

Energietechnik

I Elektrische Energiewandler (Prof. Andreas Binder)

II Stromrichtertechnik (Prof. Gerd Griepentrog)

III Elektrische Energieversorgung (Prof. Jutta Hanson)



Vorkenntnisse, Lernbehelfe

a) Vorkenntnisse:

- Vorlesung “Grundlagen der Elektrotechnik 1 + 2“
(Hanson/Küppers u. Hinrichsen)
 - FARADAY'sches Induktionsgesetz
 - Magnetfelder und Durchflutungssatz
 - Drehstromtechnik
 - Buch „H.Clausert/G.Wiesemann/J.Stenzel/V.Hinrichsen:
Grundgebiete der Elektrotechnik 1 u. 2, Oldenbourg-Verlag“

b) Lernbehelfe:

- Besuch der Vorlesung und der begleitenden Übungen
- Skript “Energietechnik” mit Aufgabensammlung (KSC)
(CITY-Copy, Holzstrasse 5, Darmstadt)
- Folien, Übungsaufgaben: Download (MOODLE)
- Demo-videos über MOODLE Link
- Exkursion



Gute Bücher über fundierte Grundlagen

Theoretische Elektrotechnik

Küpfermüller, Karl; (Mathis, Karl; Reibiger, Albrecht): 19. Aufl., Springer, Heidelberg, 2013

Theoretische Elektrotechnik

Simonyi, Karoly: 10. Aufl.; Johann Ambrosius Barth, 1993 **(GEBRAUCHT)**

Gerthsen Physik

Gerthsen, Christian; (Meschede, Dieter): 24. Aufl.; Springer, Heidelberg, 2013

Halbleiter-Schaltungstechnik

Tietze, Ulrich; Schenk, Christoph; (Gamm, Eberhard): Springer, Heidelberg, 2012

Mathematische Grundlagen der Elektrotechnik

(+ Begleitband: Lösungen u. Hinweise)

Dirschmid, Hans-Jörg: 4. Aufl.; Vieweg, 1990/1996 **(GEBRAUCHT)**

Mathematik

Arens, Tilo u. a.: 2. Aufl.; Spektrum Akad. Verlag, 2012

Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau

Grote, Karl-Heinrich; Feldhusen, Jörg (Hsg.): 24. Aufl.; Springer-Vieweg, Heidelberg, 2014



Energietechnik

Lernziele

Sie werden verstehen:

- **Was ist elektrische Energietechnik?**
- **Elektrische Energieerzeugung und ihre Anwendung**
- **Welche elektromechanischen und leistungselektronischen Komponenten werden benötigt?**
- **Wie wird elektrische Energie erzeugt? Wie wird sie verteilt?**
- **Welche wirtschaftlichen Randbedingungen müssen beachtet werden?**



Prüfung

Schriftliche Prüfung:

- **Dreistündig**
- **Sechs Textaufgaben zur Berechnung**
- **Ergänzende Verständnisfragen**
- **Prüfungstermine 2x pro Jahr**

- **Ansprechpartner und Übungsbetreuer:**
- M. Sc. Martin Schuster
Institut für Elektrische Energiewandlung
Technische Universität Darmstadt

Landgraf-Georg-Straße 4

D-64283 Darmstadt

Tel.: 06151-16-24196 bzw. -24181, Fax -24183

E-Mail: mschuster@ew.tu-darmstadt.de



Energietechnik

I Elektrische Energiewandler

**Andreas Binder
Institut für Elektrische Energiewandlung
Technische Universität Darmstadt**

**Landgraf-Georg-Straße 4
D-64283 Darmstadt
Tel.: 06151-16-24181 oder -24182, Fax: -24183
E-Mail: abinder@ew.tu-darmstadt.de**



Energietechnik

Inhalt des Vorlesungsteils

I Elektrische Energiewandler

Schlüsseltechnologie: Elektrische Energietechnik

Repetitorium: Grundlagen der Elektrotechnik

1. Elektrische Energiewandlung - Einführung
2. Transformatoren
3. Gleichstrommaschinen
4. Drehfeldmaschinen



Schlüsseltechnologie „Elektrische Energietechnik“



Quelle:

*Niagara Mohawk Power Corp.,
USA, 1991*



Schlüsseltechnologie: Elektrische Energietechnik

- Weltweiter Energiebedarf und Energienutzung
- Energiebedarf und Energienutzung in *Deutschland*
- Elektrische Energieerzeugung in *Deutschland*



1 kWh Energie: Welchen Nutzen haben wir davon?

PKW (Benzinmotor, Mittelklasse):	1.2 km Fahrtstrecke
LKW:	0.2 km Fahrtstrecke
Mensch zu Fuß (Läufer):	10.0 km Wegstrecke
PC-Arbeit:	5 h
Warm duschen:	5 Minuten
60°C-Wäsche, Waschmaschine A+	5 kg Wäsche waschen
Internet-Surfen:	100 Google-Suchanfragen

*Quelle: Verband Schweizerischer
Elektrizitätsunternehmen VSE 2009*



Schlüsseltechnologie

Elektrische Energietechnik

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.

Ohne elektrische Energie geht nichts!

Blackout New York 14.8.2003

- 50 Mio. Menschen ohne Stromversorgung
- Wirtschaftlicher Schaden:
6 Milliarden US-Dollar

(Quelle:
Wall Street Journal)

Quelle:

ISAT Geostar,
14.8.2003

ISAT GeoStar 45
23:15 EST 14 Aug. 2003



Verfügbarkeit der elektrischen Energie

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

Nichtverfügbarkeit (Beispiele):

Deutschland, 2011:	15 Minuten / (Einwohner · Jahr)
Großbritannien, 2006:	89 Minuten / (Einwohner · Jahr)
Spanien, 2007:	105 Minuten/ (Einwohner · Jahr)
USA, 2012 *):	154 Minuten / (Einwohner · Jahr)

Quelle: Bundesnetzagentur, *) Power Grid Int.



Elektrische Energiekette

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**.



„Graue“ Energie eines Geräts (Produkts)

„Graue“ Energie:

Die Energie für **Herstellung, Transport, Recycling oder Entsorgung** eines Geräts

Beispiele:

Personal Computer:	4 000 kWh
PKW (Mittelklasse):	60 000 kWh
1 kg Bohnen (Import N-Afrika):	10 kWh
1 kg Bohnen (Inland):	1 kWh

