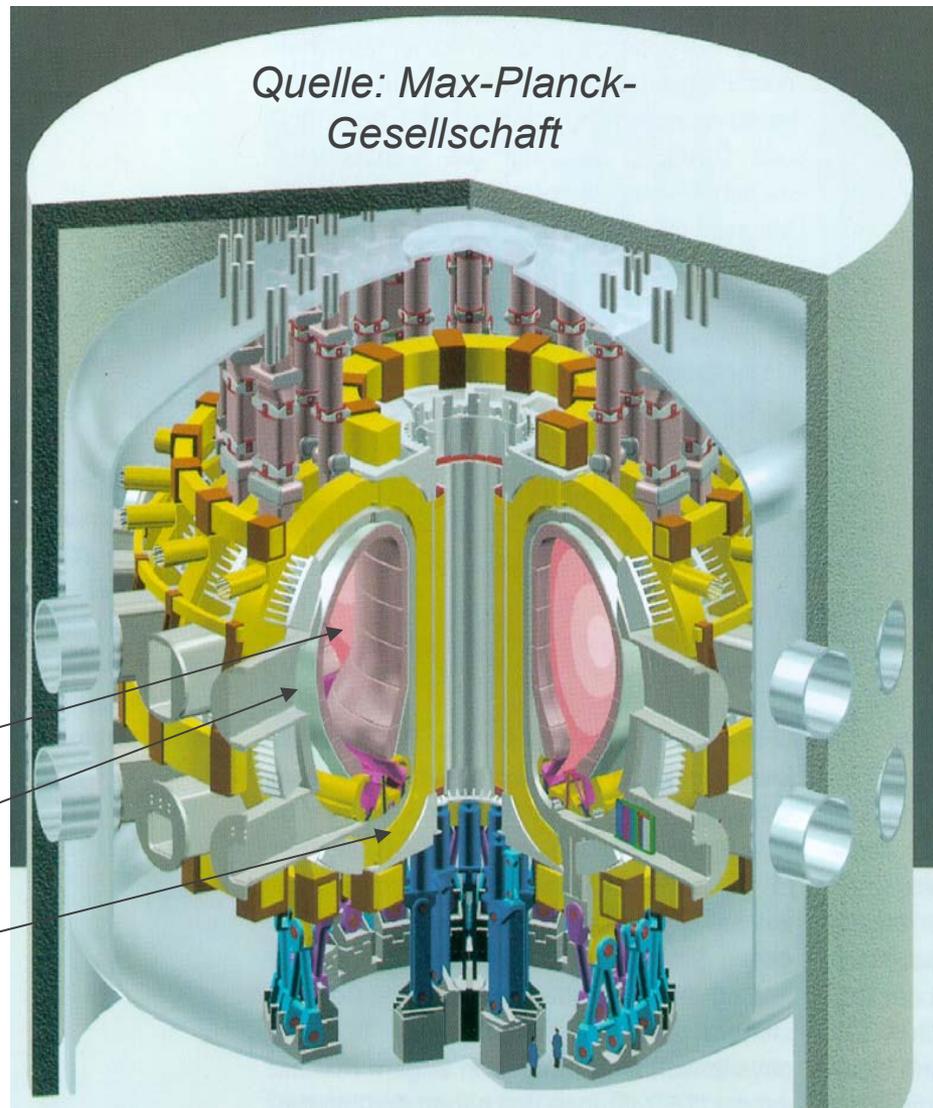
Fusionsenergie wird durch abgebremste Neutronen im **Blanket** frei, wo ein Fluid erhitzt wird

Heißes Fluid erzeugt im **Wärmetauscher** Dampf für Dampfturbine

Plasma

Blanket

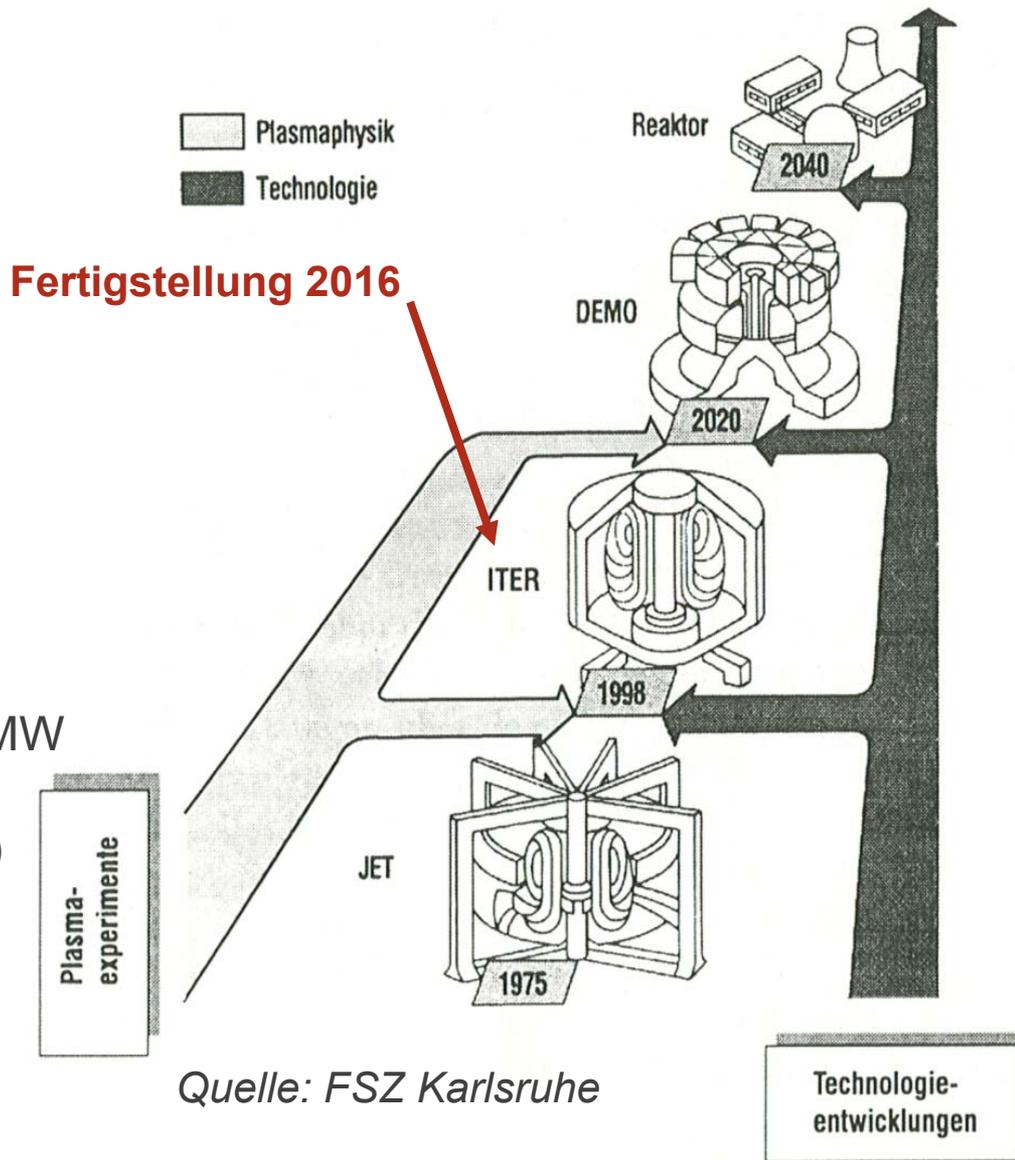
Supraleitende Magnete halten Plasma in Schweben



Experiment ITER:

Daten

Gesamtradius:	18 m
Gesamthöhe:	36 m
Plasmaradius:	8,14 m
Plasmahöhe:	9,4 m
Plasmabreite:	5,6 m
Plasmavolumen:	2000 m ³
Magnetfeld:	5,7 T
Max. Plasmastrom:	21 MA
Startheizung:	75 ... 100 MW
Fusionsleistung:	500 MW (für 1000 s)

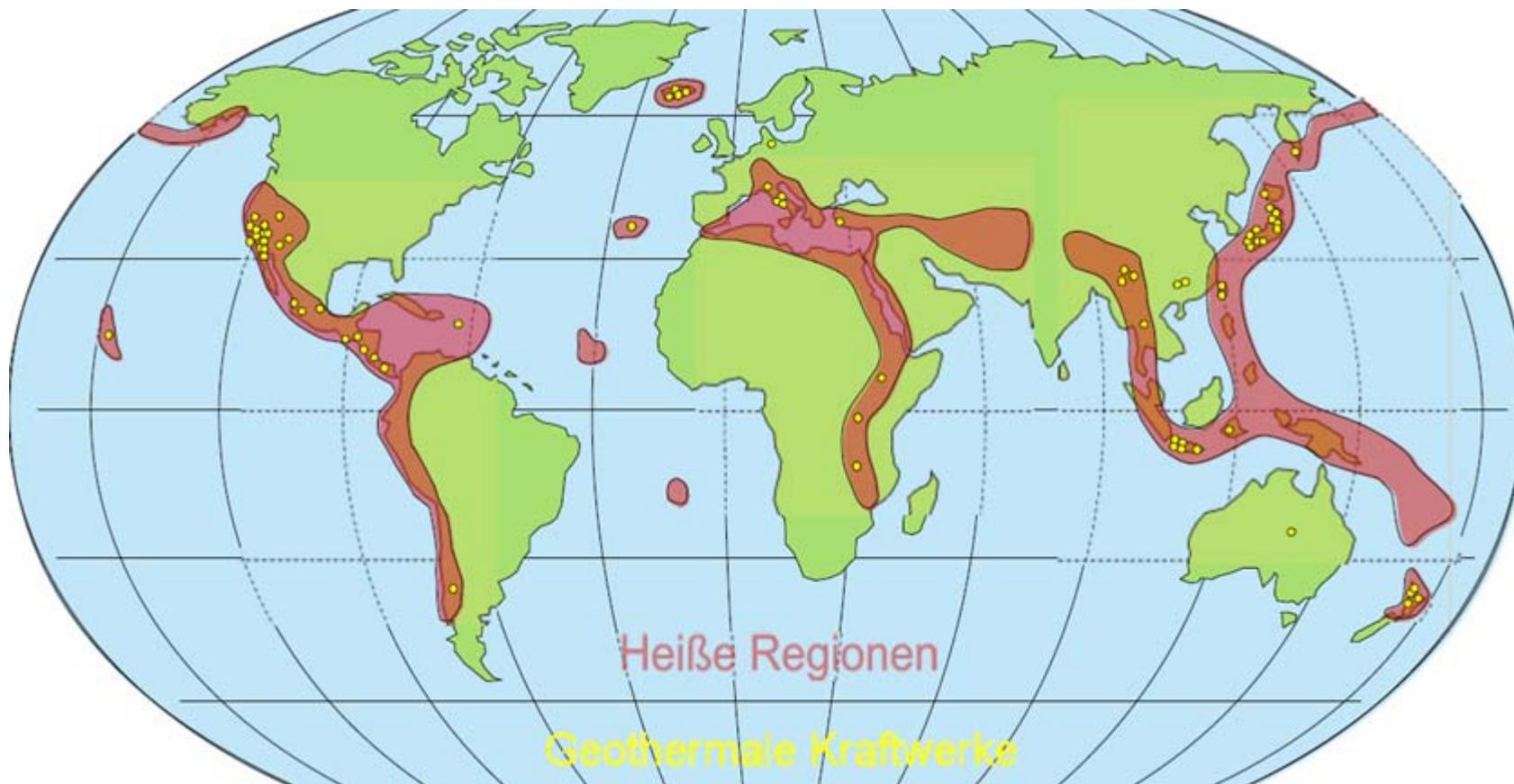


Quelle: FSZ Karlsruhe

Technologie-
entwicklungen

Welt: Geothermisches Potential

- Erwärme: 33% durch Erddruck, 67% durch Radioaktivität
- Geothermie standortgebunden
- i. a. Tiefenbohrung erforderlich
- Oberflächennah: *Larderello*/I, Island, Neuseeland,

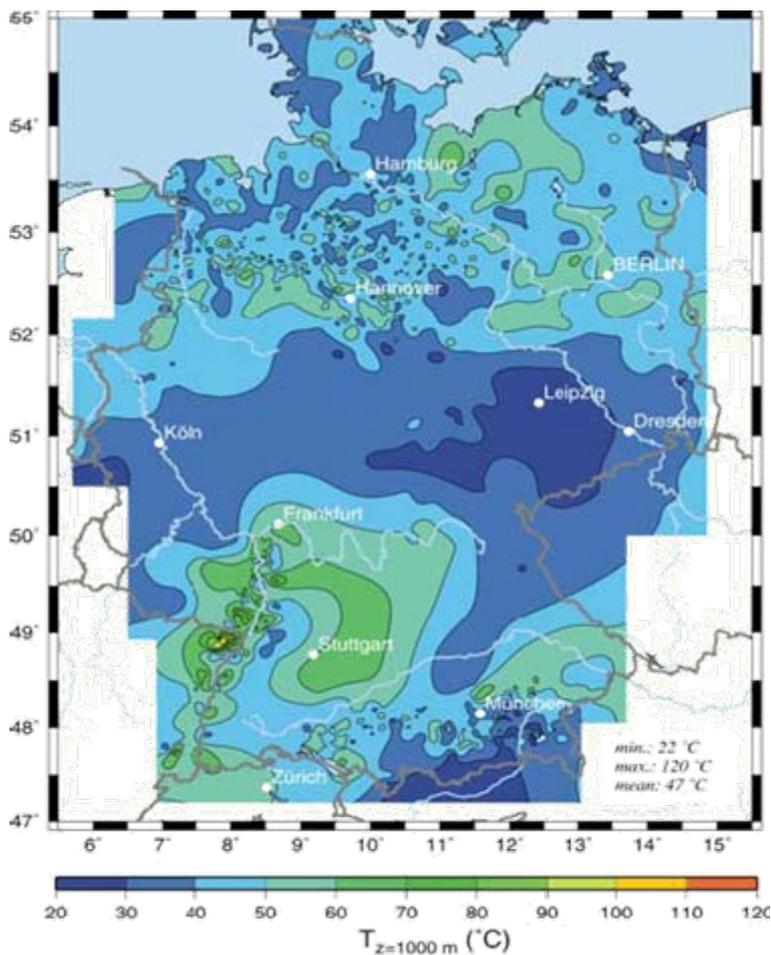




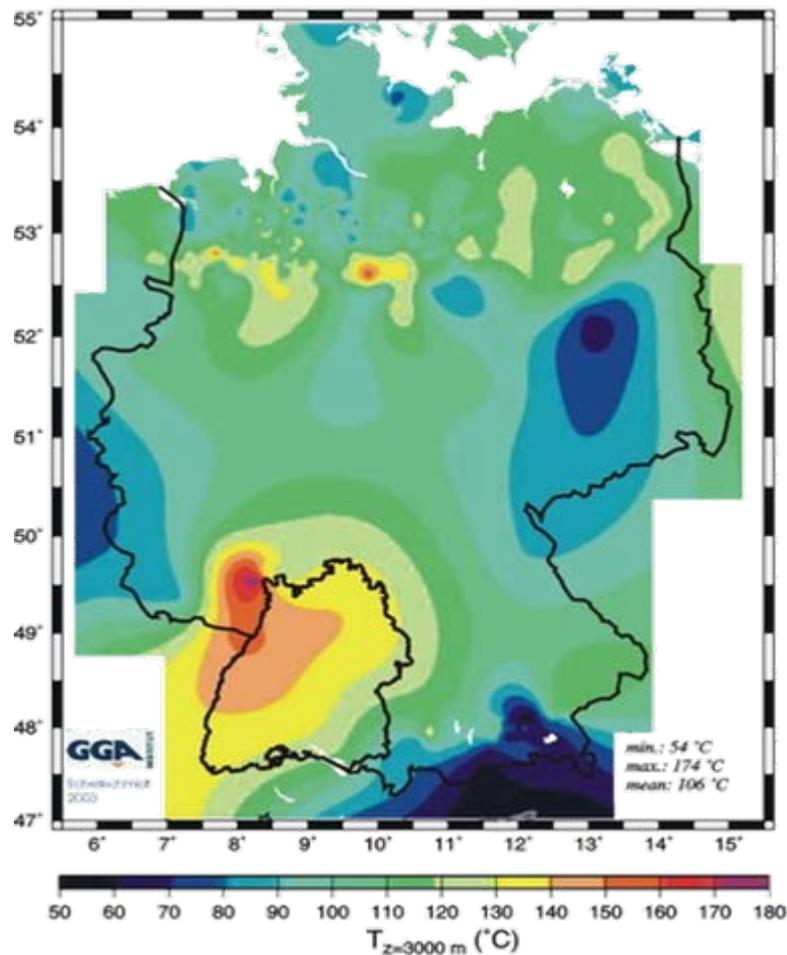
Geothermisches Potential Deutschland

Je 100 m Tiefe plus 3 Grad Gesteinstemperatur

1000 m Tiefe



3000 m Tiefe

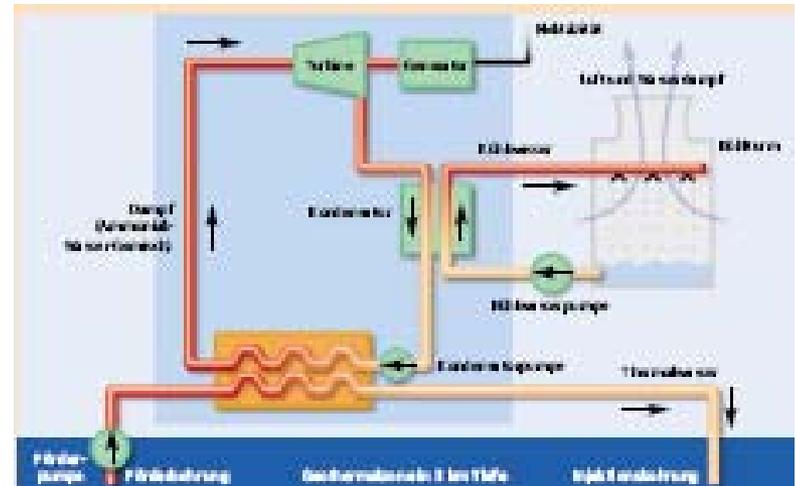


Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

Stromerzeugung aus Erdwärme

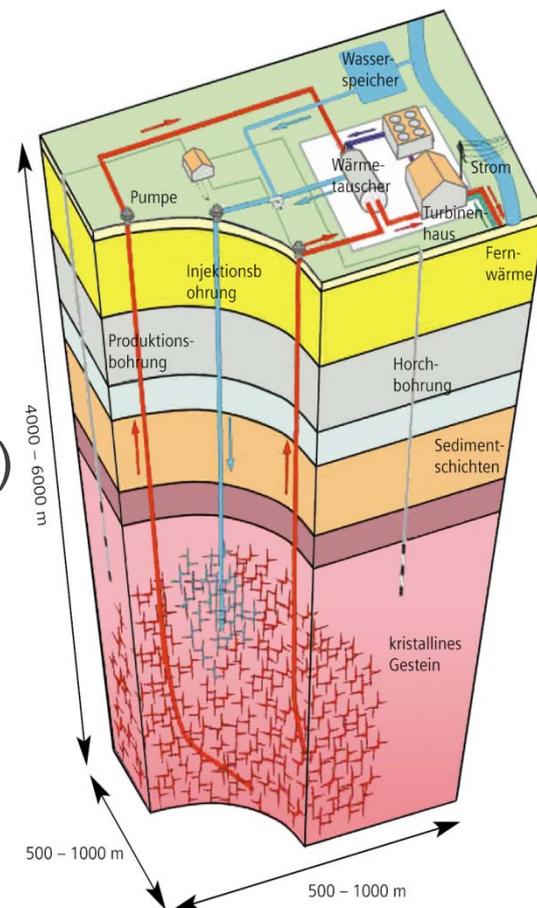
- 3 km tiefes Bohrloch: ca. 120°C – erzeugter Wasserdampf: zu geringer Druck für Dampfturbine
- **Kalina-Prozess:** Wärmetauscher: Wasser-Ammoniak-Gemisch (Siedepunkt Ammoniak: -33°C): hoher Dampfdruck für Dampfturbine
- Geschlossener Kreislauf: Wärmetauscher zum Kühlturm
- **Projekt München-Unterhaching (2007):** 3300 m, 122°C, 150 l/s, 3,3 MW elektrisch
- Zusätzlich: Heizfernwärme für 10 000 Personen, 25 l/s
- 12000 Tonnen CO₂-Vermeidung pro Jahr