*Quelle: Verband Schweizerischer
Elektrizitätsunternehmen VSE 2009*



Schlüsseltechnologie: Elektrische Energietechnik

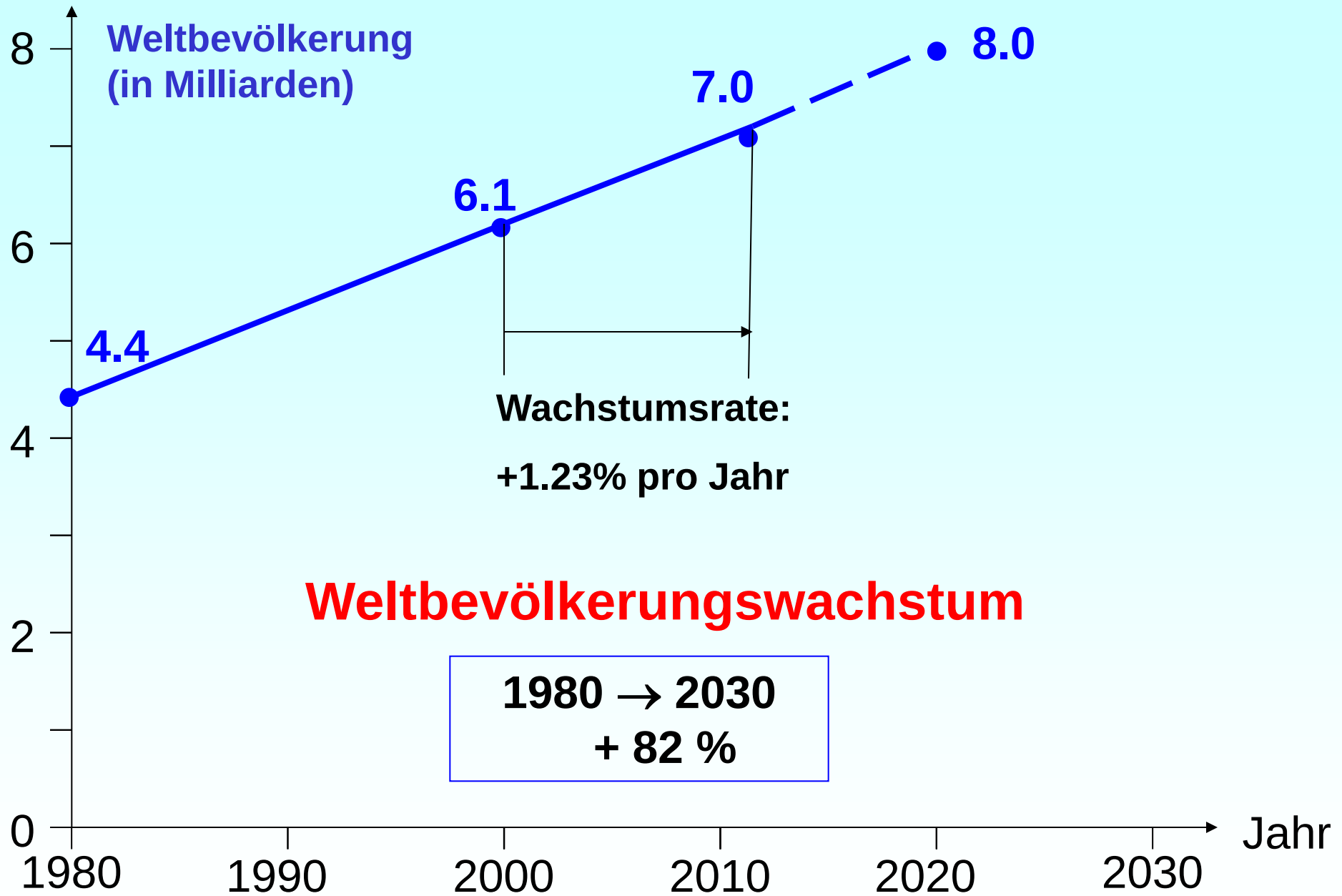
- Weltweiter Energiebedarf und Energienutzung
- Energiebedarf und Energienutzung in *Deutschland*
- Elektrische Energieerzeugung in *Deutschland*



Schlüsseltechnologie „Elektrische Energietechnik“

Weltweiter Energiebedarf und Energienutzung





Weltweiter Energiebedarf

- **Welt (2011):** Primärenergiebedarf: 143.2 PWh (Peta-Wattstunden)
Einwohner (2012): 7.0 Milliarden
Im Mittel: **20.0 MWh pro Einwohner**

1PWh = 10^{15} Wh (P = Peta)

1Wh = 3600 Ws = 3600 J

- **Energie pro Kopf:** Mittelwert 20.0 MWh = 100%

N-Amerika	EU	S-Amerika	China	Indien
350%	200%	67%	95%	34%

- **Anteil am Primärenergiebedarf 2011** (Welt = 100%)

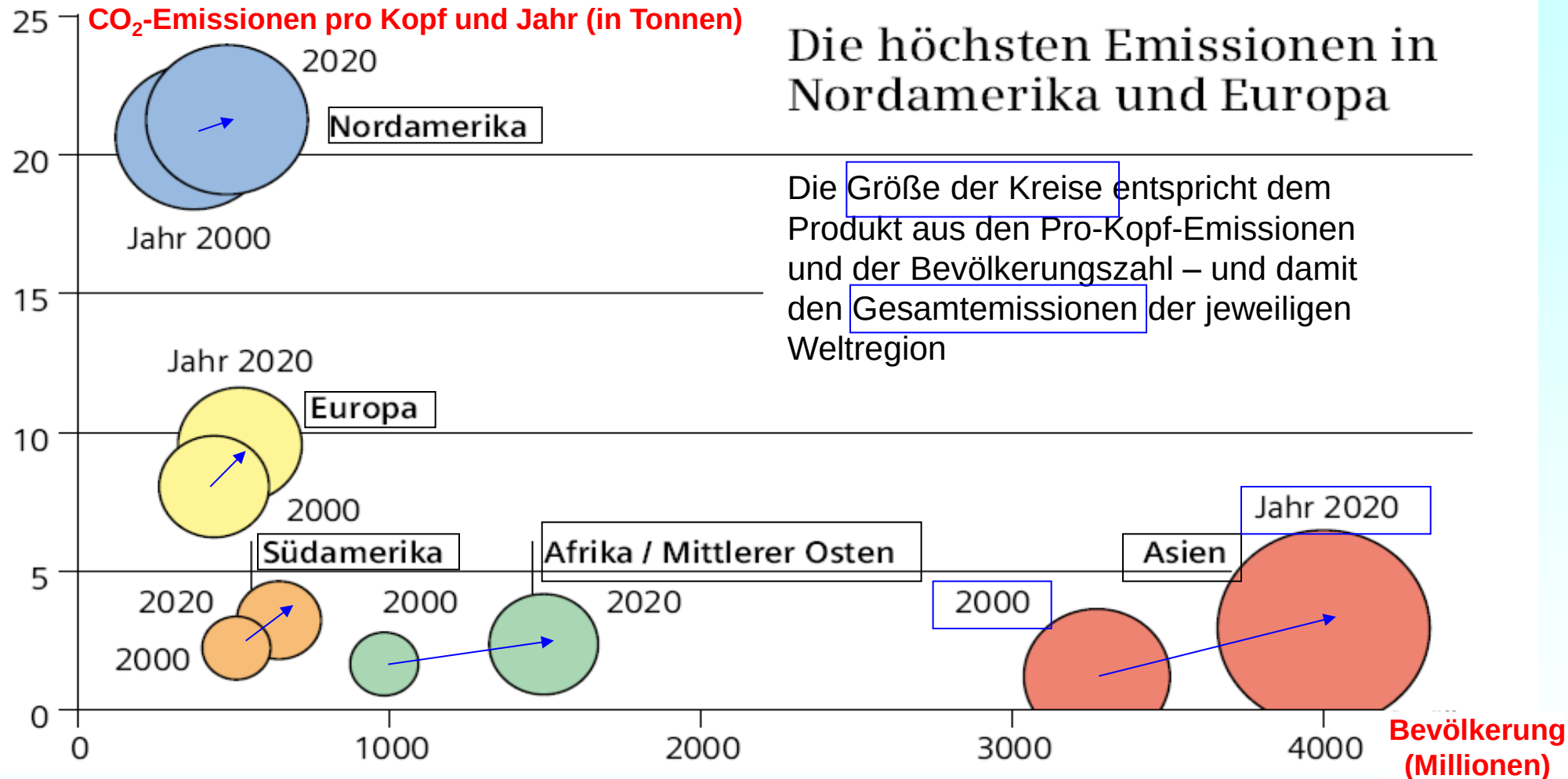
N-Amerika	Europa+GUS	S/M-Amerika	Afrika	Naher Osten	Asien/Australien
22.7%	23.8%	5.2%	3.1%	6.1%	39.1%

(Quelle: BWK 65, 2013, no.4)

Große Wachstumsraten des Energiebedarfs in Asien (China, Indien) u. Afrika !



Weltweite CO₂-Emissionen pro Kopf & Jahr (in Tonnen)



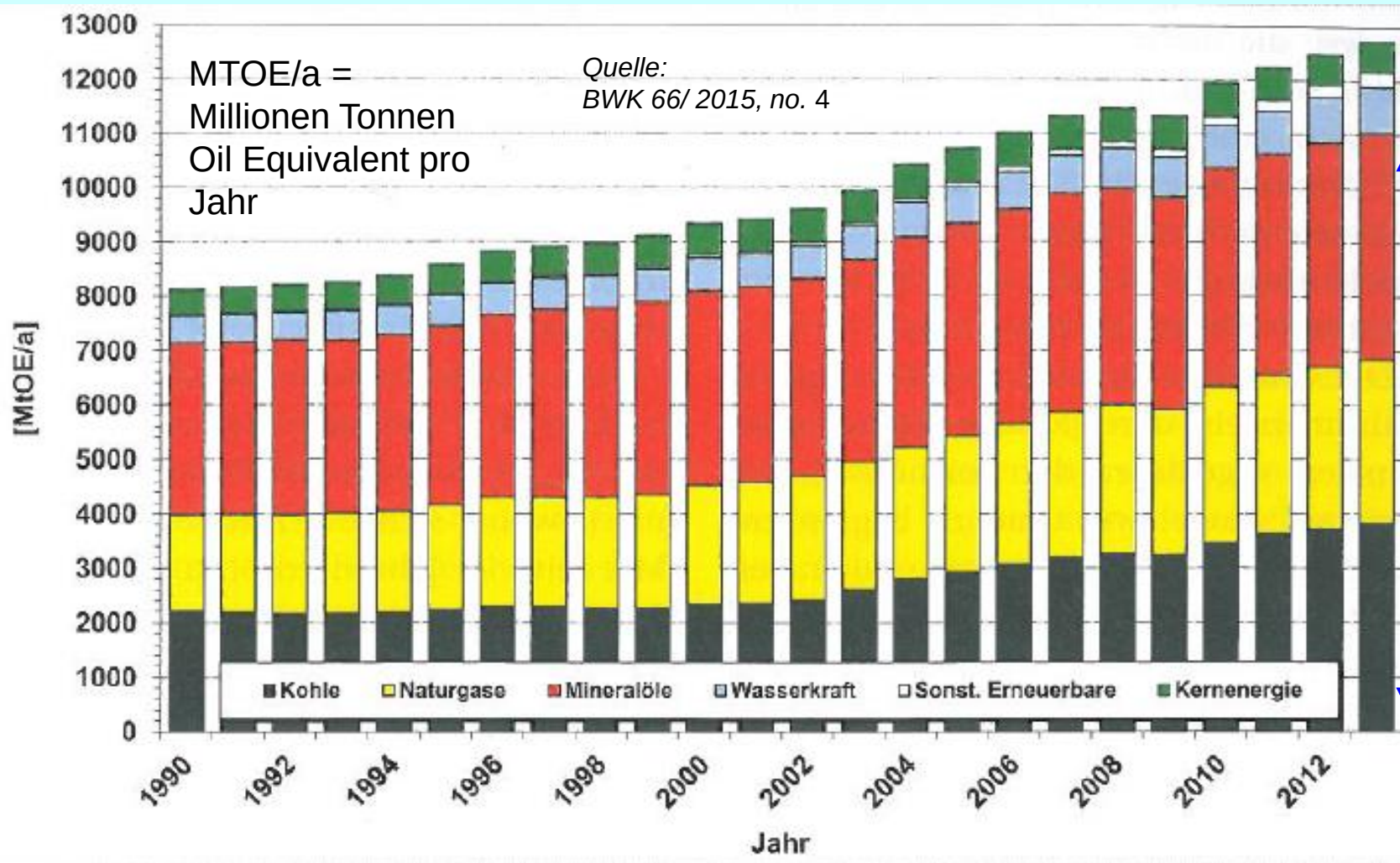
Primärenergieverbrauch der Welt nach Energieträgern

1 kg OE = 42 000 kJ

1 kg SKE = 29 400 kJ

MTOE/a =
Millionen Tonnen
Oil Equivalent pro
Jahr

Quelle:
BWK 66/ 2015, no. 4



SKE: Stein-
kohleneinheit

Wir alle
leben
nahezu aus-
schließlich
von
fossilen
Energie-
trägern!



Entwicklung der Energieträger weltweit

•	Erdöl	Kohle	Erdgas	Regenerativ	Kernkraft	Summe
1973	46.1%	24.5%	16.0%	10.6%	0.9%	71.12 PWh
2011	33.1%	30.3%	23.6%	8.1%	4.9%	143.21 PWh
Prognose:						
2030	34.1%	22.9%	24.2%	14.1%	4.7%	195.3 PWh

(Quelle: Int. Energieagentur 2010 www.iea.org & BWK 65, no. 4, 2013 gemäß Review of World Energy)

Zuwachs an Primärenergiebedarf: 2011 → 2030 + 36 % !

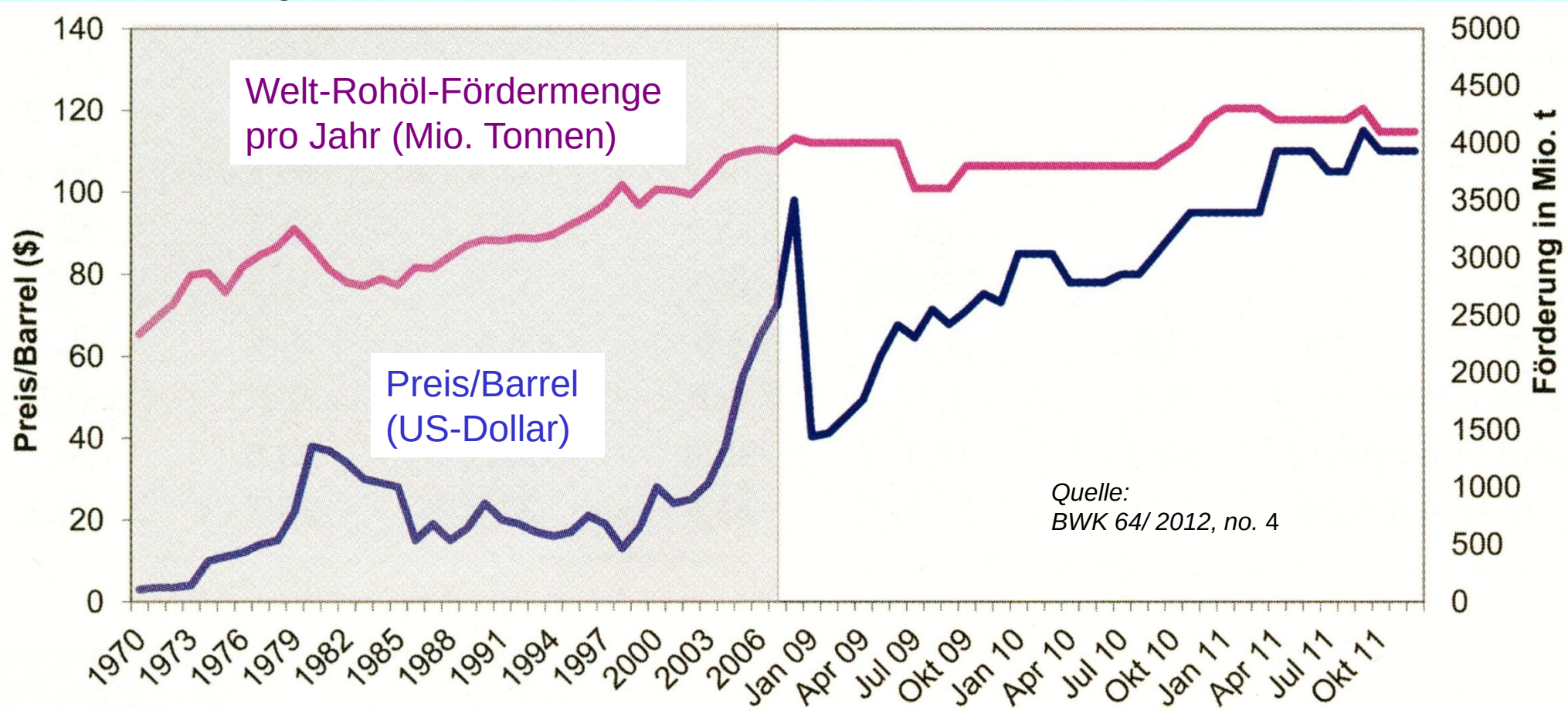
- Erdölreserven: 77% in den OPEC-Ländern