Quelle: Siemens



Seit 30 Jahren Forschung: Hot Dry Rock - Verfahren

- Im Gegensatz zur Nutzung hydrothormaler Lagerstätten: **Hot Dry Rock-Verfahren**: keine ergiebigen wasserführenden Gesteinsschicht erforderlich
- Zwischen Injektions- und Produktionsbohrung wird ein Zirkulationssystem künstlich hergestellt
- Im Untergrund werden Klüfte durch das Einpressen großer Wassermengen unter hohem Druck erzeugt (**hydraulische Stimulation**)
- Erreichen der für den wirtschaftlichen Betrieb notwendigen Temperaturen in entsprechenden Tiefen ist **primär ein finanzielles** und weniger ein technisches Problem



Quelle: TU Darmstadt, Prof. Katzenbach



Biomasse-Kraftwerke

- **Biomasse:** Verbrennung organischer Produkte (Holz, Müll) wird soviel CO₂ freigesetzt, wie die Pflanzen zum Wachsen benötigten:
CO₂-neutral

- **Probleme:** Verschlackung, Korrosion in der Brennkammer

- **Beispiele:**

Wien, Österreich: 24 MW elektrisch (50 000 Haushalte)
37 MW Fernwärme (12 000 Haushalte)

Timelkam, Österreich: 49,7 MW thermisch (Holz, Altholz)

Landesbergen (2003): 20 MW elektrisch, 31% Wirkungsgrad, Altholz

Ulm: 9,6 MW elektrisch (Holz)

Düsseldorf: (08/2007): 25 GWh/a Strom, 78 GWh/a Wärme

- **Forschung:** Holzvergasung, verbrannt in GuD-Kraftwerken:
erwartet: 40% Wirkungsgrad, mit Erdgas gemischt: 60% geschätzt

Wasser-Kraftwerke „Large Hydro“

- Hoher technischer Reifegrad, Wirkungsgrad ca. 80%
- Großprojekte in *Asien, Afrika, Lateinamerika*
- *Europa*: - Erneuerung (refurbishment) – Wirkungsgraderhöhung
 - Ausbau Kraftwerksleistung bestehender Speicherseen
z. B. *Kopswerk/Österreich*: + 500 MW (= + 100%)



*Kaplan-Turbine –
Donaukraftwerk Greifenstein*

Limbergsperre/Österreich

Vianden/Luxembourg (zehnte Maschine)

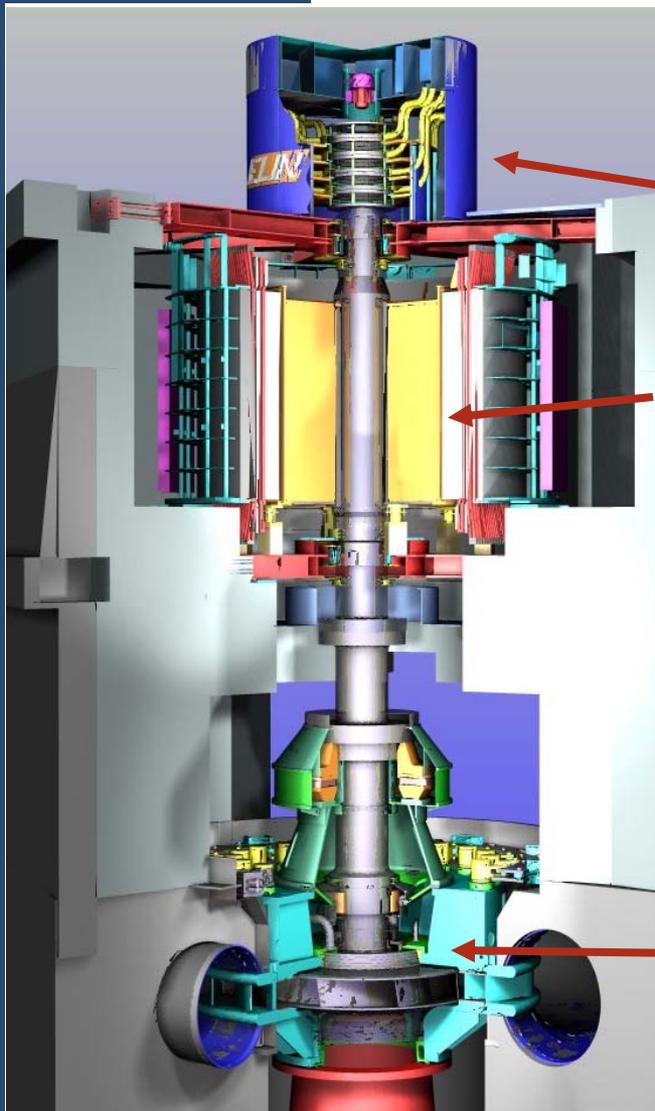


Pumpspeicher-
Kraftwerk
Geesthacht

*Francis-
Turbinen*



Pumpspeicher-Kraftwerk Goldisthal/Thüringen



Umrichter-
einspeisung

2 x 340 MVA, 300 ... 346/min,
18-polig, 50 Hz

Asynchro-
generatoren

Innovation:

Drehzahlveränderbarer
Pumpbetrieb

Asynchrongeneratoren, im
Rotor über Umrichter
gespeist

Verbesserter Wirkungsgrad

Erweiterter Betriebsbereich
gegenüber Konstant-
Drehzahlbetrieb

Pump-Turbine

Quelle: VA Tech Hydro

„Small Hydro Power“



Freudenau/Donau, Wien



Asynchron-
generatoren,
ungeregelt

Djebel Aulia/Nil, Sudan

Quelle: VA Tech

Beispiel:

Matrixturbine: Nutzung des Restwassers in aufgestauten Flüssen (Flussschifffahrt)

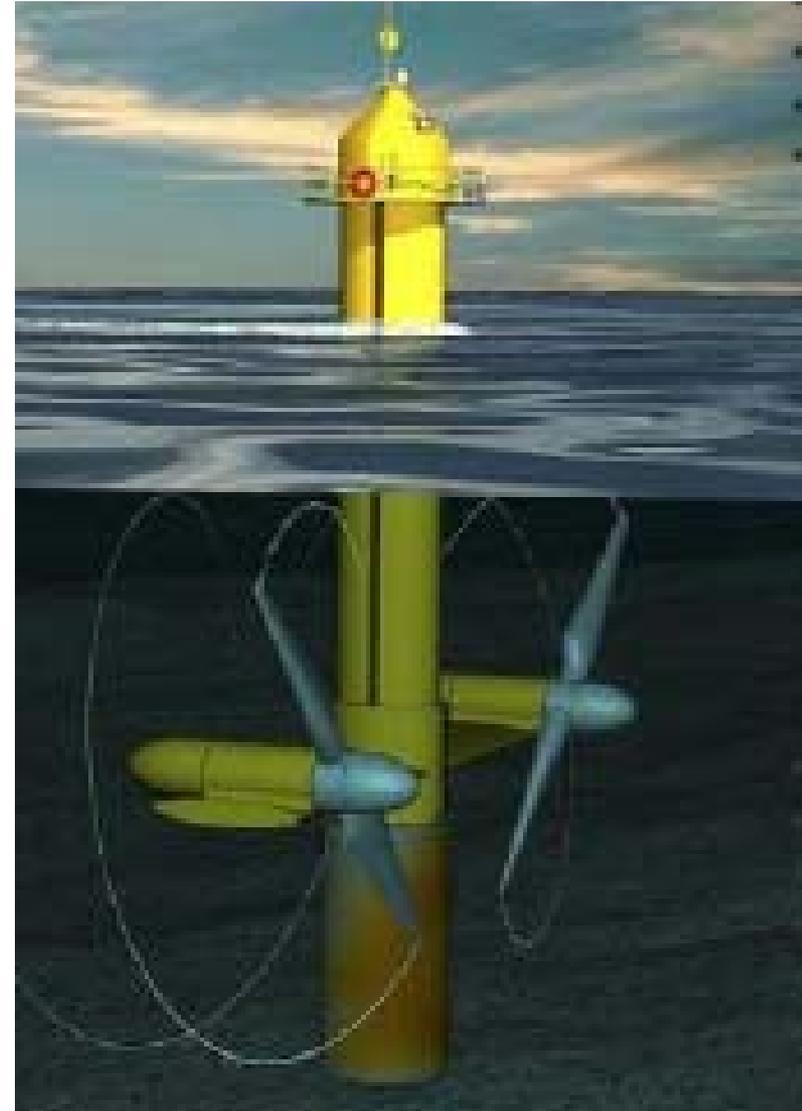
Zahlreiche kleine Propellerturbinen: Gute Integration in Dammtafeln

Leistung pro Turbine: ca. 200 ... 500 kW

Unterwassergezeitenströmung

- Prinzip der Windturbine unter Wasser, Getriebe und Generator
- 10...20 U/min je nach Gezeitenströmung
- Wesentlich kompakter als Windturbinen wegen der 1000-fach höheren Dichte „Wasser vs. Luft“
- Zukunft: Farmen mit ca. 40 Turbinen
- Optimistische Schätzung: Gezeiten- und Wellenkraftwerke könnten 10...15% von Englands Strombedarf decken

Quelle: *Marine Current Turbines, Bristol, UK*





Strangford Lough Pilotprojekt

- 600 kW-Propeller, 16 m Durchmesser
- Küste Nordirlands (*Strangford Lough*) Pilotprojekt mit 2 Turbinen



Quelle: Marine Current
Turbines, Bristol, UK

Windenergie

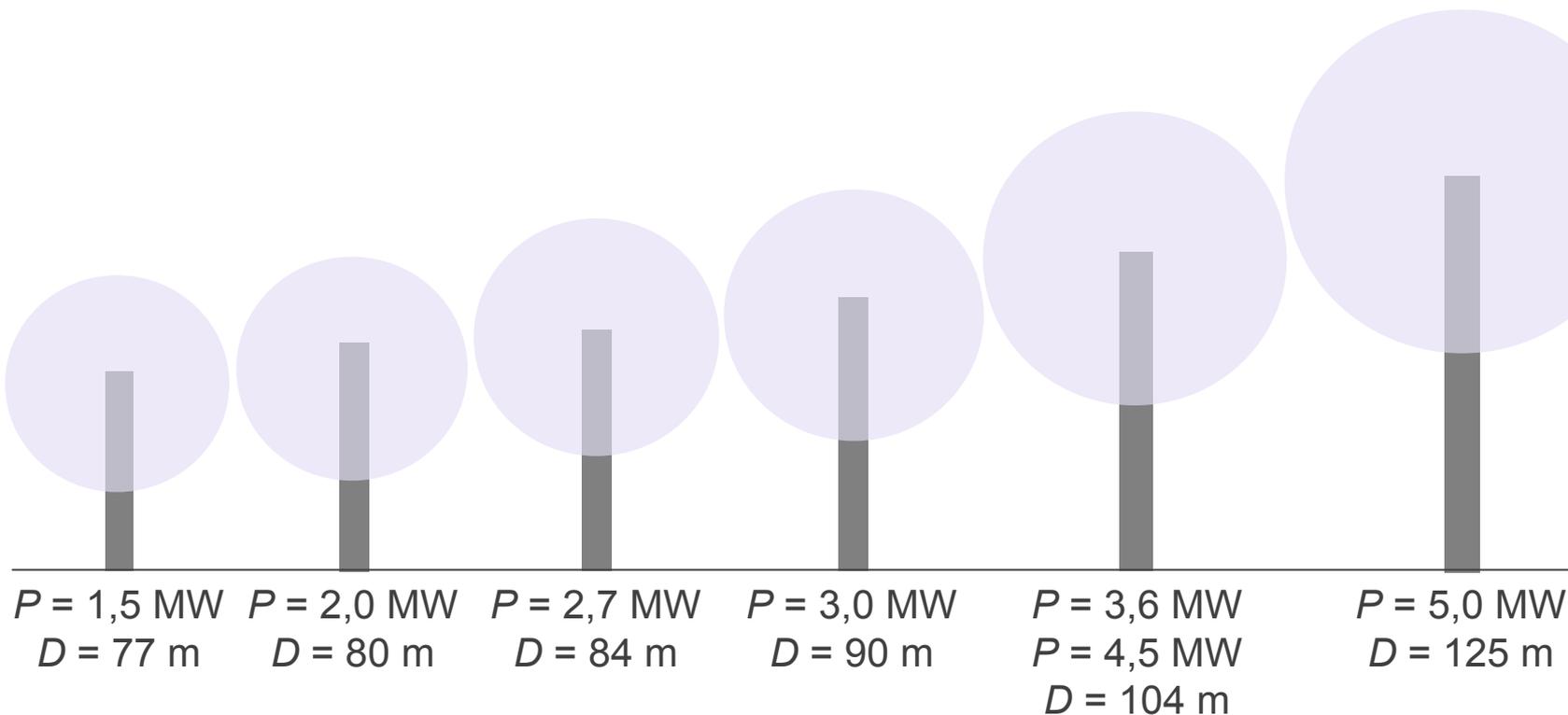
- Etwa **45% aus der kinetischen Windenergie entnehmbar**; Wind muss hinter der Windturbine („Lee“) abströmen können
- Standort-abhängig; statistisch schwankendes Windangebot
 - „on-shore“: **ca. 1500 Volllaststunden**
 - „off-shore“: **ca. 2500...3000 Volllaststunden**
- 1,5 / 2,5 / 3,5 MW-Turbineneinheiten sind „Standard“
- 5 MW-Einheiten in kleiner Stückzahl in Erprobung (z B. für off-shore)
- "fault-ride-through" Anforderung zukünftig erfüllen!
- **Windfarmen** – Ausgleich lokaler Schwankungen
- Dreiblatt-Rotoren
 - drehzahlvariabler Betrieb
 - Anpassung an Windgeschwindigkeit
 - Getriebe 1:100 und Asynchrongeneratoren
 - Getriebe 1:10 und Permanentmagnet-Synchrongeneratoren
 - OHNE Getriebe, PM-Synchrongeneratoren





Windgeneratoren - Leistungsdaten

- Rotorblattverstellung ("Pitch") zur Leistungsanpassung
- "Fahnenstellung" bei Sturm



Getriebe-Windgeneratoren - Beispiel: 5 MW

Windrotor: 110 t

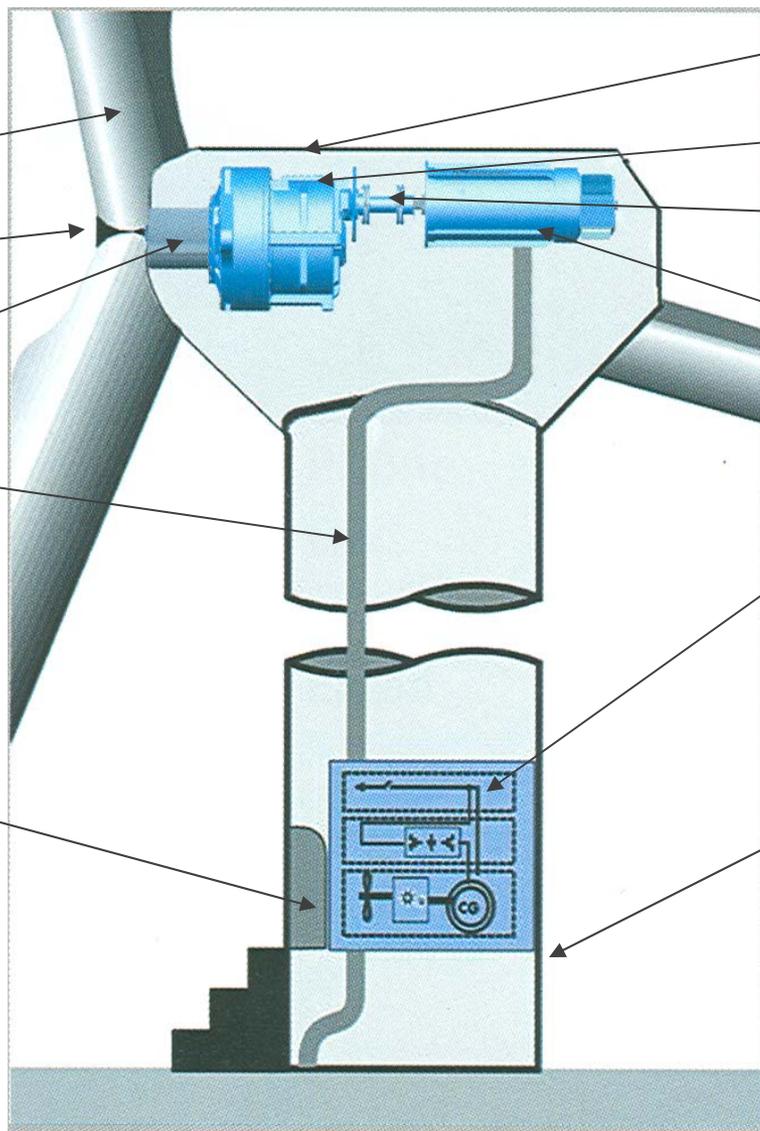
Rotorblatt

Rotornabe

Turbinenwelle

Generator-
Netzanschluss
dreiphasig 690 V

Transformator für
Erhöhung der
Spannung zum
Netz 20 kV



Gondel: 240 t

Dreistufiges Getriebe

Generatorwelle +
Kupplung

Asynchronengenerator
mit
Rotorschleifringen

Rotorseitiger
Umrichter

Mast

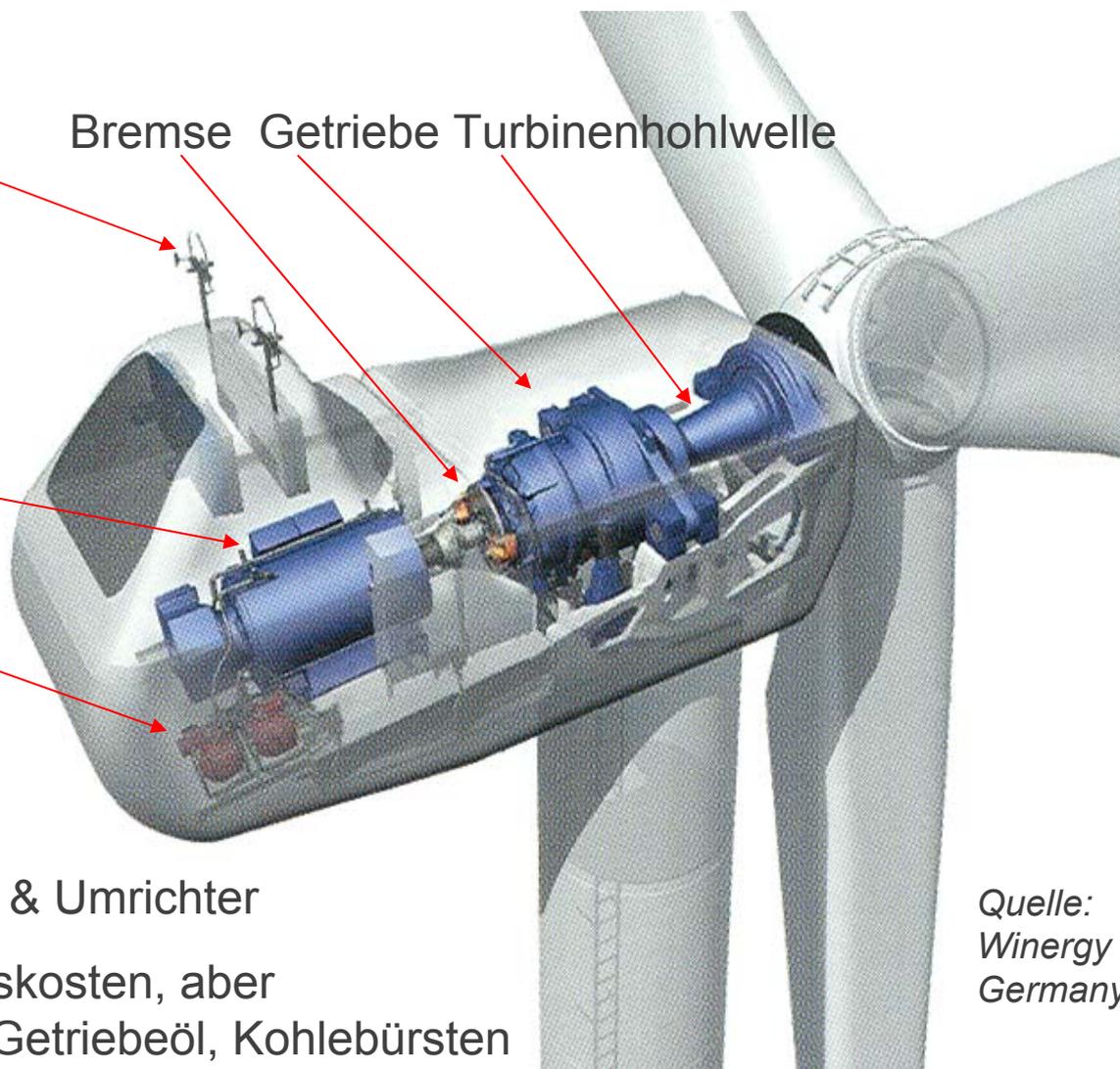
Quelle: Winergy, Germany

Getriebe-Windgeneratoren Gondelanordnung

Windmessung Bremse Getriebe Turbinenhohlwelle

Wassermantel-
gekühlter
Asynchron-
generator

Wasserpumpe



- **Kleine** Generatoren & Umrichter
- **Niedrige** Investitionskosten, aber **wartungsintensiv**: Getriebeöl, Kohlebürsten

Quelle:
Winergy
Germany



Getriebebelose-Windgeneratoren Gondelanordnung

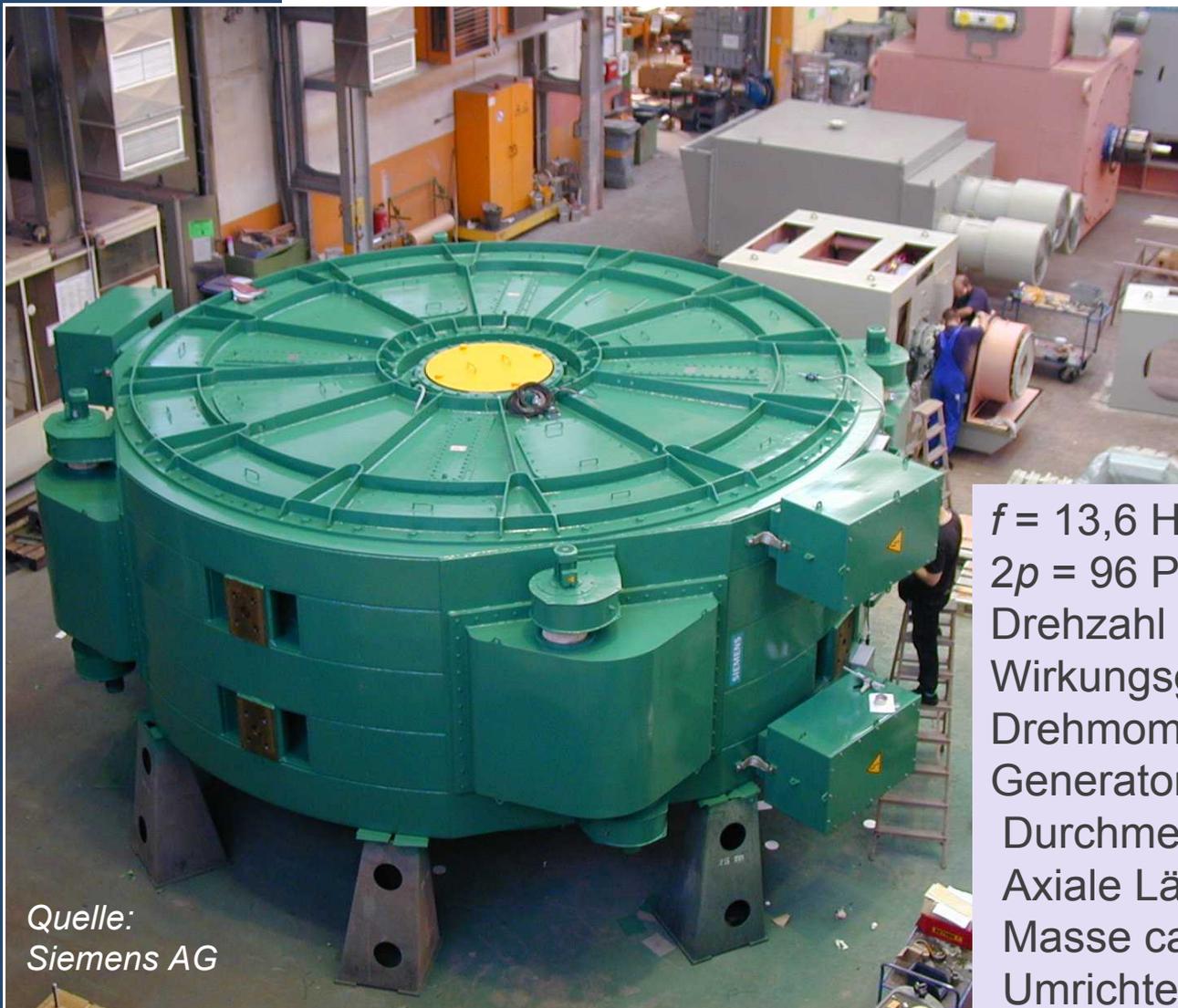


- **Große** Generatoren & Umrichter
- **Hohe** Investitionskosten, aber wartungsarm:
KEIN Getriebeöl, **KEINE** Kohlebürsten

Quelle: Enercon



Permanentmagnet-Windgenerator Scanwind / Norwegen 3 MW, 17/min



Quelle:
Siemens AG

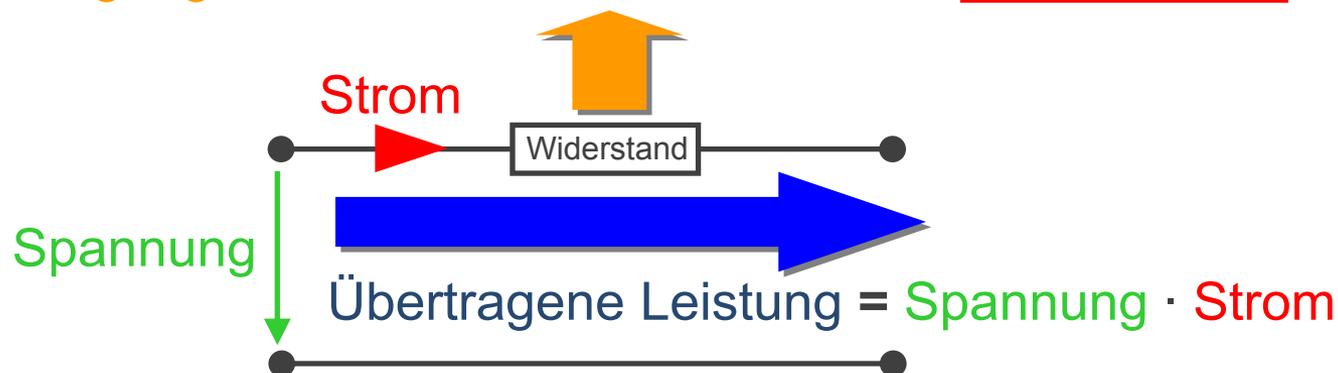
$f = 13,6 \text{ Hz}$
 $2p = 96 \text{ Pole}$
Drehzahl $n = 17/\text{min}$
Wirkungsgrad 95,5%
Drehmoment: 1685 kNm (!)
Generator:
Durchmesser ca. 5,8 m,
Axiale Länge: ca. 2,3 m
Masse ca. 85 t
Umrichterleistung 3 MW

- Grundbegriffe zur Energie
- Fakten zur elektrischen Energie
- Elektrische Energieerzeugung – heute und morgen
- **Elektrische Energieverteilung – Herausforderungen**
- Effiziente Nutzung elektrischer Energien
- Energie-Ingenieure/-innen – Zeitgemäße Ausbildung
- Ausblick

Warum hohe Übertragungsspannungen?

Nur selten kann elektrische Energie dort erzeugt (gewandelt) werden, wo sie benötigt wird → **Übertragung** erforderlich!

Übertragungsverluste = Widerstand · **Strom zum Quadrat**



Hoher **Strom** → hohe Übertragungsverluste (quadratisch zum Strom!)
Hohe **Spannung** → hoher Isolationsaufwand



Es lässt sich eine **wirtschaftlich optimale** Übertragungsspannung ermitteln.



Optimale Übertragungsspannung

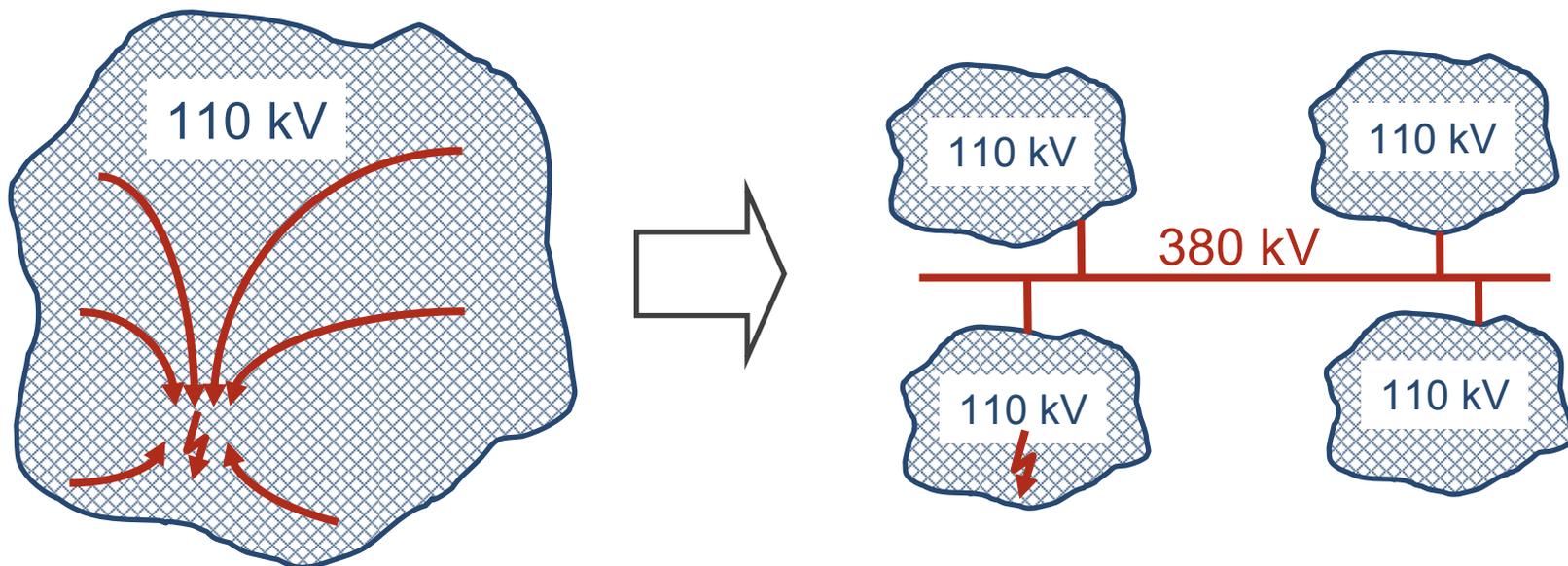
Richtwerte für Übertragungsspannung, übertragbare Leistung und Entfernungen:

Übertragungsspannung	Leistung	Strecke
$U_n = 110 \text{ kV}$	30 MW (\approx Bedarf einer 30 000-Einwohner-Stadt)	100-200 km
$U_n = 220 \text{ kV}$	125 MW (kleiner Kraftwerksblock; \approx Bedarf einer 125 000-Einwohner-Stadt $\rightarrow \approx$ Darmstadt)	200-400 km
$U_n = 380 \text{ kV}$	600 MW (großer Kohle-Kraftwerksblock)	400-800 km
$U_n = 765 (800) \text{ kV}$	2000 MW (2 Kernkraftwerks-Blöcke)	1000 km

Begrenzung der Kurzschlussleistung

Vorteil Hochspannungsnetz:

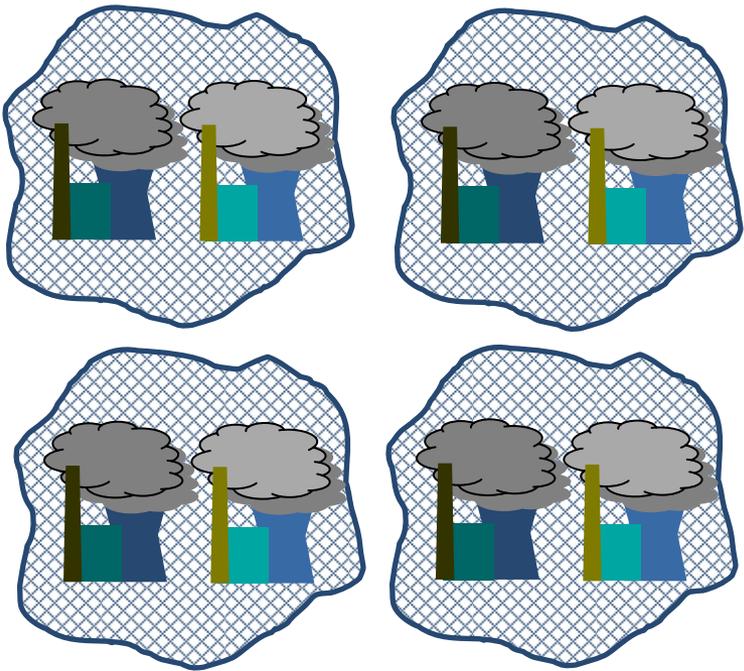
- Bei Kurzschluss: Bildung von **Teilnetzen** durch **übergeordnete Übertragungsspannung**
- **Kurzschlussleistung** und Kurzschlussströme des Netzes begrenzt.