Fazit: Erdöl bleibt mittelfristig erster Energieträger!

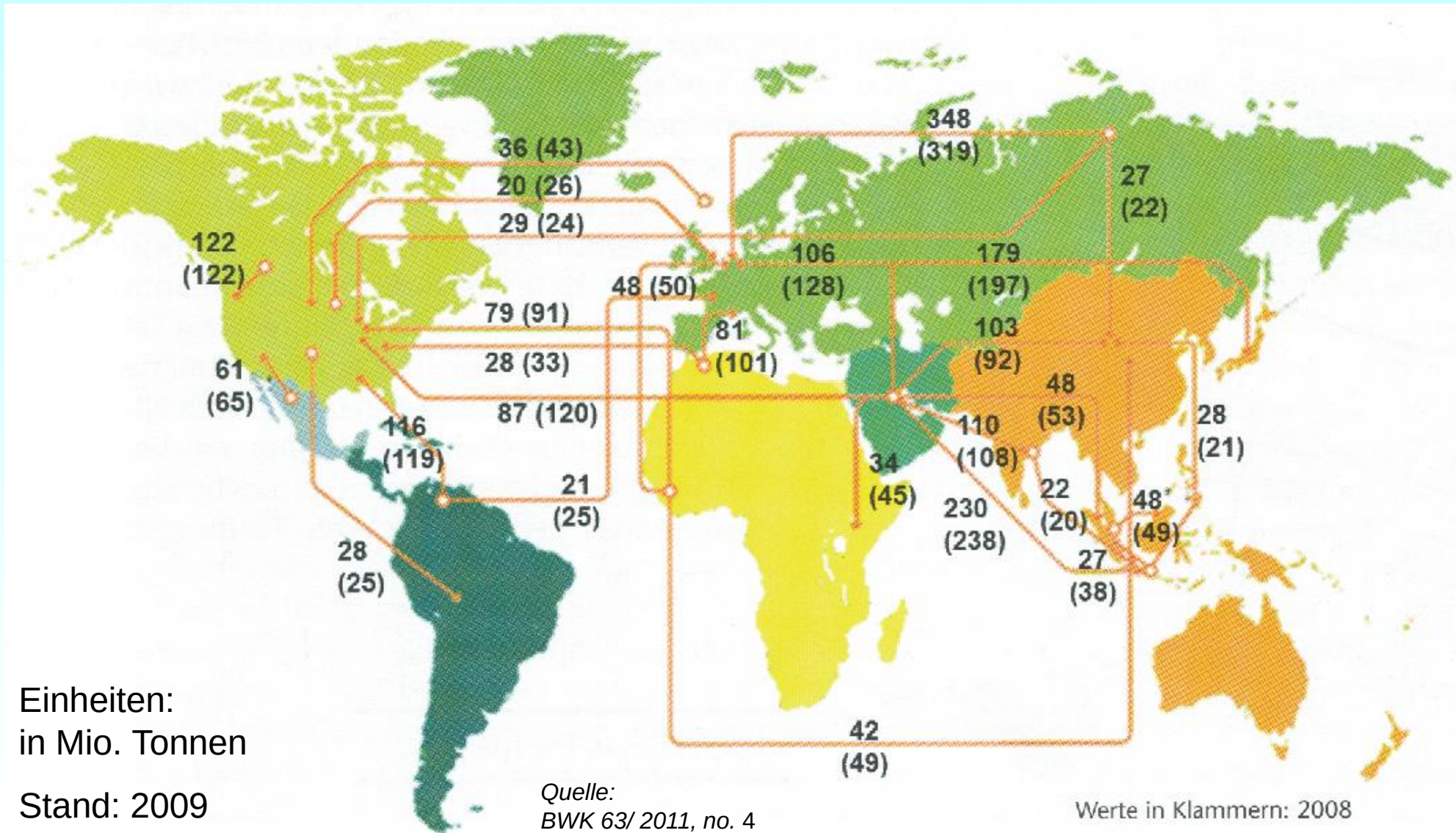


Die Welt hängt am Öl

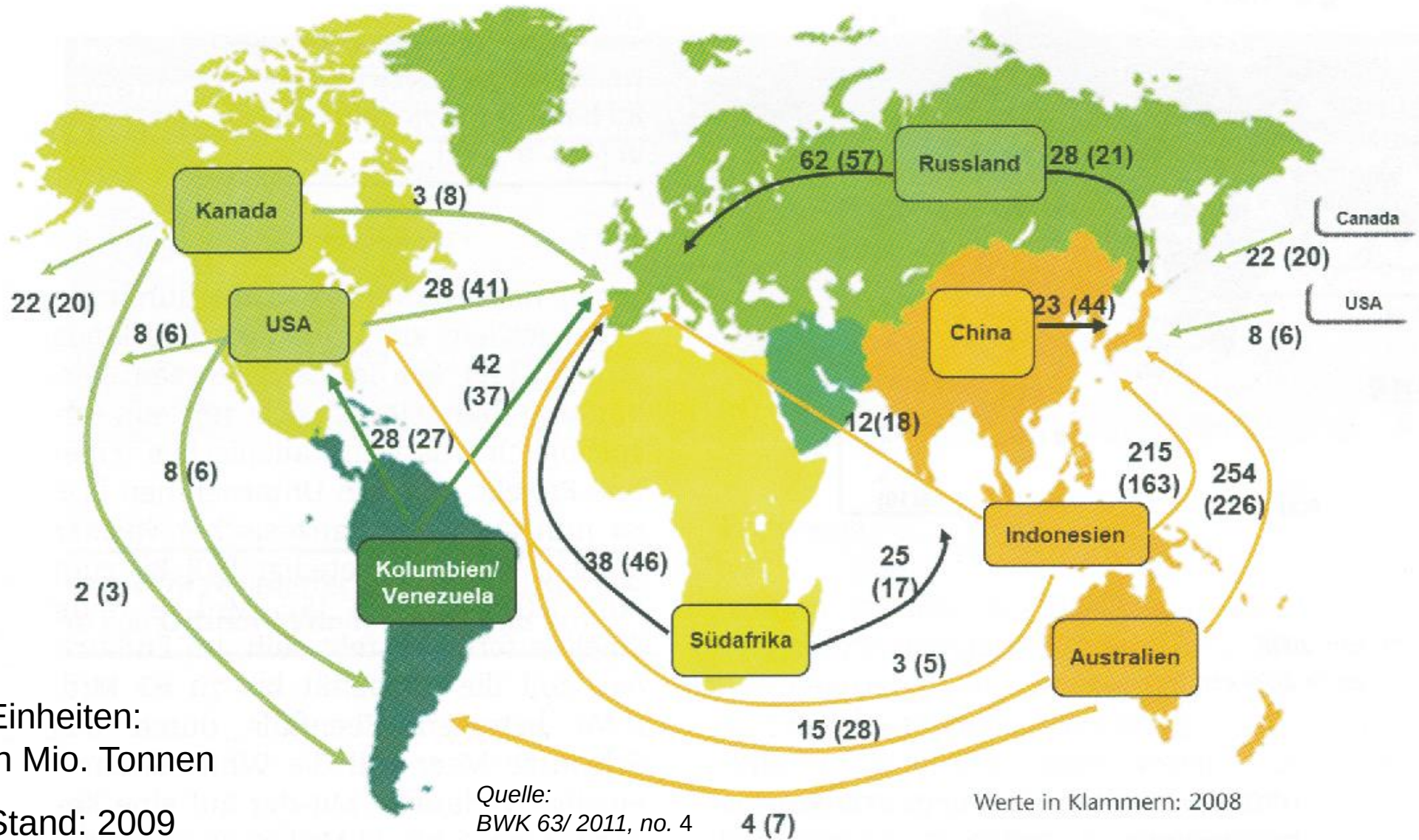
- Die jährlichen Fördermengen steigen kaum mehr („peak-oil“)
- Der Preis steigt deshalb kontinuierlich, auch wenn einzelne Schwankungen der (Preis-) Politik unterliegen.



Typische Haupt-Handelsbeziehungen mit Rohöl

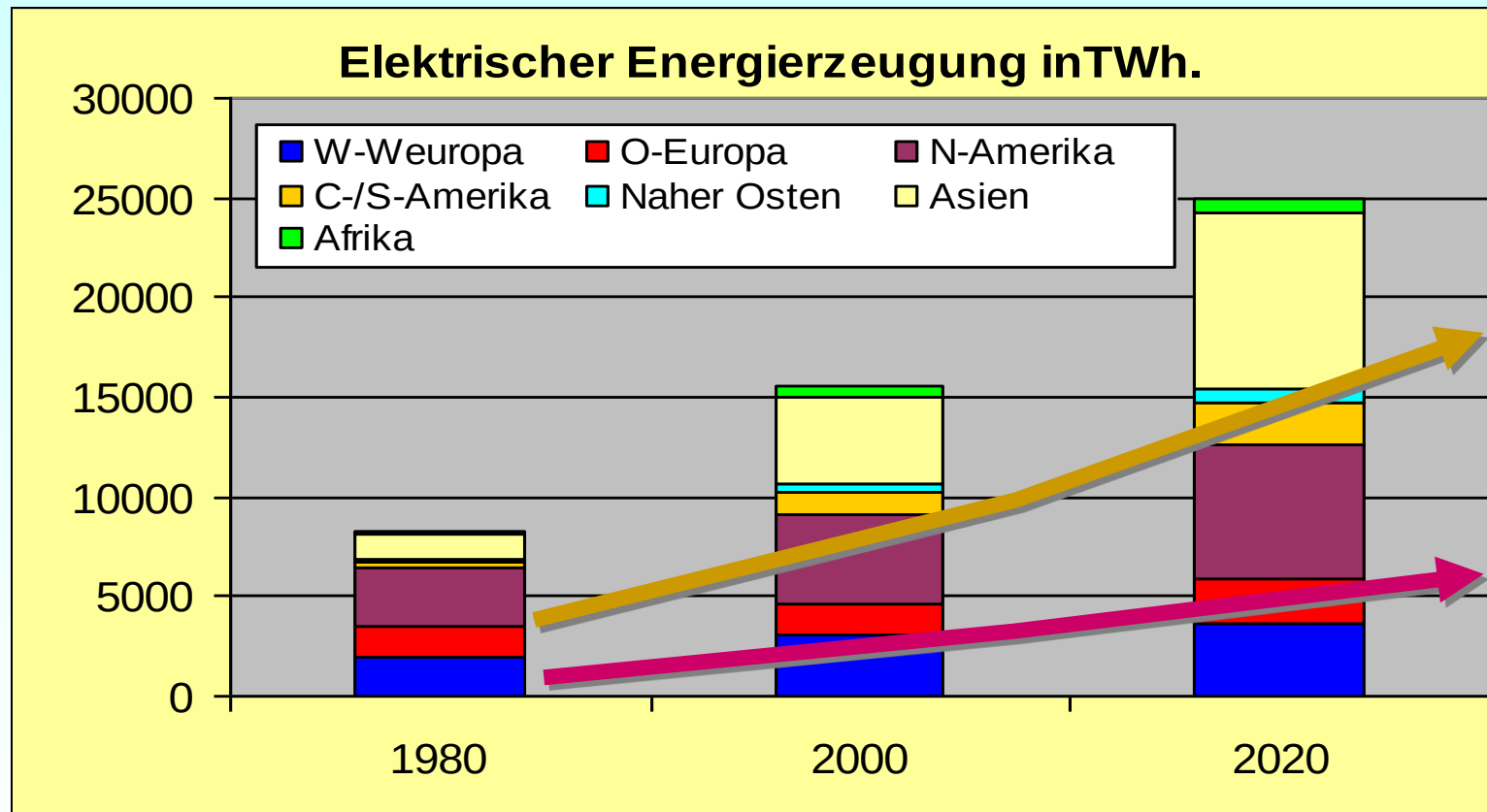


Typischer weltweiter Seeverkehr mit Steinkohle



Elektrische Energie weltweit

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



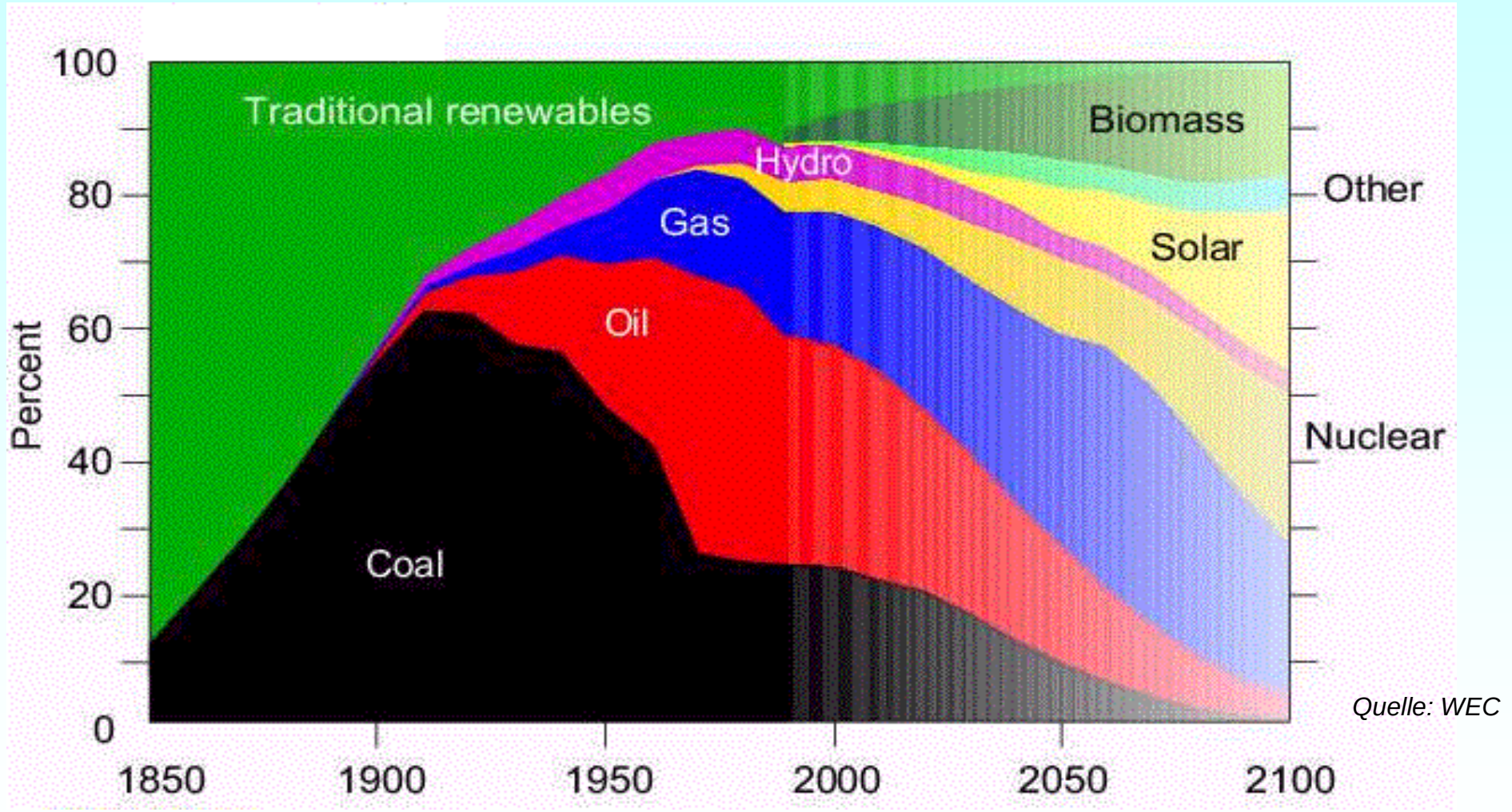
Quelle: VDN

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



Elektrische Energieerzeugung – weltweiter Langzeittrend

(100 % = Energieeinsatz für Stromerzeugung weltweit)