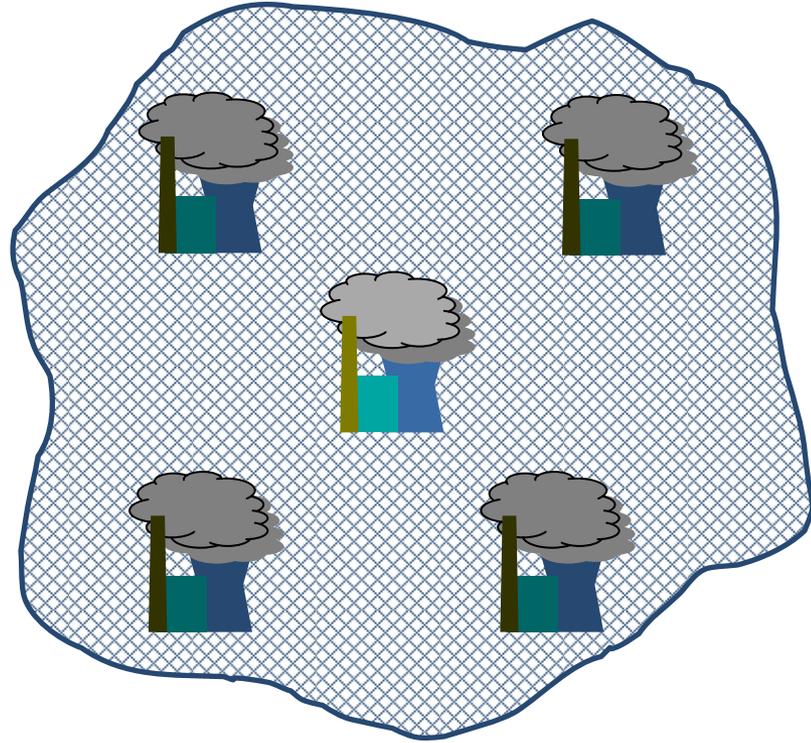
Heute beherrschbare Kurzschlussströme: **80 kA = 80 000 Ampere**

Zusammenwachsen zum Verbundbetrieb

4 Einzelnetze mit
Redundanz: → 8 Kraftwerke

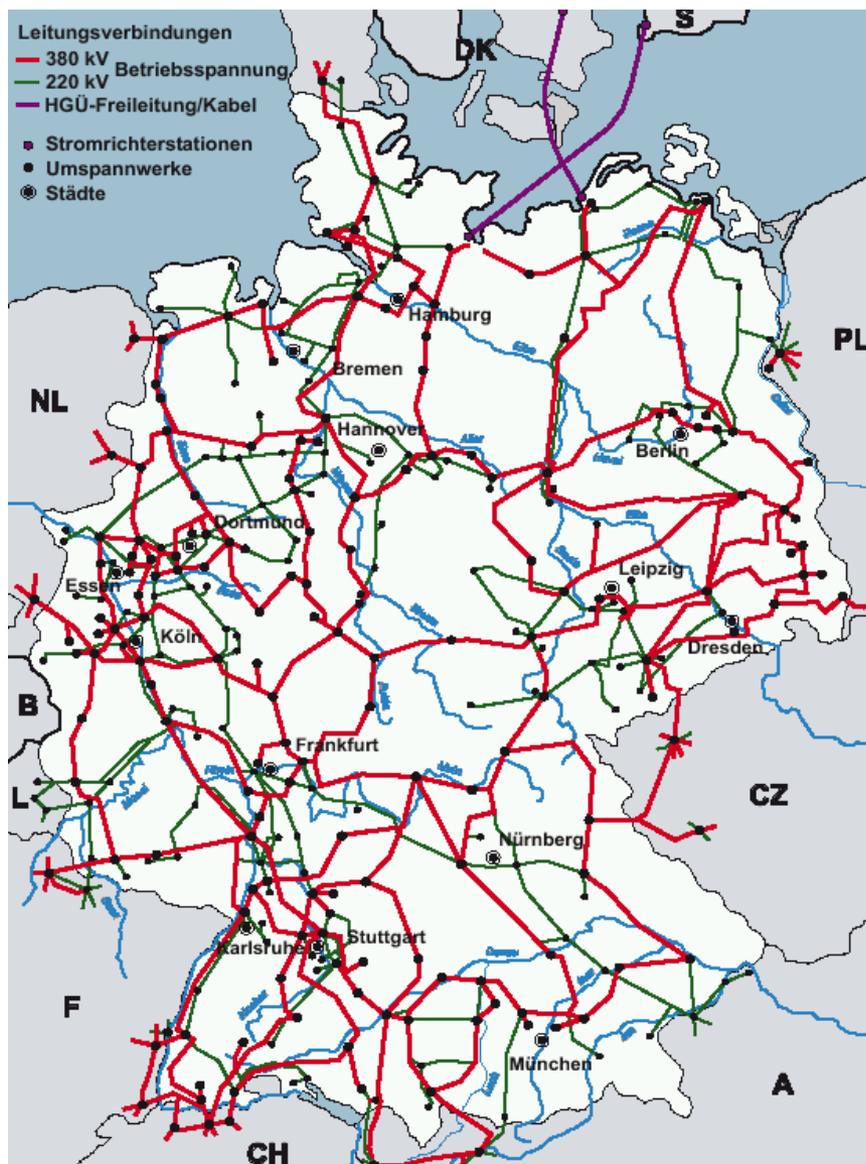


1 Verbundsystem mit
Redundanz: → 5 Kraftwerke





Zusammenwachsen zum Verbundbetrieb



Das deutsche Höchstspannungsverbundnetz

- 380 kV
- 220 kV
- HGÜ (Seekabel)

HGÜ = Hochspannungs-Gleichstromübertragung

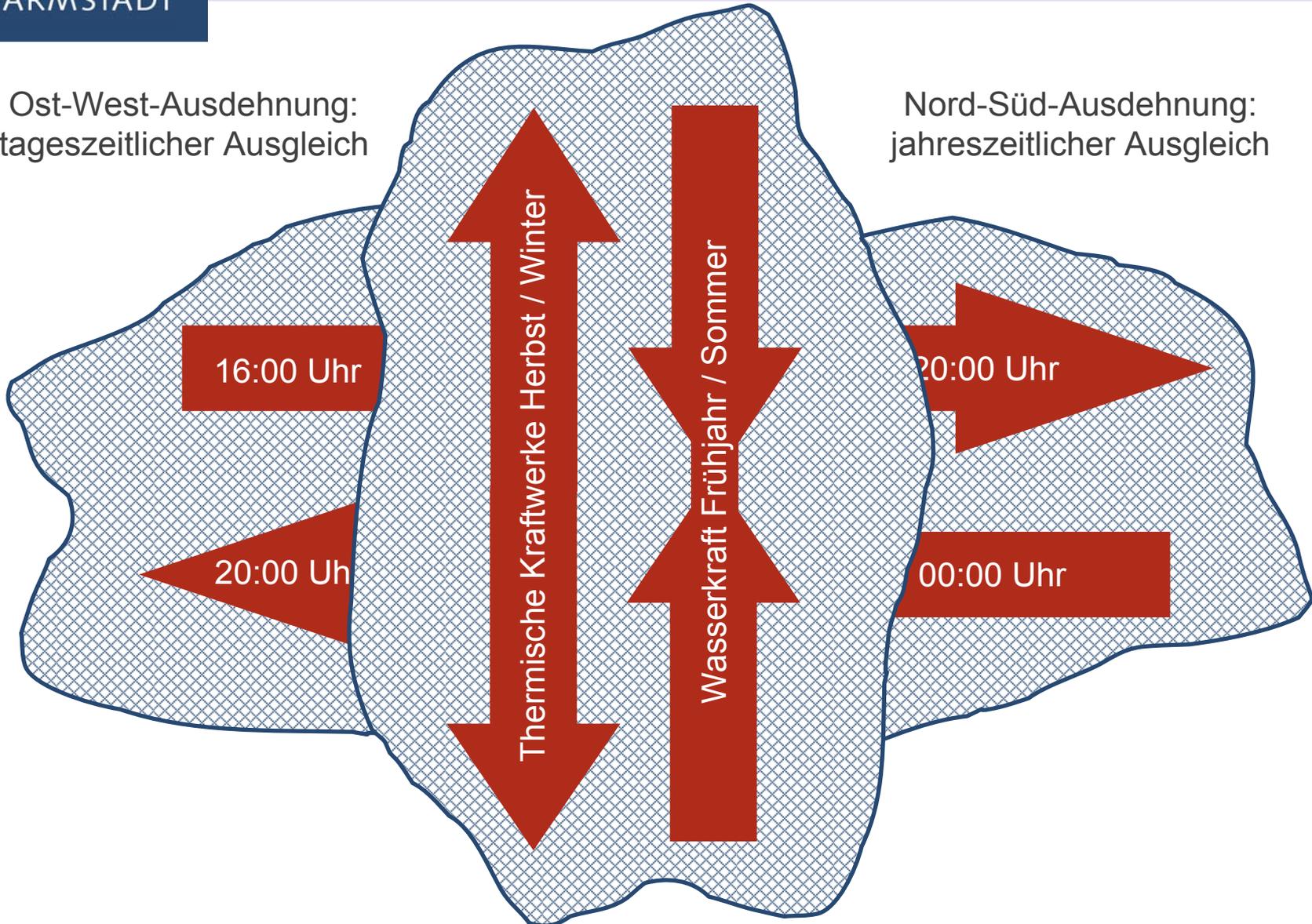
Quelle: VDN



Zusammenwachsen zum Verbundbetrieb

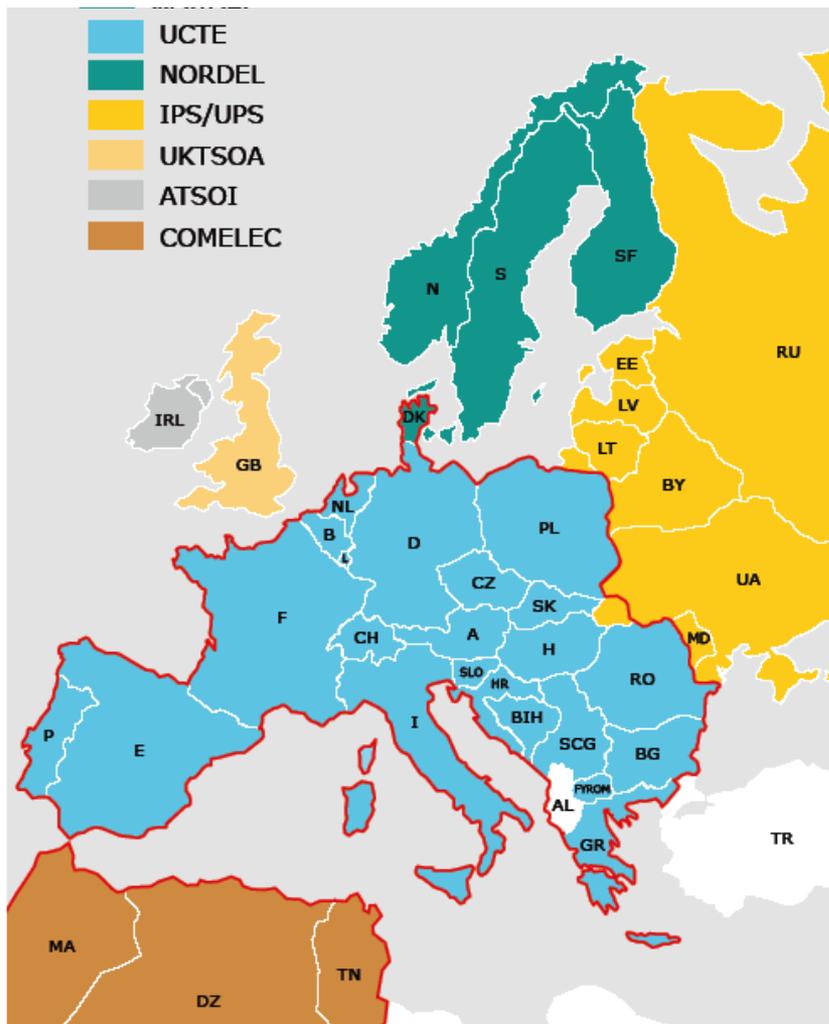
Ost-West-Ausdehnung:
tageszeitlicher Ausgleich

Nord-Süd-Ausdehnung:
jahreszeitlicher Ausgleich



Zusammenwachsen zum Verbundbetrieb

Das europäische Verbundnetz (UCTE-Netz) (2006):
611 GW installiert (440 GW gesichert) → eines der größten Verbundsysteme der Welt



UCTE

L'Union pour la Coordination du Transport de l'Electricité

– insgesamt 22 europäische Länder

IPS

Interconnected Power Systems

– Russland, Weißrussland, Ukraine, Estland, Lettland, Litauen

NORDEL

Nordic Electricity System

– Dänemark, Island, Finnland, Norwegen, Schweden

ATSOI, UKTSOA

Association of Transmission System Operators of Ireland, United Kingdom
Transmission System Operators' Association
– Irland und Großbritannien

Quelle: VDN 2006

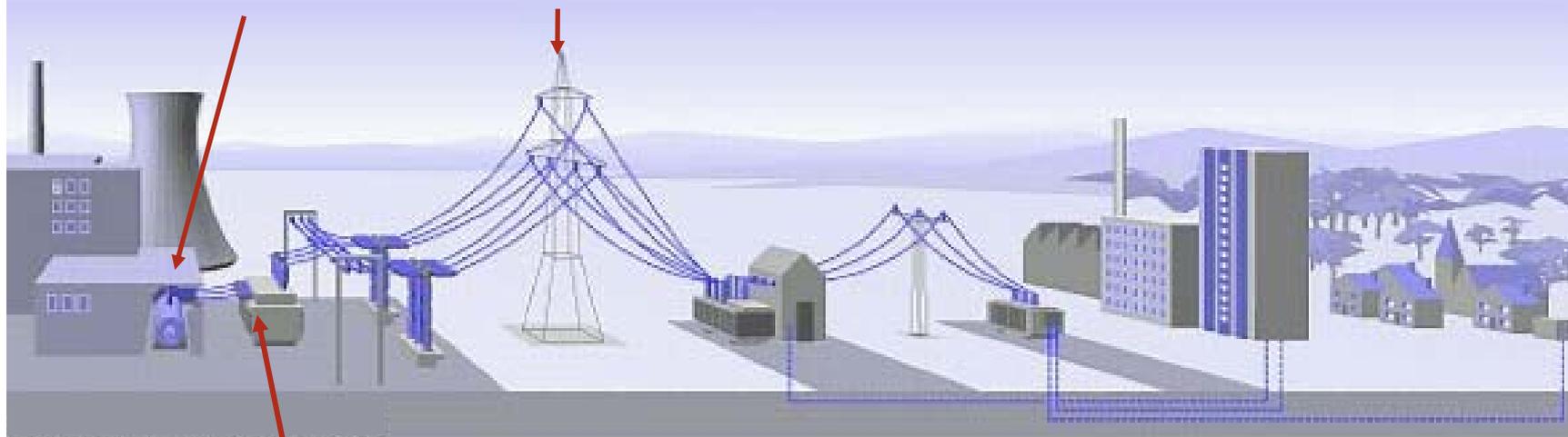
Vom Erzeuger zum Verbraucher

Quelle: Siemens

Für Übertragung von 1000 MW:

$I \approx 20.000 \text{ A}$

$I \approx 1.500 \text{ A}$



13 kV ... 27 kV

110 kV ... 380 kV

12 kV ... 36 kV

0.4kV

"Hoch- und Höchstspannung"

"Mittelspannung"

"Niederspannung"

Blocktransformator im Kraftwerk:

Transformiert Generatorspannung auf Netzspannung



Leistungstransformatoren

Blocktransformator im Kraftwerk: (Leistung = Generatorleistung)
Transformiert Generatorspannung auf Netzspannung



*"Schwarze
Pumpe"*

*Quelle:
Siemens AG
Germany*



Leistungstransformatoren

Transformatoren sind ölgefüllt und können im Falle eines internen Kurzschlusses leider auch einmal brennen zum Glück äußerst selten!



Übertragungsnetz

Blitzeinschlag ins Leiterseil



©1991 Niagara Mohawk Power Corporation

Beherrschung der Spannungsbeanspruchungen im Netz

- im Dauerbetrieb
- bei zeitweiligen Spannungserhöhungen
- bei Schalthandlungen
- bei Blitzeinschlägen

Blitzeinschlag ins Erdseil

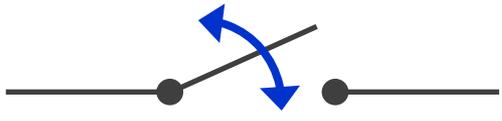


©1995 Niagara Mohawk Power Corporation

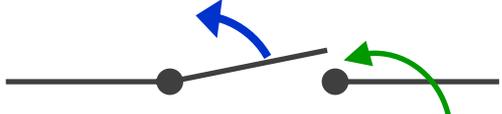


Hochspannungs-Leistungsschalter

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik



hoher Strom



hohe Spannung



Überschlag, Lichtbogen



Hochspannungs-Leistungsschalter

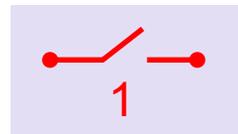


Quelle: Siemens

SF₆-Leistungsschalter

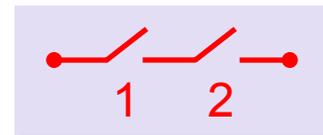
Lösch- und Isoliermedium:
SF₆ (Schwefelhexafluorid)

- eine Schaltstrecke



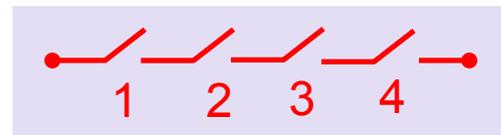
220 kV / 60 kA

- zwei Schaltstrecken



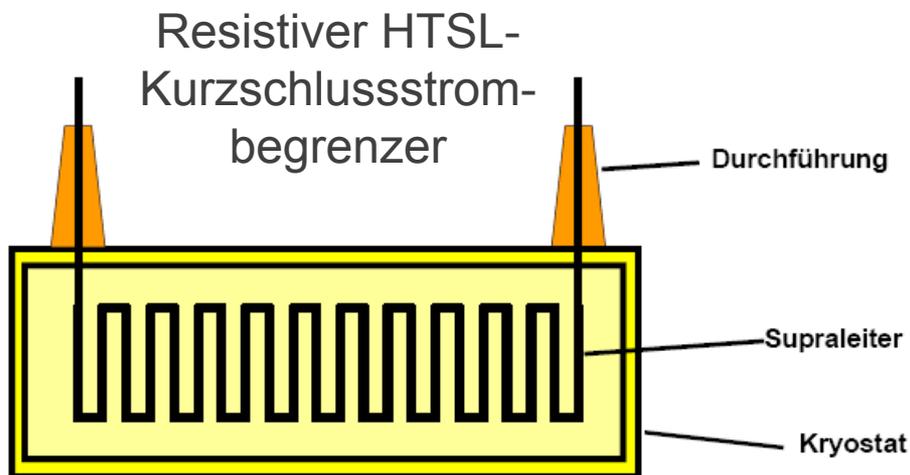
550 kV / 80 kA

- vier Schaltstrecken:



800 kV (1100 kV) / 60 kA

Supraleitende Kurzschlussstrombegrenzer (Prototypen seit 2004)



Nennleistung	10 MVA
Nennspannung	10 kV
Nennstrom	600 A
Betriebstemperatur	66 K
Strombegrenzung	18 kA → 7,8 kA
Begrenzungsdauer	60 ms