Schlüsseltechnologie: Elektrische Energietechnik

- Weltweiter Energiebedarf und Energienutzung
- Energiebedarf und Energienutzung in *Deutschland*
- Elektrische Energieerzeugung in *Deutschland*

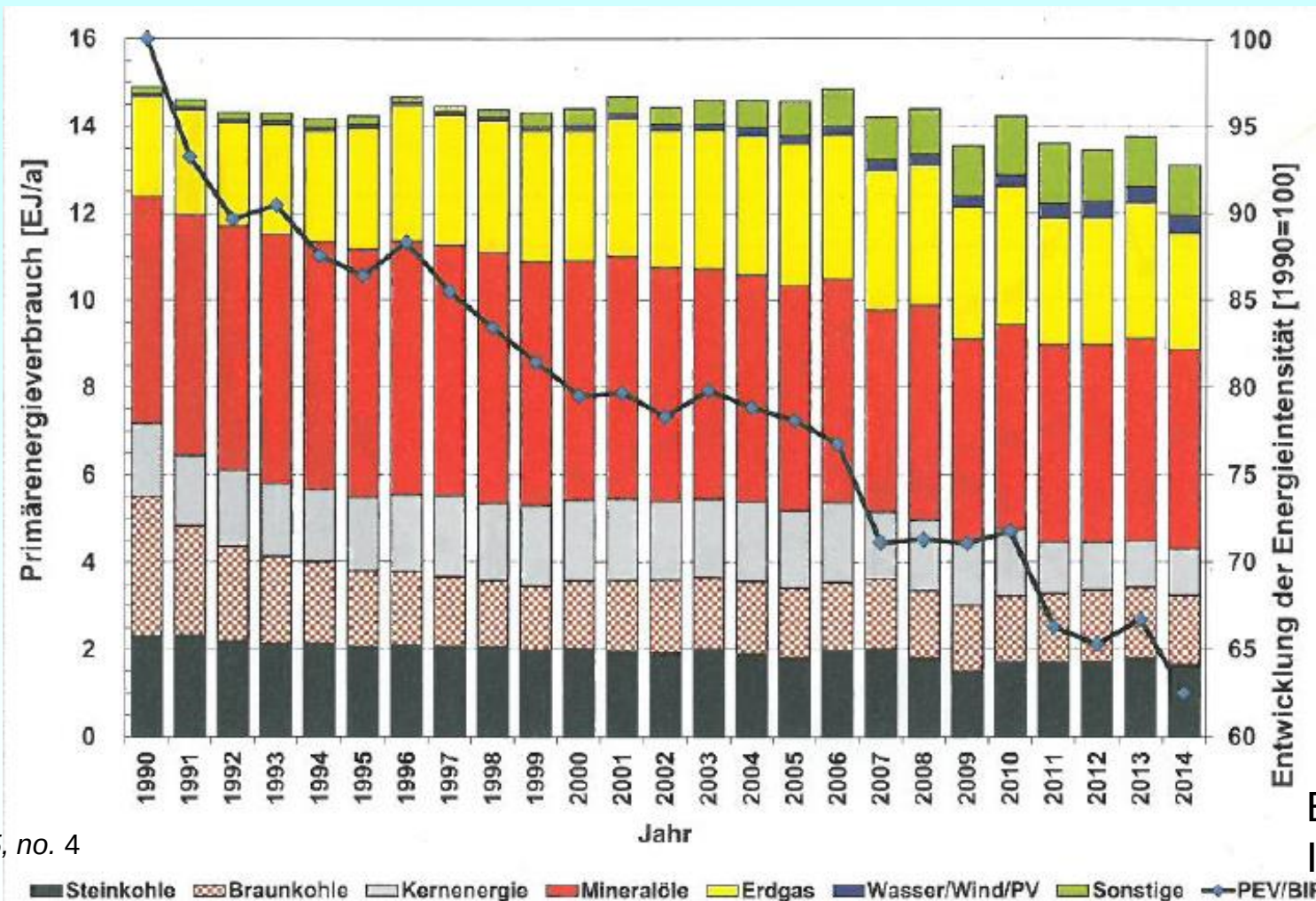


**Schlüsseltechnologie
„Elektrische Energietechnik“**

**Energiebedarf und Energienutzung in
*Deutschland***



a) Primärenergieverbrauch (PEV) nach Energieträgern b) Energieintensität = PEV/BIP in Deutschland