HTSL: Hochtemperatur-Supraleiter -196°C

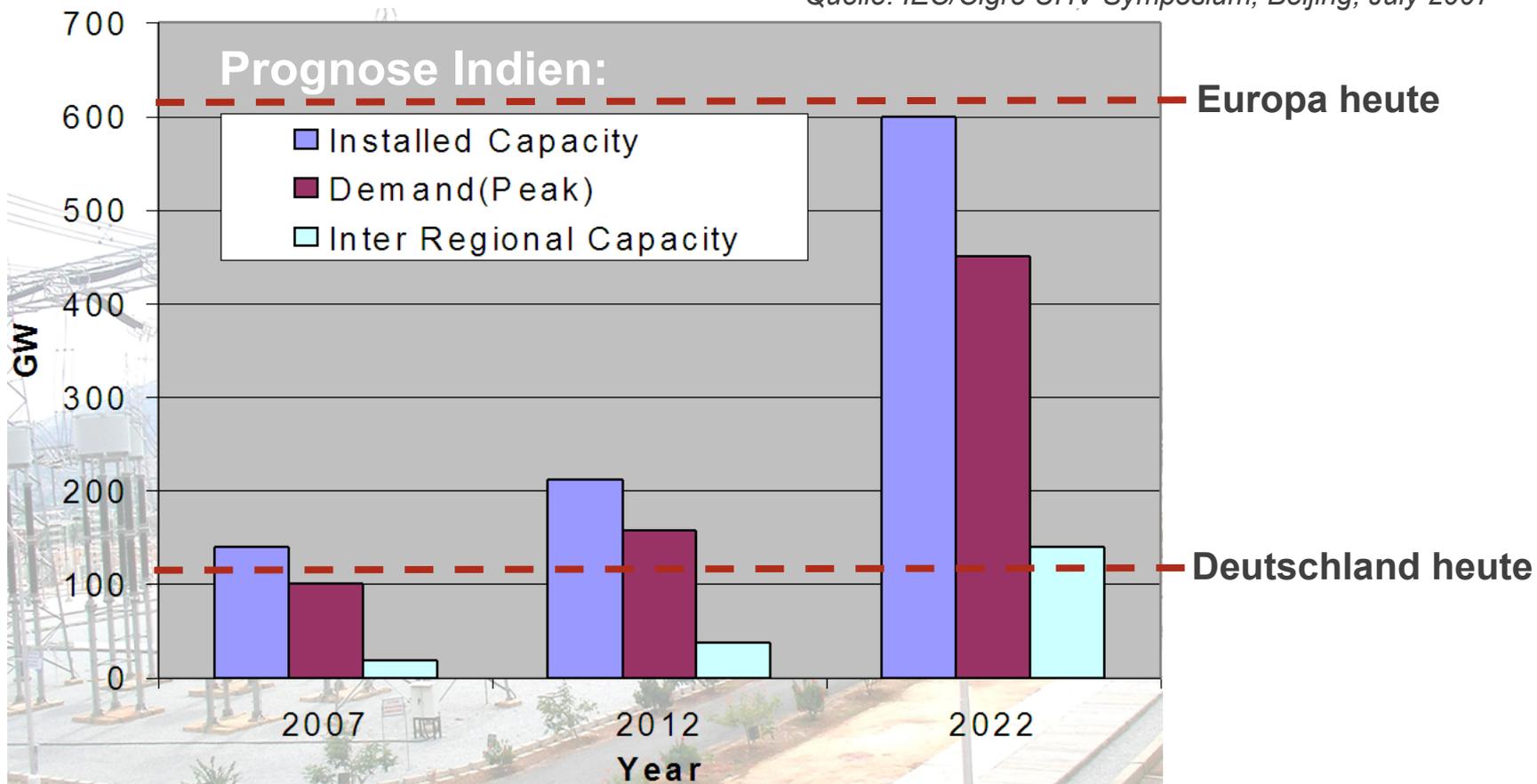
Quelle: ACCEL Instruments GmbH



Neue Höchstspannungsebenen

Enormer Hunger nach elektrischer Energie in **China** und **Indien!**

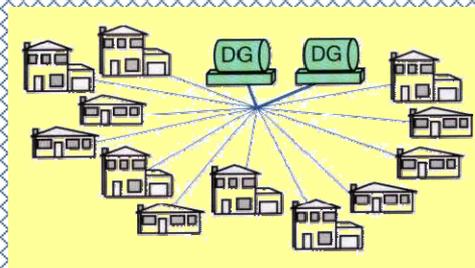
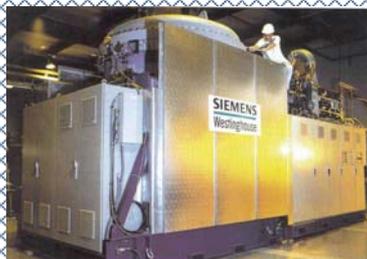
Quelle: IEC/Cigre UHV Symposium, Beijing, July 2007



zukünftig $U_n = 1100/1200$ kV (China, Indien) $\rightarrow \gg 1000$ km



Ergänzung durch dezentrale Systeme



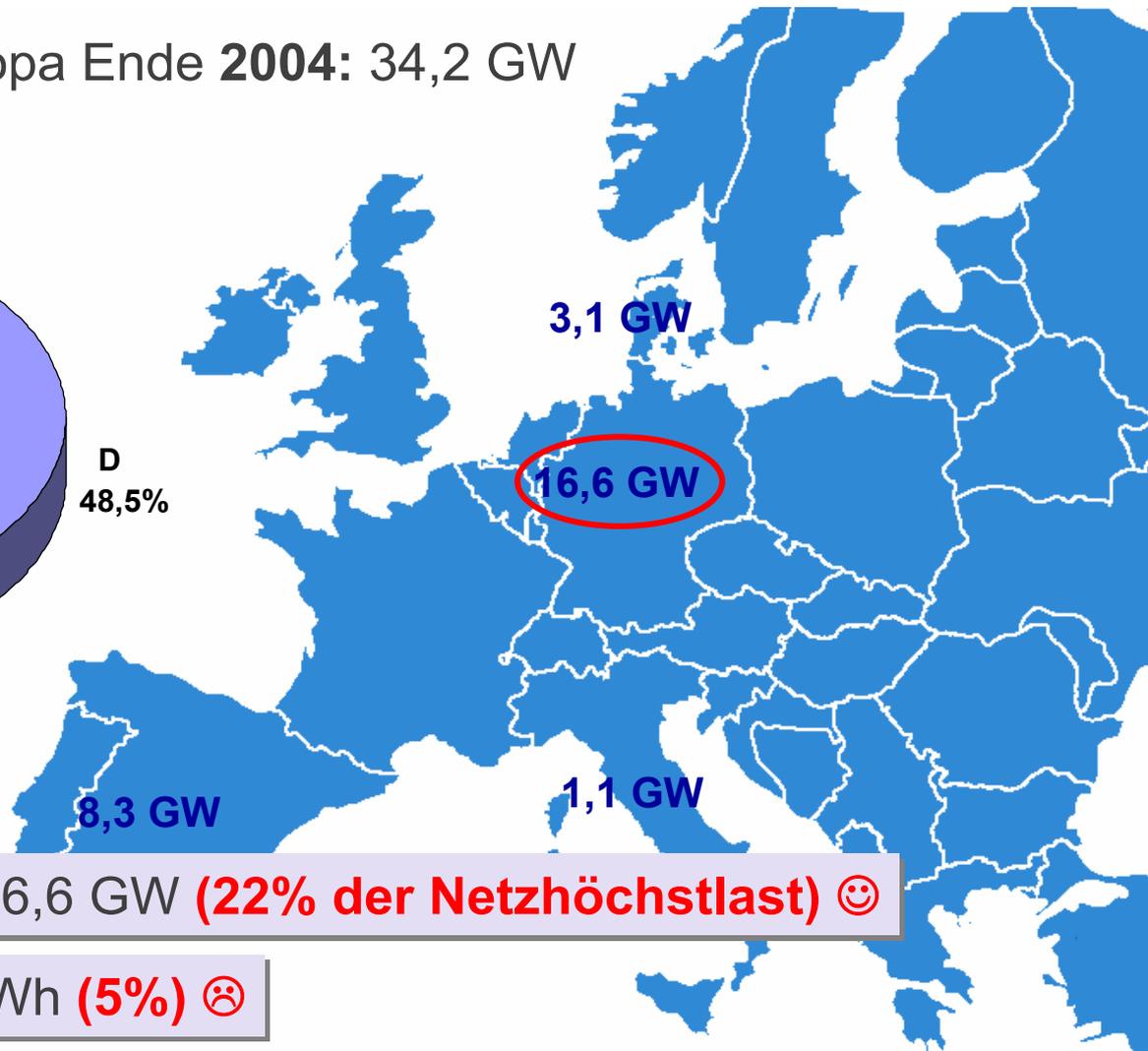
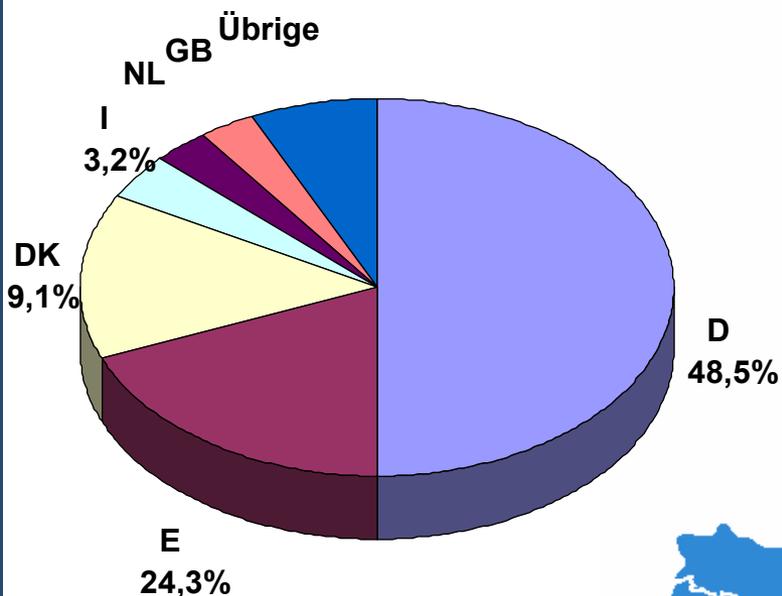
Struktur der elektrischen Energieversorgung

Zukünftig: zunehmend auch dezentral (im Netz verteilt) → geänderte Lastflüsse!



Einbindung von Windenergie

Windkraftleistung in Europa Ende 2004: 34,2 GW

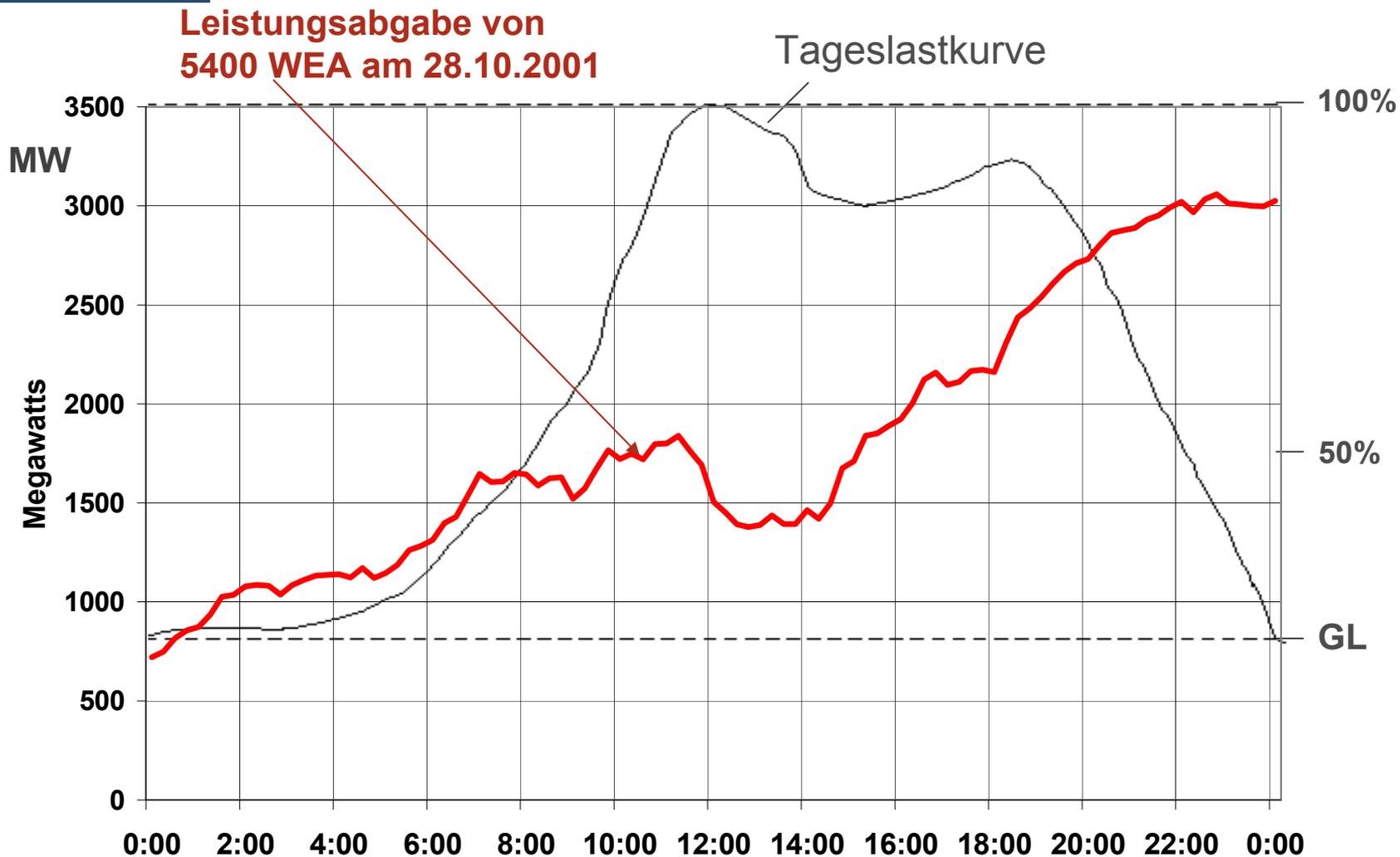


In Deutschland (2004):

- installierte Leistung: 16,6 GW (22% der Netzhöchstlast) 😊
- erzeugte Arbeit: 26 TWh (5%) ☹️



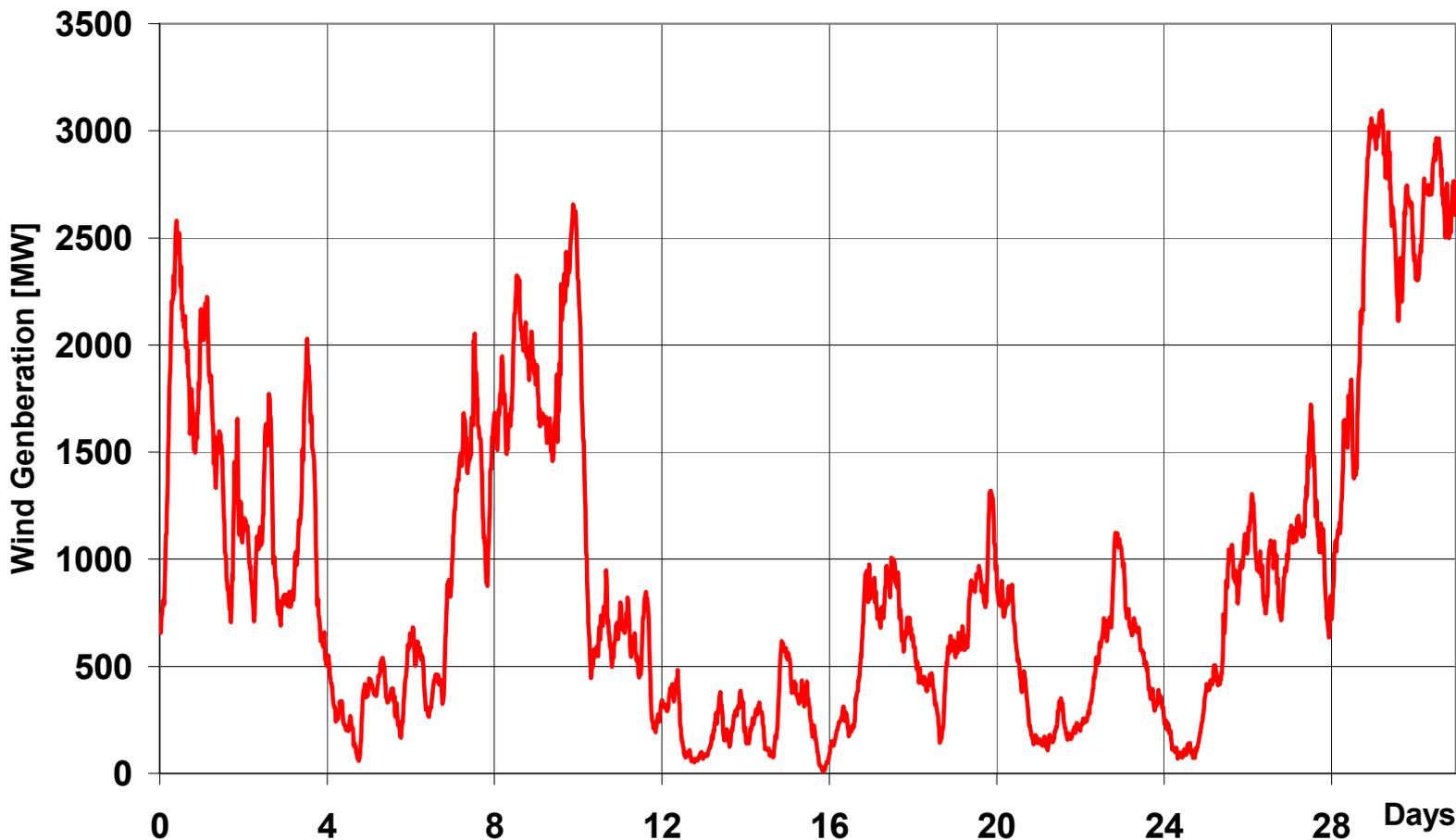
Windenergie: Zeitliche Verfügbarkeit



Quelle: ISET



Leistungsabgabe von 5400 WEA im Oktober 2001



Windenergie: Zeitliche Verfügbarkeit

Für jedes installierte Megawatt Leistung aus Windenergieanlagen muss ein Megawatt schnell verfügbarer **Reserveleistung** aus konventionellen Kraftwerken vorgehalten werden.

Bestehende Kraftwerke müssen zunehmend für **Regelungsaufgaben** eingesetzt werden und arbeiten damit nicht mehr wirtschaftlich optimal.

Mehr Großspeicher sind erforderlich.



Ideale Partner! Jedoch:
in Deutschland keine neuen Pumpspeicherwerke mehr möglich

Zukunft: Magnetische Großspeicher?

Supraleitende Ringspulen
- 269 °C

Energie im Magnetfeld gespeichert

520 m

26 m

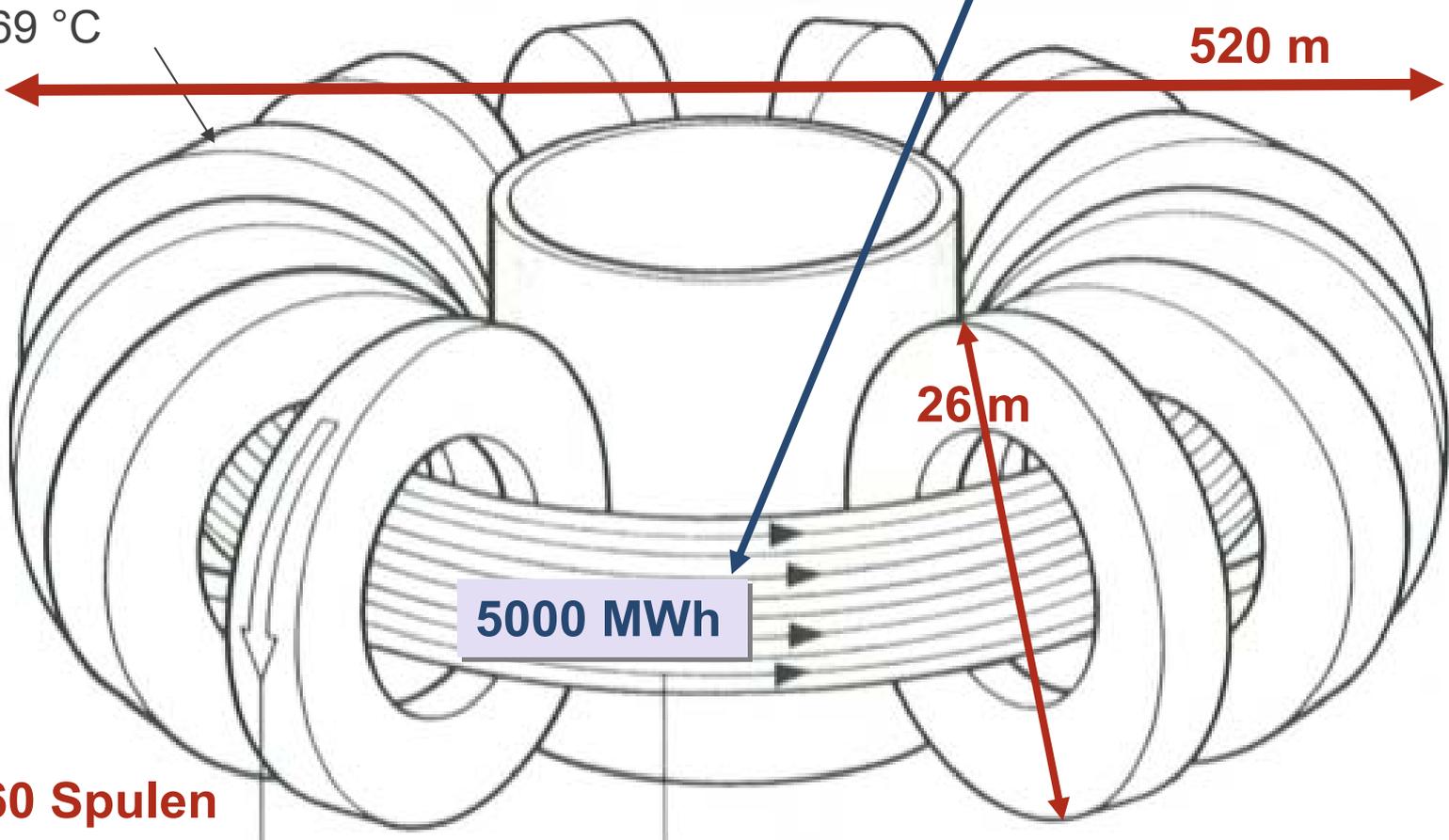
5000 MWh

360 Spulen

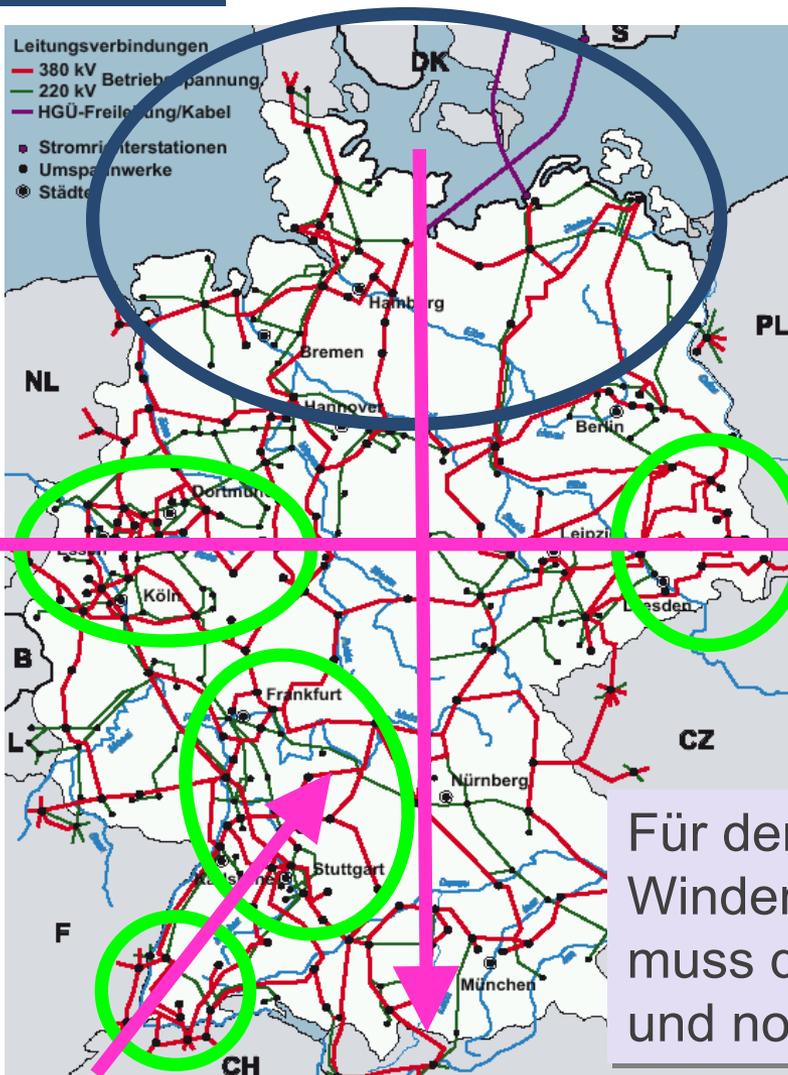
Spulenstrom
150 kA

Magnetische Flussdichte
9 T

Quelle: Max-Planck-Gesellschaft



Windenergie: Fort- und Durchleitung



Geringe Netzdichte, jedoch zunehmend große Einspeisung



Große Netzdichte, jedoch heute schon großer Lastfluss



Hauptlastflussrichtungen

Für den zunehmenden Einsatz von Windenergieanlagen und Fremdbezug muss das Hochspannungsnetz **erhalten** und noch **weiter ausgebaut** werden.

Freileitung oder Kabel?

Könnten Freileitungen nicht durch Kabel ersetzt werden?
In der Mittelspannungsebene ist das gängige Praxis:



Kabel für Höchstspannung?

In den Hoch- und Höchstspannungsebenen sprechen **wirtschaftliche** und **technische** Gründe **gegen**.

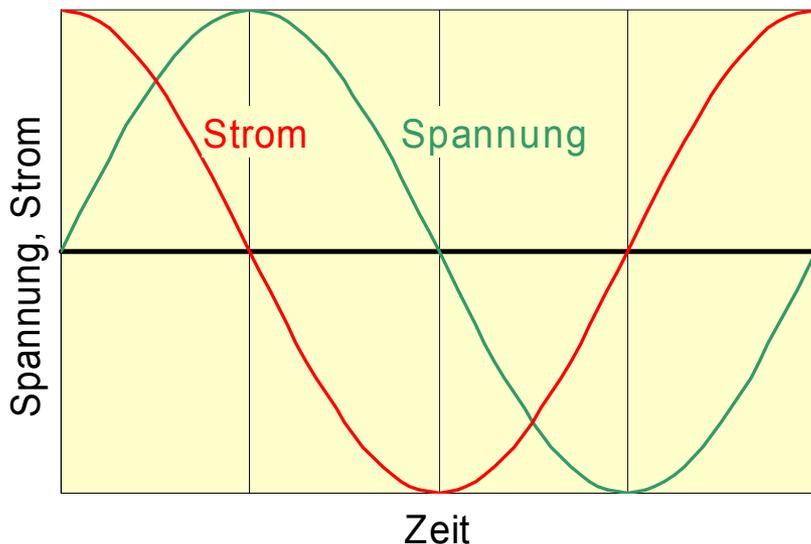
- 1) Die Kabel müssen in begehbaren Tunneln verlegt werden.
Kosten etwa 10 mal höher als die einer Freileitung



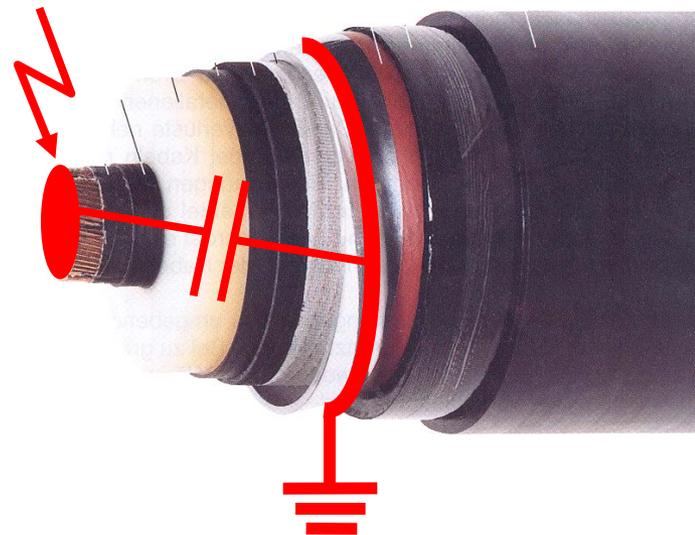
420-kV-Kabel
(Berlin)

Kabel für Höchstspannung?

2) Kabel haben eine sehr große Kapazität, die bei anliegender Wechselspannung dauernd **umgeladen** werden muss (sog. dielektrischer Verschiebungsstrom; "**Blindleistung**").



Strom eilt der Spannung 90° vor.



Dieser Strom ist bereits bei 50 km Kabellänge so hoch, dass **keine zusätzliche Wirkleistung** mehr übertragen werden kann.

Die existierenden Seekabelverbindungen arbeiten daher z.B. mit **Gleichstrom** (hohe Kosten!)

- **Grundbegriffe zur Energie**
- **Fakten zur elektrischen Energie**
- **Elektrische Energieerzeugung – heute und morgen**
- **Elektrische Energieverteilung – Herausforderungen**
- **Effiziente Nutzung elektrischer Energien**
- **Energie-Ingenieure/-innen – Zeitgemäße Ausbildung**
- **Ausblick**

Energieverbrauch 2004 Deutschland

- Bereitgestellte Endenergie: 9240 PJ = 2566 TWh
- Endenergieverbrauch je Einwohner (82,3 Mio.):
 $2566 \text{ TWh} / 82\,300\,000 = \underline{31\,000 \text{ kWh pro Jahr}}$
- 2566 TWh Endenergieverbrauch in Deutschland:

Haushalt	30 %
Verkehr	28 %
Industrie	26 %
Gewerbe/Handel/Dienstleistungen	16 %

DAVON 20 % ELEKTRISCHE ENERGIE !

1 TWh = 1 Tera-Wattstunde = 1000 Milliarden Wh



Sparprogramm der EU

- **EU: Grünbuch** „Eine europäische Strategie für nachhaltige, wettbewerbsfähige und sichere Energie“ (2006)
- In der EU benötigte Primärenergie **zur Hälfte** importiert.
- **Sparprogramm:**
 - Verbreiterung der Rohstoffbasis
 - Erhöhung der Umwandlungswirkungsgrade
 - verstärktes Energiesparen
- **Ziel:** Bis 2020: **20% der Energie** p.a. EU-weit eingespart
- Kostensenkung von ca. 60 ... 100 Mrd. Euro p.a.,
- Minderung CO₂-Ausstoß: um 780 Mio. Tonnen p.a.

→ **Sparprogramme in Industrie, Verkehr, Haushalt !**

Elektrische Energie sparen in der Industrie

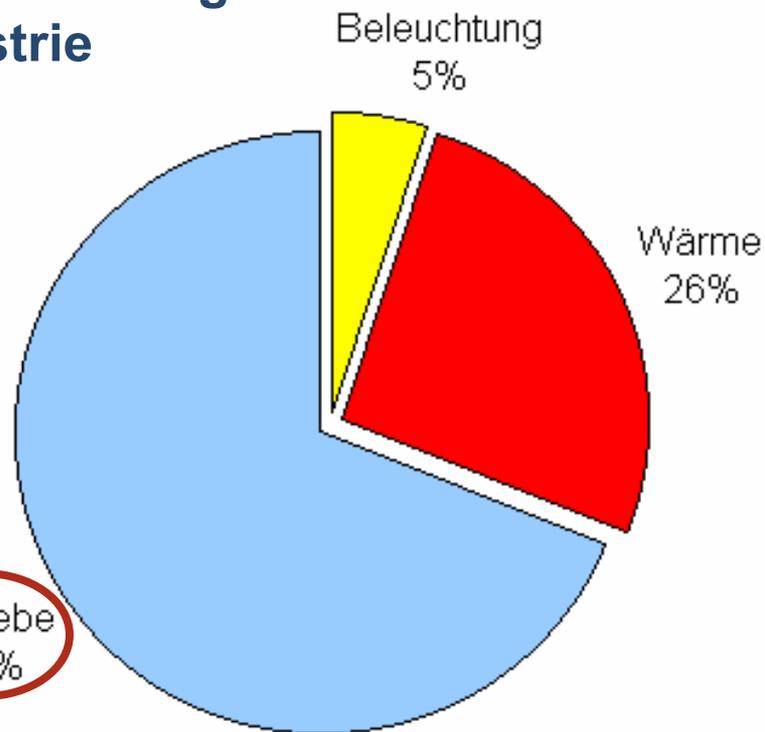
Nutzung der elektrischen Energie in der deutschen Industrie

- Etwa **47%** der elektrischen Energie werden in Deutschland **in der Industrie** benötigt.
- Davon werden 69% zur Umwandlung in **mechanische Arbeit** verwendet.

Antriebstechnik:

Nutzung der Endenergie:

- Industrie: 5,2%
- Haushalt, Gewerbe, Verkehr: ca. 5%



Geforderte CO₂-Minderung EU-weit:

- Industrieantriebe: - 39 Mio. To.
- Haushalt, Gewerbe, Verkehr: - 41 Mio. To.
- Antriebe insgesamt (EU): - 80 Mio. To.

Quelle: Automatisierungstechnische Praxis, 2002



Industrielle Antriebstechnik in *Deutschland*

Geschätztes Energieeinsparpotential:

- über den Motorwirkungsgrad **1,4% ... 3%**
- über drehzahlveränderbare Antriebe **8 ... 10%**
- Optimierung des Gesamtsystems **20%**

Beispiel: **Motorwirkungsgrad:**

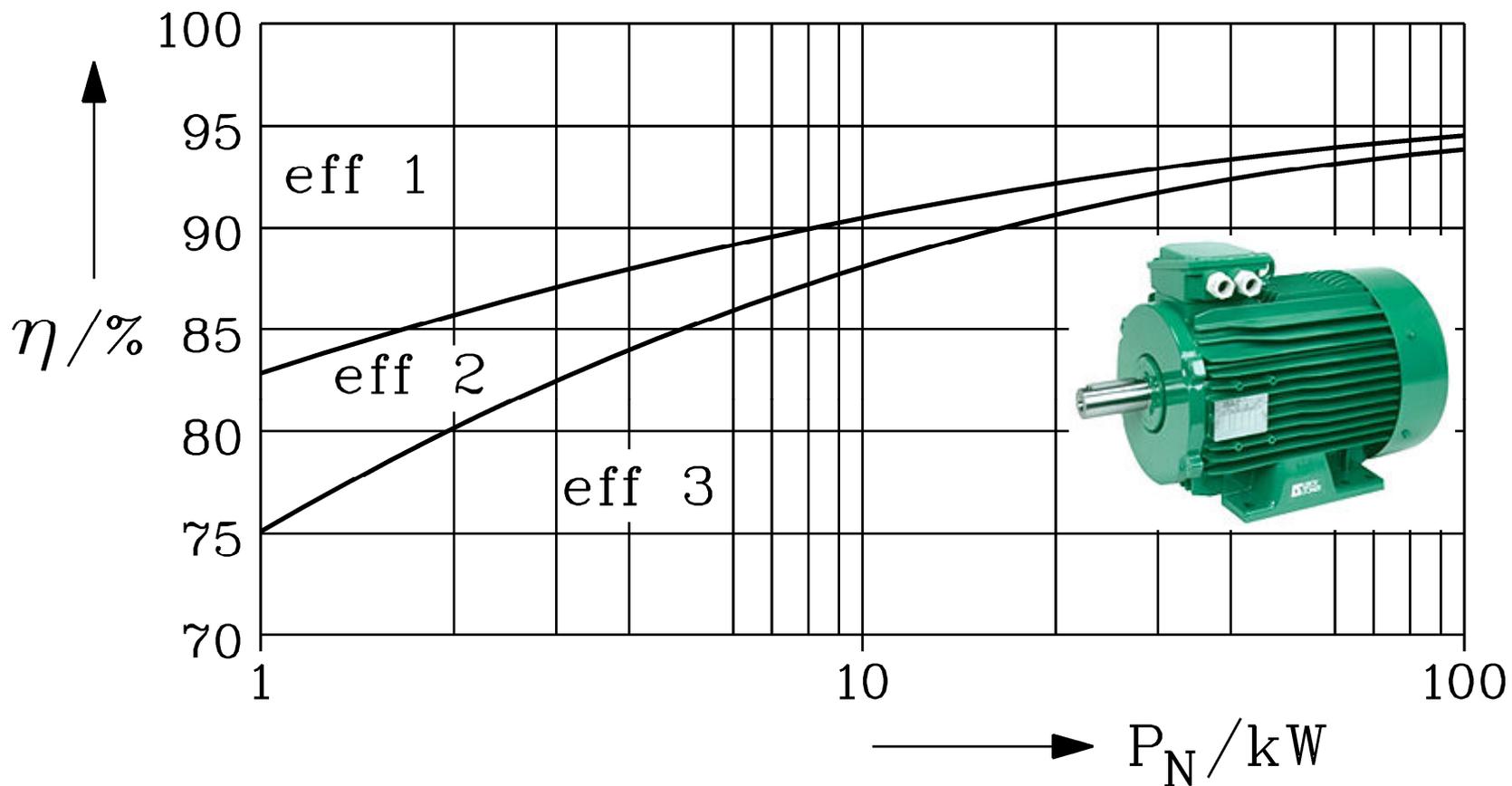
- a) Elektrische Energienutzung (2004): 504 TWh (100%)
- b) Industrie: 237 TWh (47%)
- c) Antriebstechnik: 163 TWh (69% von 47%)