BIP: Brutto-Inlandsprodukt

Quelle:
BWK 66/ 2015, no. 4

1 EJ = 10^{18} J
1 Exa-Joule



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
1/30

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



Energiefluss 2012 Deutschland

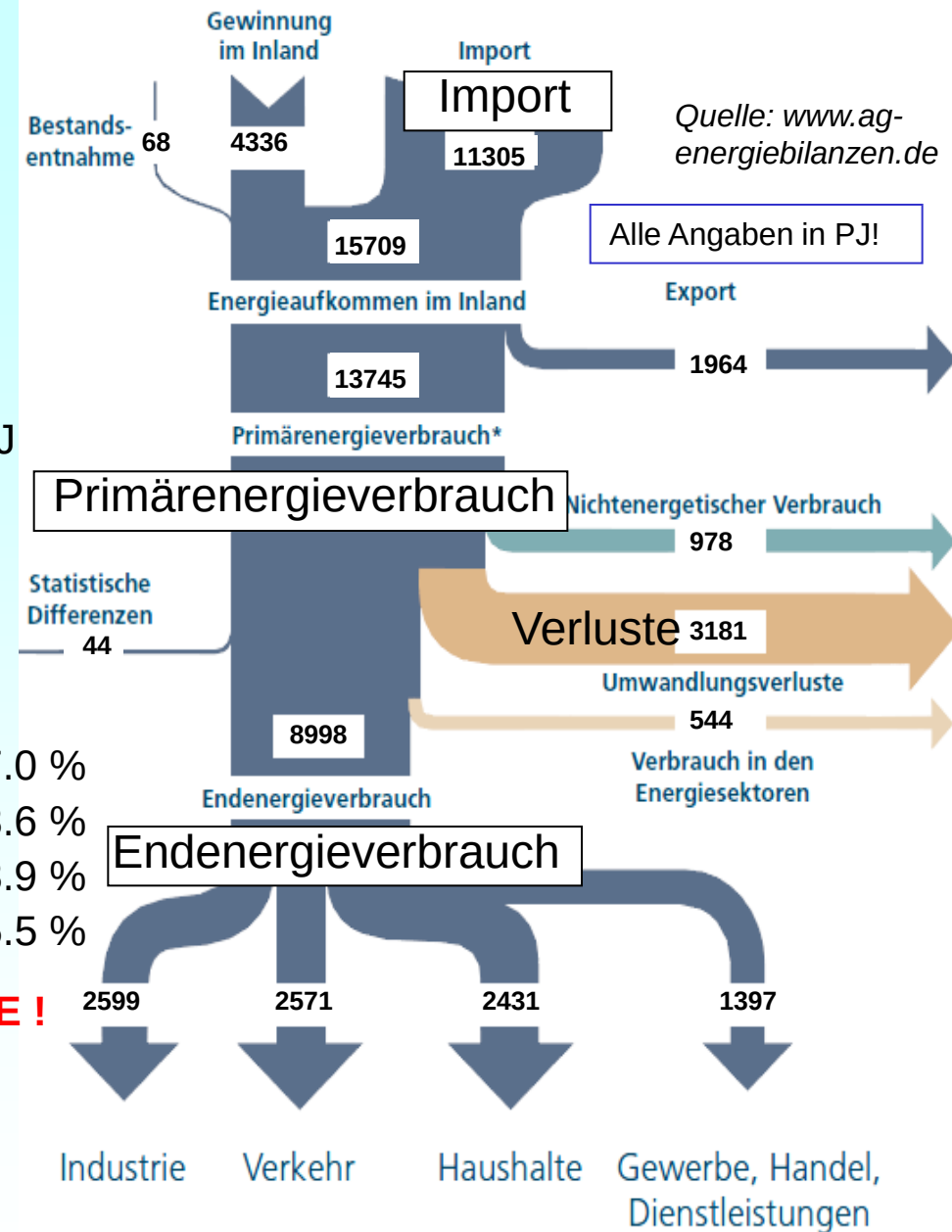
- Primärenergieverbrauch: 3763 TWh = 13 745 PJ
- Bereitgestellte Endenergie: 2 499 TWh = 8 998 PJ
- Endenergieverbrauch je Einwohner (81.8 Mio.):
 $2\,499\text{ TWh} / 81\,800\,000 = \underline{30\,555\text{ kWh pro Jahr}}$

2 499 TWh Endenergieverbrauch in Deutschland:

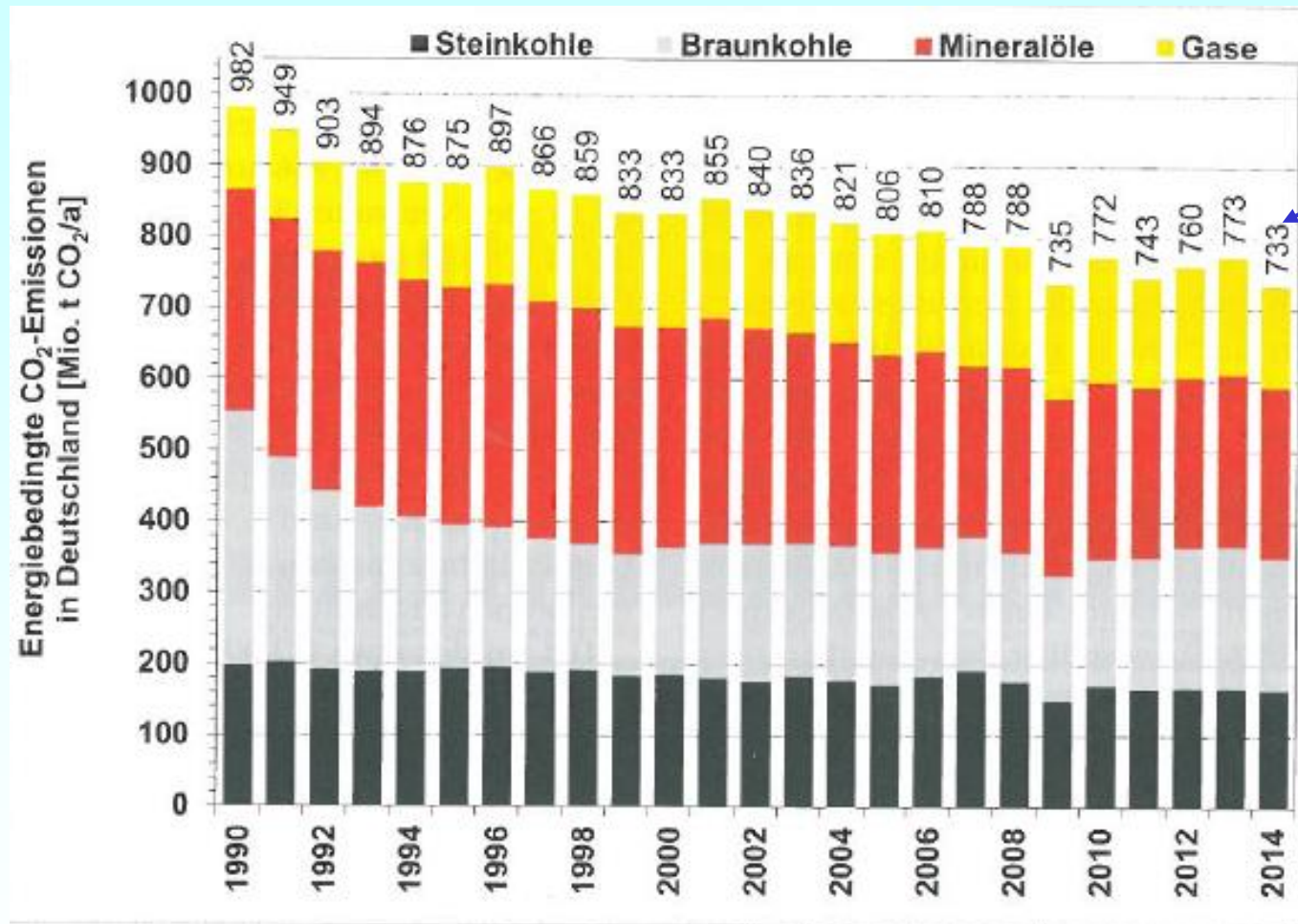
Haushalt
Verkehr
Industrie
Gewerbe/Handel/Dienstleistungen

DAVON 21.1 % (527 TWh) ELEKTRISCHE ENERGIE !