Maßnahme: mittlere Wirkungsgraderhöhung 4 %

- durch wirkungsgradgesteigerte Motoren
- für 50 % der Industrieantriebe

ergibt **1,4 %** (3,3 TWh) Reduktion p.a. des Industriestromverbrauchs

Wirkungsgradgesteigerte Norm-Asynchron-Motoren



- **Wirkungsgrad η** über der **Motornennleistung P_N** , vierpolige Norm-asynchronmotoren, Nenndrehzahl ca. 1500/min, 50 Hz Netzfrequenz
- Überwiegend **eff2-Motoren** verkauft, eff1-Motoren zu teuer

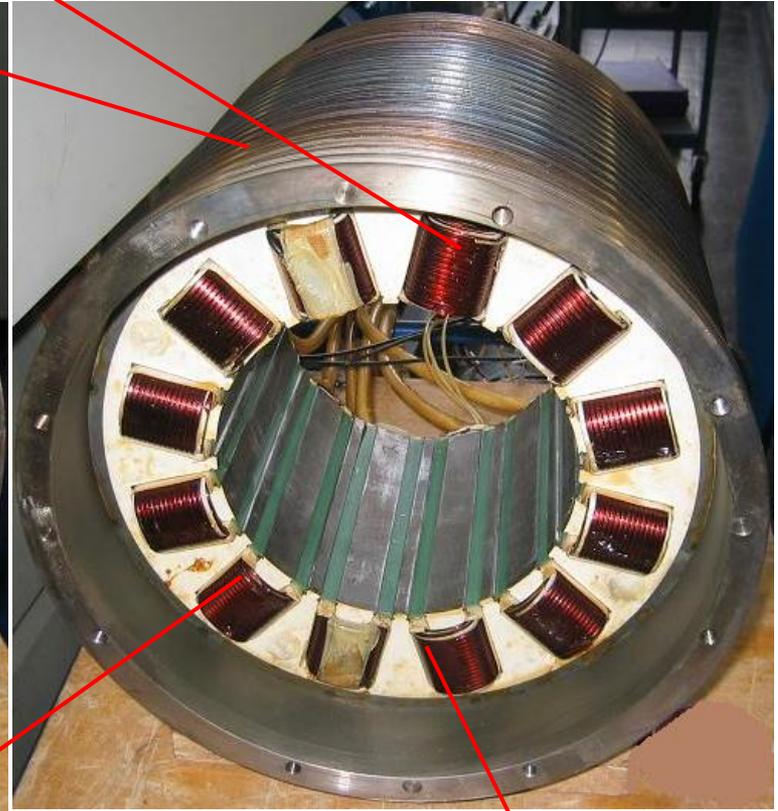
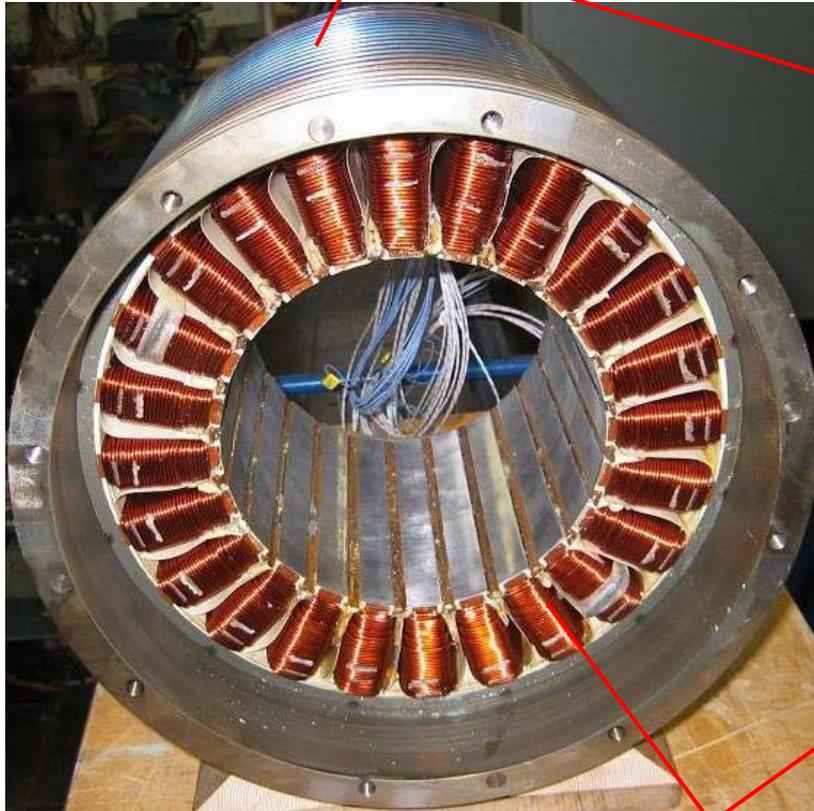
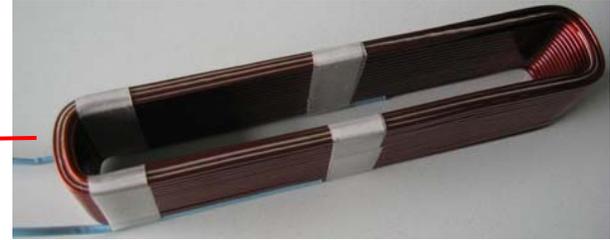


Alternative Motorkonzepte: Permanentmagnetmotoren

**Kompakte Stator-Kupfer-Wicklung –
geringere Stromwärmeverluste**

Kühlmantel

Zahnspule



Stator-Wicklung

Blechpaket

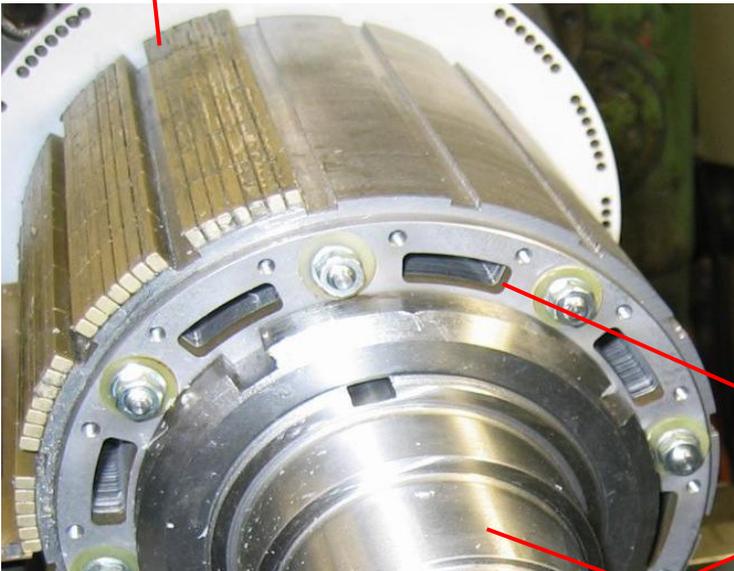
Alternative Motorkonzepte: Permanentmagnetmotoren (PM)

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

Permanentmagnete erzeugen
verlustfrei das Magnetfeld



Magnet



Welle

Kohlefaserbandage

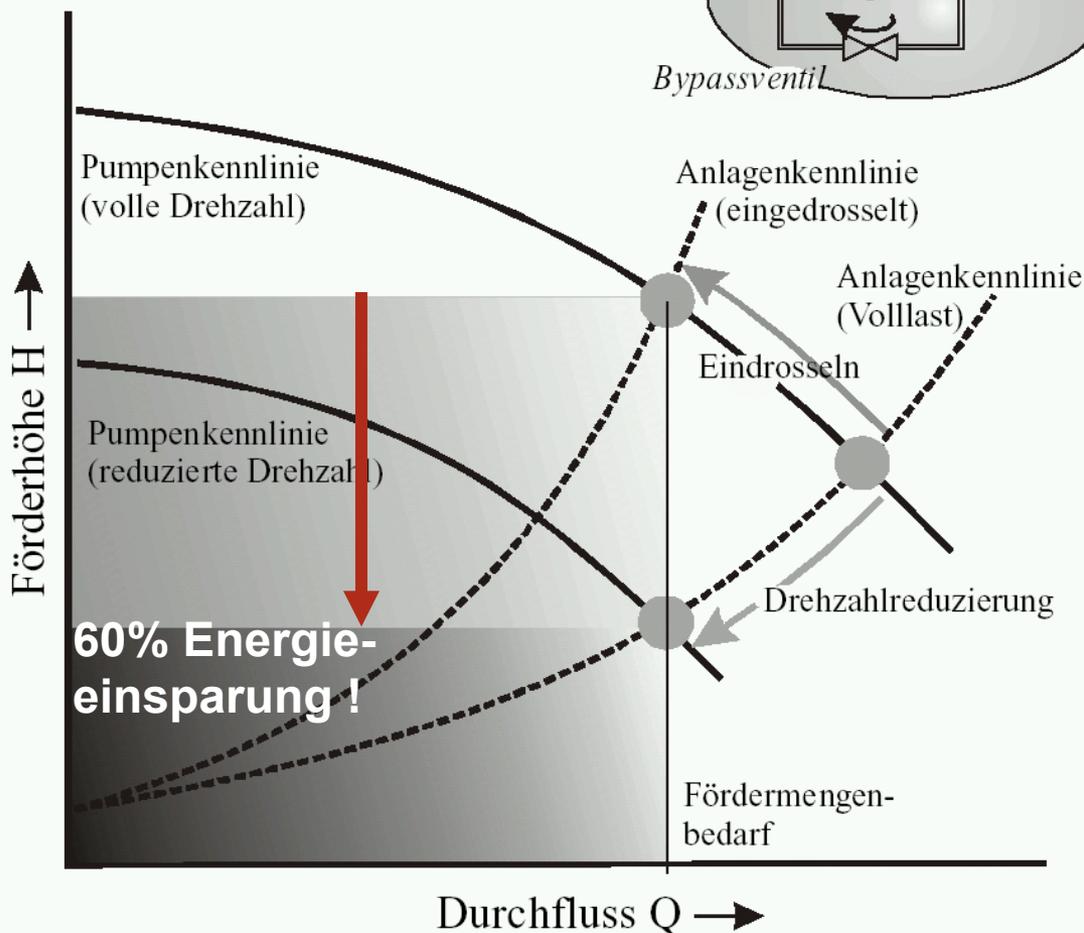
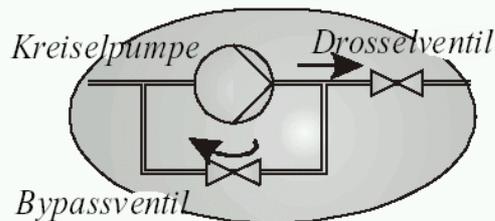


Wirkungsgrad:
94 % (ggü. 89 %)

Rotoraufbau

Drehzahlanpassung spart Verluste

Pumpe: Volumenstrom soll verändert werden



a) **Volumenstrom-Drosselung** beim Festschritthantrieb

b) Durch **Drehzahlveränderung** angepasster Volumenstrom

Bis zu 60% Energieeinsparung !

Quelle: KSB, Frankenthal

Motoren mit Supraleiterwicklung

HTSL – 4-poliger 4 MW-Synchrongenerator für Schiffe im System-Prüffeld, 1800/min, 60 Hz, Rotorwicklung bei -243°C

Verluste - 60%

Masse - 35%

Volumen - 20%



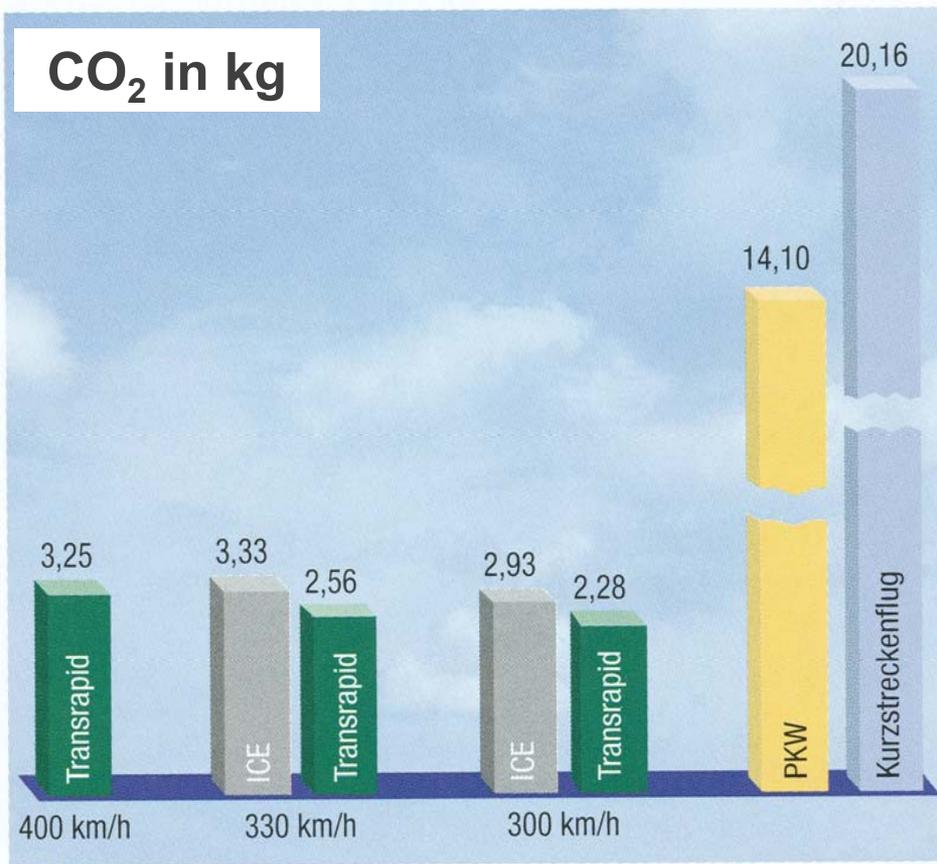
Quelle:
Siemens AG



Emissionen / Energiebedarf Hochgeschwindigkeitsbahnen

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

CO₂-Emission in kg je 100 Sitzplätze und je 1 Kilometer Fahrstrecke



Spezifischer Energiebedarf pro Sitzplatz und Kilometer:

v	ICE 3	TRANSRAPID
km/h	Wh	Wh
200	29	22
300	51	34
400	-	52

Quelle: Thyssen



Antriebe im Haushalt

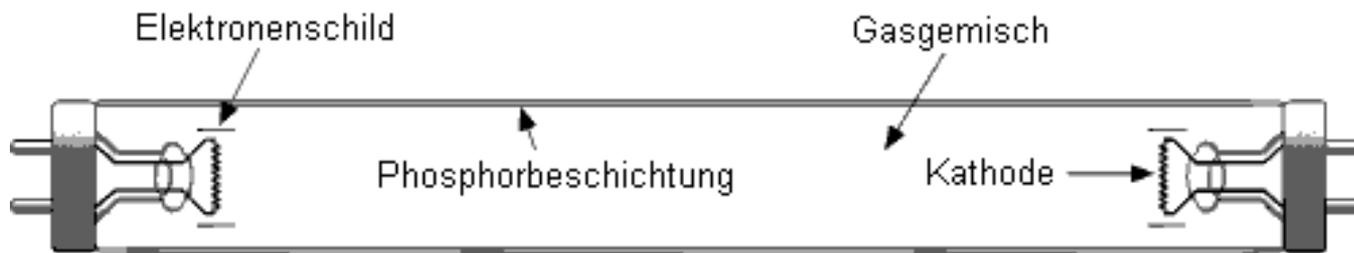
- **Kühlgeräte: Kompressoren:**
robuste, billige Widerstandshilfsstrangmotoren (einphasige Asynchronmotoren)
- **Heizungspumpen:** Kondensatormotoren (als Spaltrohrmotorpumpen)
Spaltrohr: großer magnetisch wirksamer Luftspalt
Wirkungsgrad nur ca. **30 ... 40 %**
- **Laugenpumpenantriebe** (Waschmaschinen, Geschirrspülern):
Spaltpolmotoren: Wirkungsgrad: **5 ... 20%**
- **Alternative:** PM-Synchronmotoren mit kostengünstigen Ferritmagneten
Wirkungsgrad: **60 ... 70%**
Integrierte Motorelektronik erforderlich
Power-factor-correction-Schaltung für sinusförmigen Netzstrom
- **PM-Antriebe helfen Energie sparen, sind aber teurer !**

Energiesparen im Haushalt - Energiesparlampen

Gerät	Wirkungsgrad in %
normale Glühlampe	5 - 10 Rest: Wärme!!!
Halogenlampe	ca. 15
Leuchtstofflampe	30 – 50 → ökologisch sinnvoll!
Licht-emittierende Dioden (LED)	derzeit: 15, Tendenz steigend

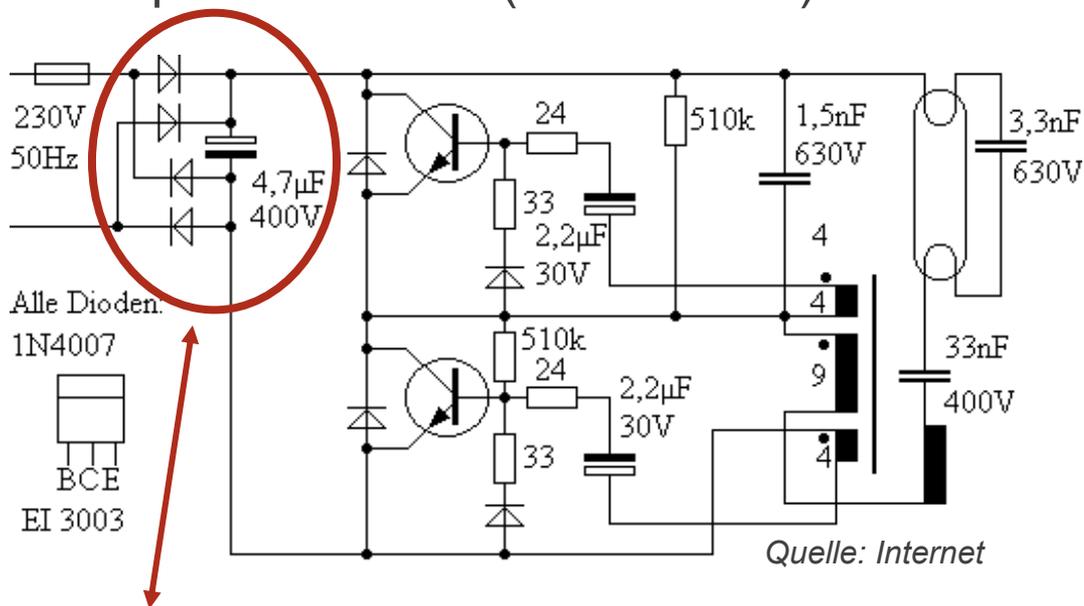
Quelle: Landesinstitut für Schule und Weiterbildung, Soest

Aufbau einer **Leuchtstofflampe**:



Energiesparen im Haushalt - Energiesparlampen

Elektronisches Vorschaltgerät – Versorgung der Röhre über einen hochfrequenten Strom (30...50 kHz) und Schnellstartvorrichtung

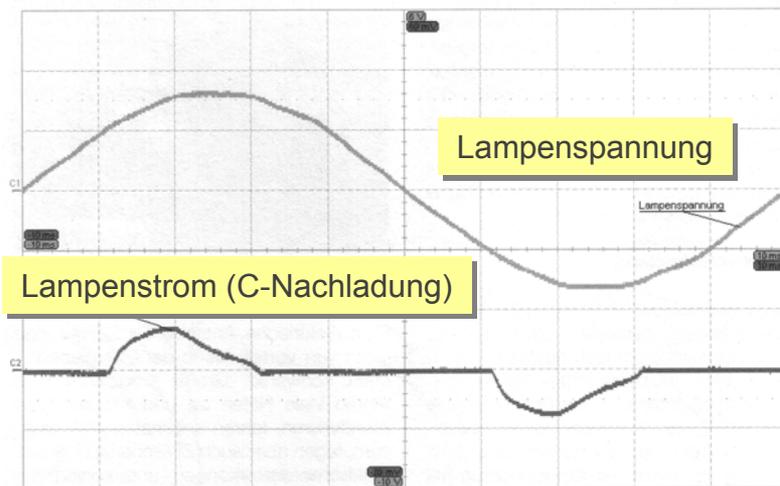


Alle Dioden.
1N4007
BCE
EI 3003

Problem: heutige Energiesparlampen verwenden eine einfache, ungesteuerte einphasige **Gleichrichterbrückenschaltung** mit Glättungskondensator (Kosten- und Platzgründe) → **Nachladestromspitze**



Energiesparen im Haushalt - Energiesparlampen



→ Erzeugung von **Oberschwingungen** im Netzstrom

Typische Werte (bezogen auf Grundschwingung 50 Hz):

- 3. Harmonische: ca. 1997 → 90%, heute → 76%
- 5. Harmonische: ca. 1997 → 75%, heute → 38%
- 7. Harmonische: ca. 1997 → 60%

Abhilfemaßnahmen (Beispiele; Kosten! Platz!):

- Filterung
- Vier-Quadrantensteller (sinusförmige Modellierung des Stroms)

Quelle: ETG-Mitgliederinformation Juni 2007

Nipkow, Bush: "Stand-by-Verbrauch von Haushaltsgeräten"
Bulletin SEV/VSE 3/04:

"Die Stand-by-Verluste der Haushaltsgeräte in der Schweiz summieren sich gesamthaft auf rund 400 GWh.....Den größten Anteil – rund 70 Prozent – bilden die **Warmhalteverluste von Kaffeemaschinen.**"

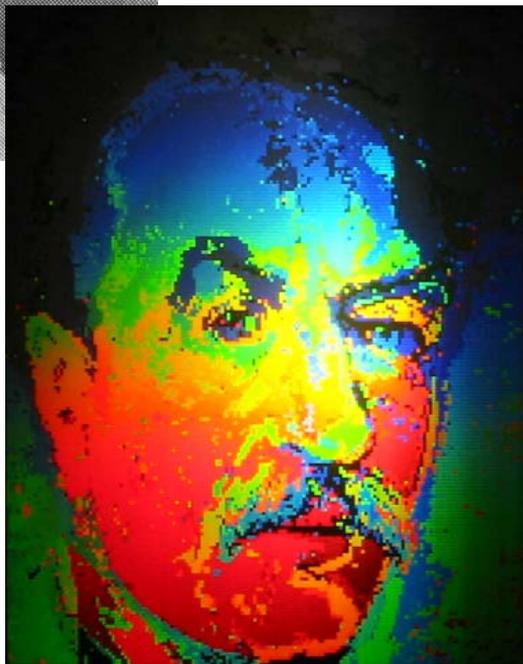
400 GWh = 46 MW · 8760 h

Bevölkerungszahl Schweiz: 7 Mio.

Hochrechnung auf Deutschland ergäbe:

4,6 TWh = ½ Kernkraftwerk (600 MW) für Standbyfunktionen und Kaffeemaschinen!!

- **Grundbegriffe zur Energie**
- **Fakten zur elektrischen Energie**
- **Elektrische Energieerzeugung – heute und morgen**
- **Elektrische Energieverteilung – Herausforderungen**
- **Effiziente Nutzung elektrischer Energien**
- **Energie-Ingenieure/-innen – Zeitgemäße Ausbildung**
- **Ausblick**



" Qualität und Innovation
aus Tradition "

**Prof. Dr. Dr.-Ing. E. h.
Erasmus Kittler**
(1852-1929)

Weltweit erster eigener Lehrstuhl,
Fakultät und Studiengang für
Elektrotechnik **1882**

Darmstadt 1882-1915

**"Vater der elektrischen
Energietechnik
in Deutschland"**

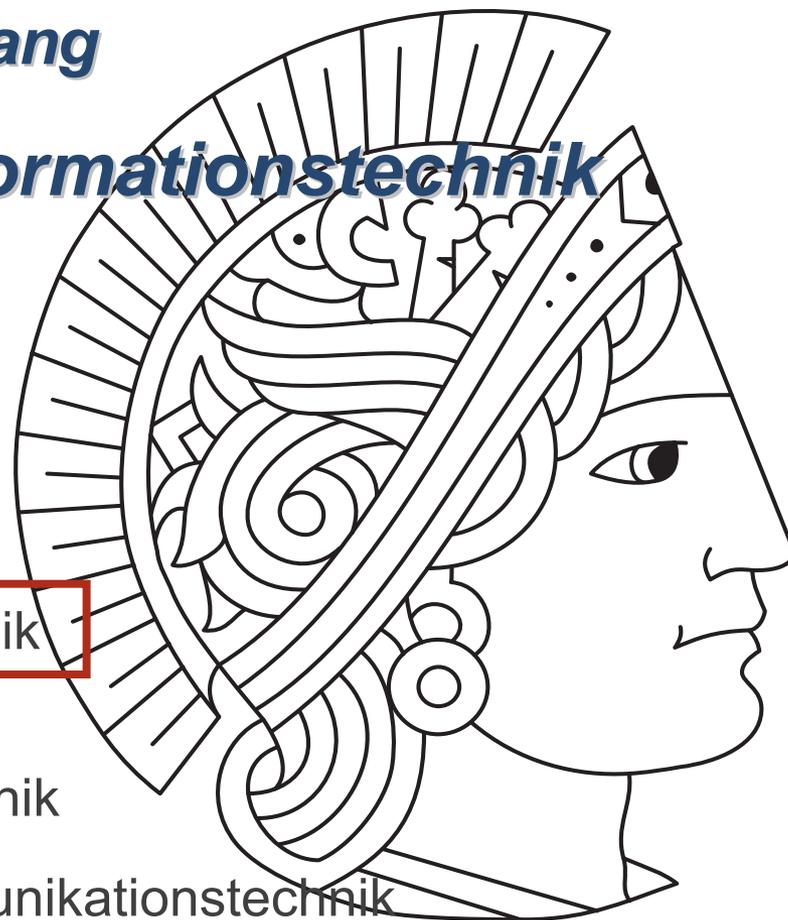


Bachelor-Master-Studiengang

Elektrotechnik und Informationstechnik

Vertiefungen

- AUT** Automatisierungstechnik
- DT** Datentechnik
- EET** Elektrische Energietechnik
- MEL** Mikroelektronik
- MFT** Mikro- und Feinwerktechnik
- NKT** Nachrichten- und Kommunikationstechnik
- TET** Theoretische Elektrotechnik



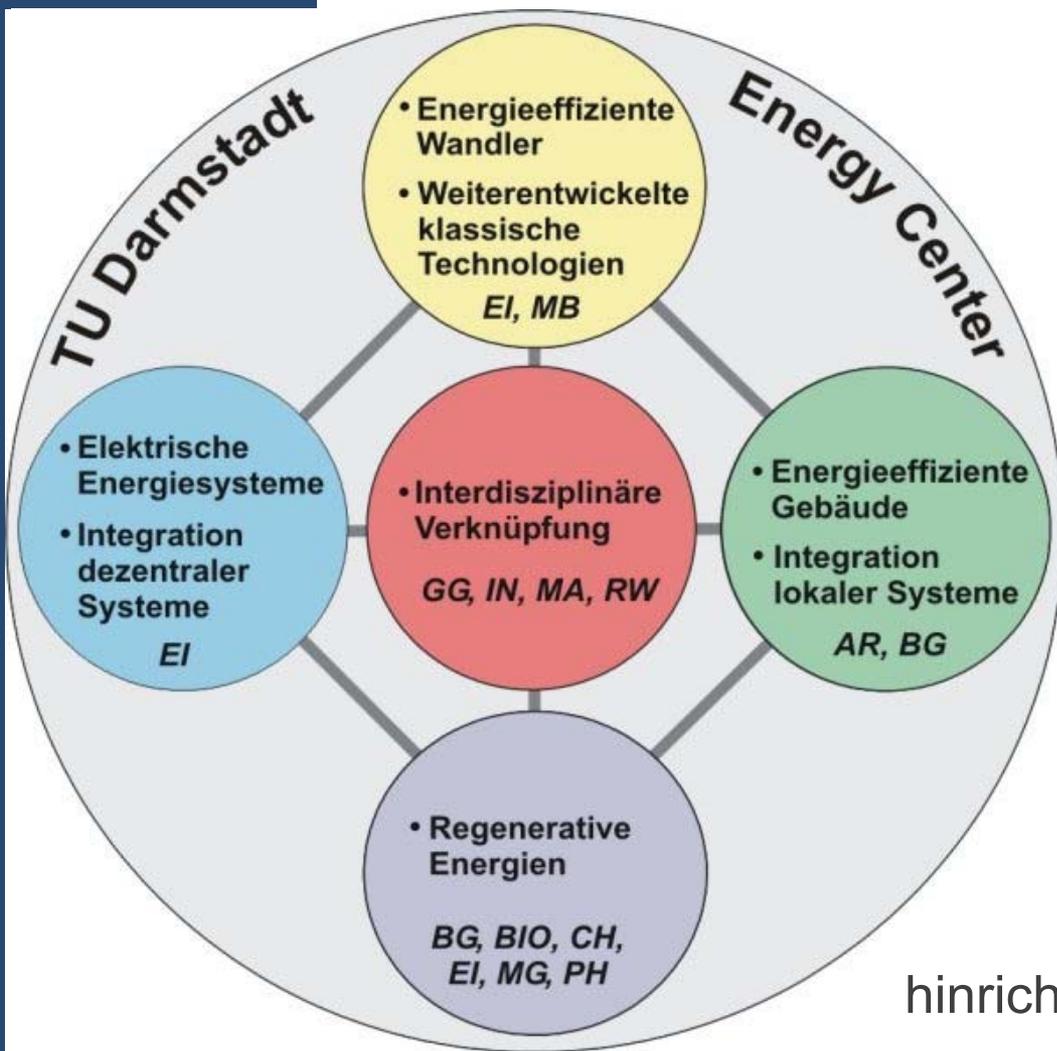


Vertiefungsthemen zur Energietechnik

- Erzeugung und Übertragung elektrischer Energie
- Energiesysteme, Antriebstechnik
- Netzleittechnik
- Nutzung regenerativer Energien
- Entwicklung neuer Energieumwandlungsmethoden
- Effiziente Speicherung elektrischer Energie
- Antriebsregelung
- Stromrichtertechnik
- Neue Technologien für Anlagen der Hochspannungstechnik
- Nah- und Fernverkehr
- Elektromagnetische Verträglichkeit



TUD Energy Center



- **Zusammenschluss** von 11 Fachbereichen an der TU Darmstadt
- **Interdisziplinäre** Energie-Ausbildung
- Kompetente **Ansprechpartner** zu Energiethemen

Kontaktadresse:

Volker Hinrichsen

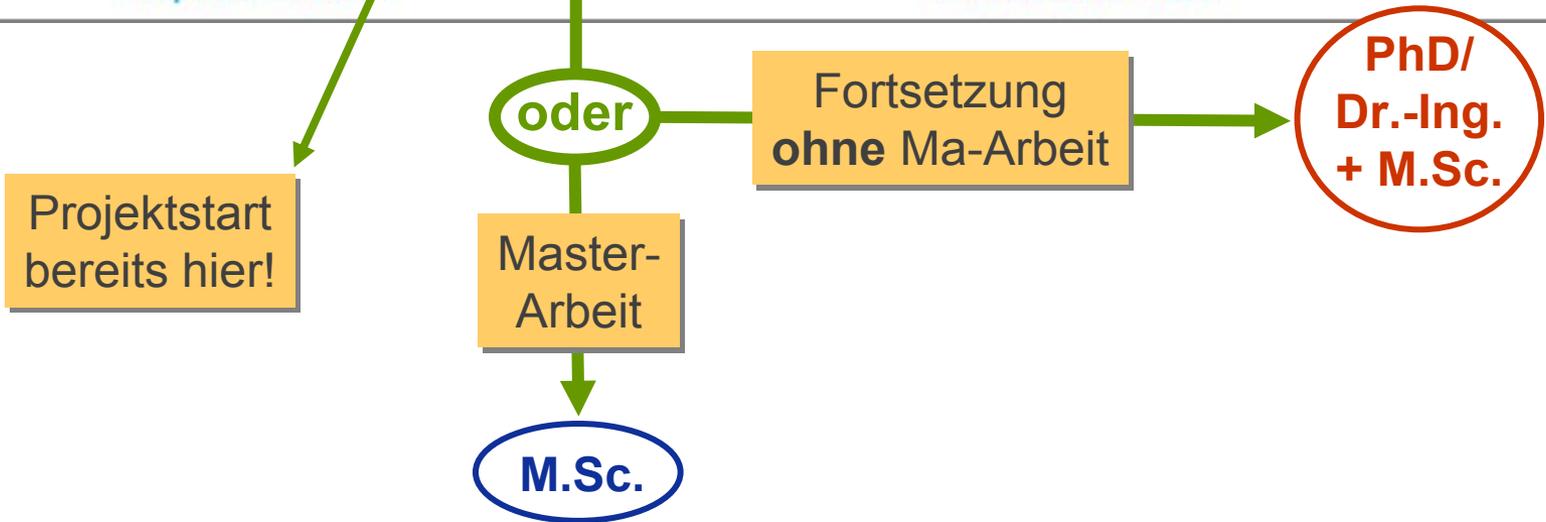
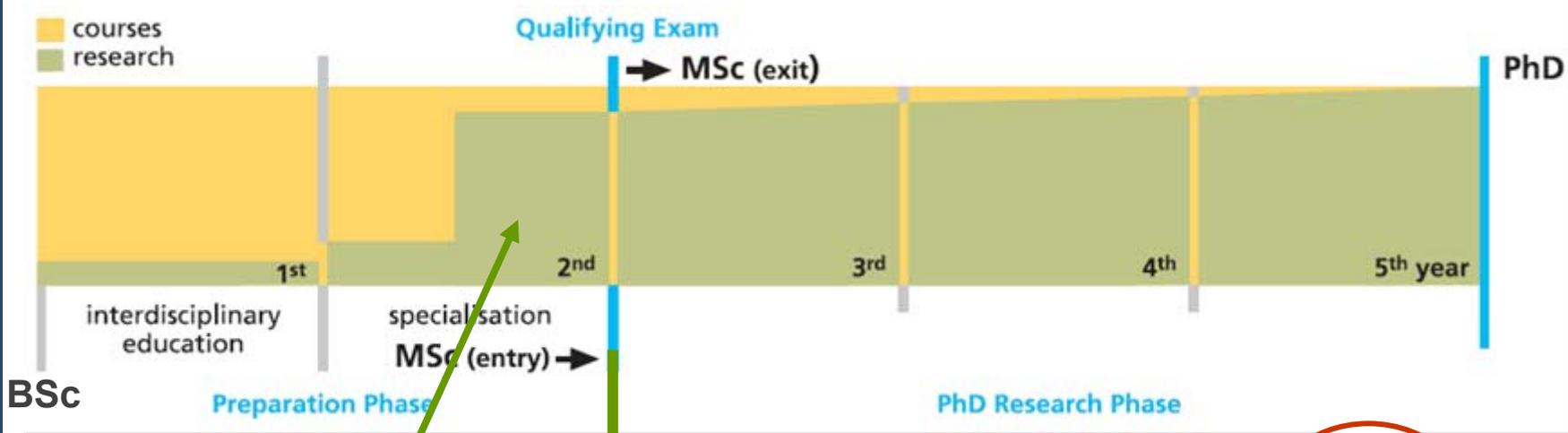
hinrichsen@hst.tu-darmstadt.de



TUD Energy Center

Ausbildung zum
"TU-Darmstadt-Energie-Ingenieur" (geplant ab WS 08/09)

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik



- breites **Grundlagen-** und einschlägiges **Spezialwissen**, Fach- (und Forschungs-) Kompetenz
- methodische und soziale Kompetenz
- **interdisziplinäres** Denken und Handeln
- nicht nur Denken in Technik-, sondern auch in **gesellschaftlichen** Bezügen
- vertieftes Verständnis für das **Gesamtsystem**
- fächerübergreifende Lösungen für nachhaltige Energieversorgung
- Kompetenz für **energiepolitische Entscheidungen**

- **Grundbegriffe zur Energie**
- **Fakten zur elektrischen Energie**
- **Elektrische Energieerzeugung – heute und morgen**
- **Elektrische Energieverteilung – Herausforderungen**
- **Effiziente Nutzung elektrischer Energien**
- **Energie-Ingenieure/-innen – Zeitgemäße Ausbildung**
- **Ausblick**



- Erzeugung: Nicht Revolution, sondern **Evolution**
- **Energie-Mix**
- **Koexistenz** konventioneller mit zunehmendem Anteil regenerativer Energieformen
- **Interdisziplinäre** Ansätze für künftige Netze
- Gesellschaftliche **Akzeptanz** unterschiedlicher Energieträger
- Künftig: bewusst **Energie sparen !**

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

abinder@ew.tu-darmstadt.de
hinrichsen@hst.tu-darmstadt.de

Folien zum Download demnächst unter
www.energycenter.tu-darmstadt.de