1 TWh = 1 Tera-Wattstunde = 1000 Milliarden Wh



Energiebedingte CO₂-Emissionen nach Energieträgern in Deutschland



Zusätzlich:
ca. 50 Mio. t CO₂
durch Industrie

Quelle: BWK 66/ 2015, no. 4



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
1/32

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



213 „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 = 216 kWh pro Jahr
- Je römischem Bürger verfügbar: $6 \cdot 216 \text{ kWh} = 1296 \text{ kWh pro Jahr}$
 $1296 \text{ kWh pro Jahr} = 4680 \text{ MJ pro Jahr}$

- Modernes Deutschland (2012 n. Chr.):

Primärenergie: 3 763 TWh

Je Einwohner: $3\,763 \text{ TWh} / 81.8 \text{ Mio.} = 46.0 \text{ MWh}$

213 Energiesklaven je Einwohner/-in *)

*) $213 = 46.0 \text{ MWh} / 216 \text{ kWh}$



Elektrische Energie in Deutschland 2012

- Primärenergieverbrauch 2012: 13 745 PJ = 3763 TWh
- El. Netto-Energiebedarf ca. 527 / 525 TWh (2012/2009), leicht steigende Tendenz
- Für diesen el. Endenergiebedarf (100%) müssen wegen der Umwandlungs- und Transportverluste zusätzlich ca. 168 % an Primärenergie (Kohle, Öl, Kernenergie, Gas) bereitgestellt werden, davon ca. 3/4 durch Import.

El. Endenergie = el. Nutzenergie (=Netto-Energie): 100.0%
12.7%: Kraftwerkeigenbedarf + Netzverluste: 112.7% (el. Brutto-Energie)
42%: Mittlerer Kraftwerks-Wirkungsgrad: $112.7/0.42 = 268.3\%$

- Bereitstellung **elektrischer Energie benötigt rund 38 %** des jährlichen Primärenergieverbrauchs ($= 527 \times 2.68 / 3763 = 0.375$)
- Bei der Stromerzeugung entstehen ca. 44 % der von Deutschland verursachten CO₂-Emissionen: 2012

Gesamt in Deutschland: 814 Mio. Tonnen (sinkende Tendenz)

Stromerzeugung: 44% = 360 Mio To. CO₂ (Kernenergie, regenerativ: wenig CO₂!).

Quelle: AG Energiebilanz eV & BWK 64, 2012, no.4 & Umweltbundesamt & BMWT



Zum Vergleich: Elektrische Energieerzeugung Schweiz 2011

Die Schweiz deckt ihren Strombedarf nahezu frei von CO₂-Emissionen.

Kernkraftwerke	40%
Wasserkraft – Speicherkraftwerke	30%
– Laufkraftwerke	25%
Thermische Kraftwerke	4.9%
<u>Wind, Photovoltaik</u>	<u>0.1%</u>
Summe	100%

ABER: Vergleiche!

	<i>Schweiz (2011)</i>	<i>Deutschland (2012)</i>
Jährlicher Brutto-Strombedarf	63 TWh	594 TWh (Faktor 9.4)
Einwohnerzahl	7 Mio.	81.8 Mio. (Faktor 11.7)
El. Energie aus Wasserkraft	35 TWh	20.5 TWh (Faktor 0.59)

Quelle: Bundesmin. F. Energie BFE Schweiz



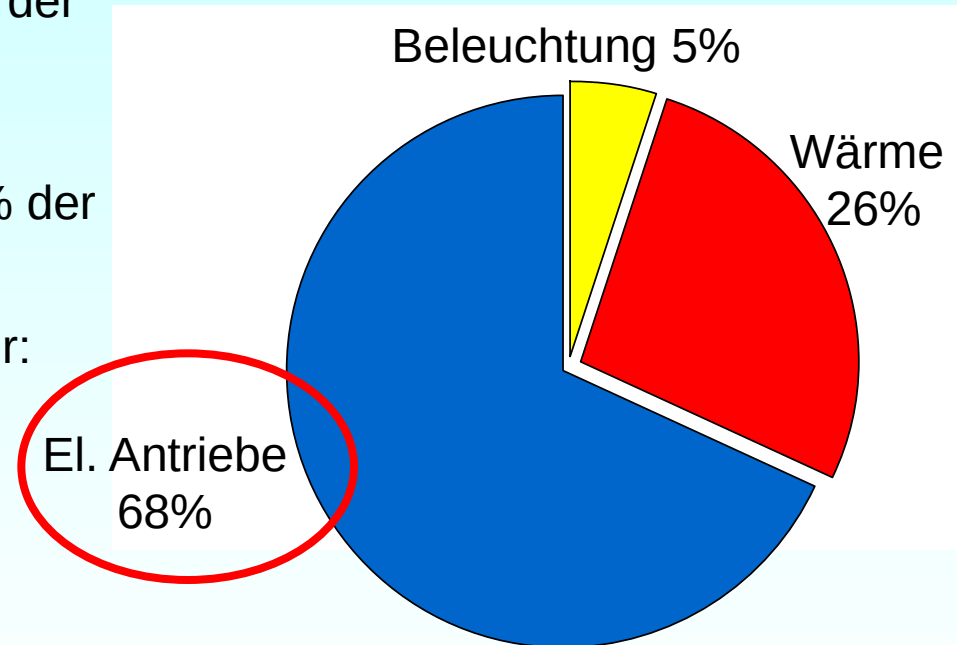
Nutzung elektrischer Energie in Deutschland

Elektrische Netto-Energienutzung (2012):	527 TWh	100%
davon: Industrie:	243 TWh	46%
darin: el. Antriebstechnik:	165 TWh	68% von 46%

- Etwa 46% der elektrischen Energie werden in der **Industrie** benötigt.
- Davon werden 68% zur Umwandlung in **mechanische Arbeit** verwendet. Das sind 6.6% der bereitgestellten Endenergie!
- Antriebstechnik in Haushalt, Gewerbe, Verkehr: weitere ca. 6%

Elektrische Netto-Energienutzung (2012): 100%

Industrie:	46%
Haushalte:	26%
Öffentliche Bereiche:	9%
Verkehr + Landwirtschaft:	5%



Industrielle el. Energienutzung Deutschland

Quelle: AG Energiebilanz eV & Verivox

1 TWh = 1 Tera-Wattstunde = 1000 Milliarden Wh



Schlüsseltechnologie: Elektrische Energietechnik

- Weltweiter Energiebedarf und Energienutzung
- Energiebedarf und Energienutzung in *Deutschland*
- Elektrische Energieerzeugung in *Deutschland*

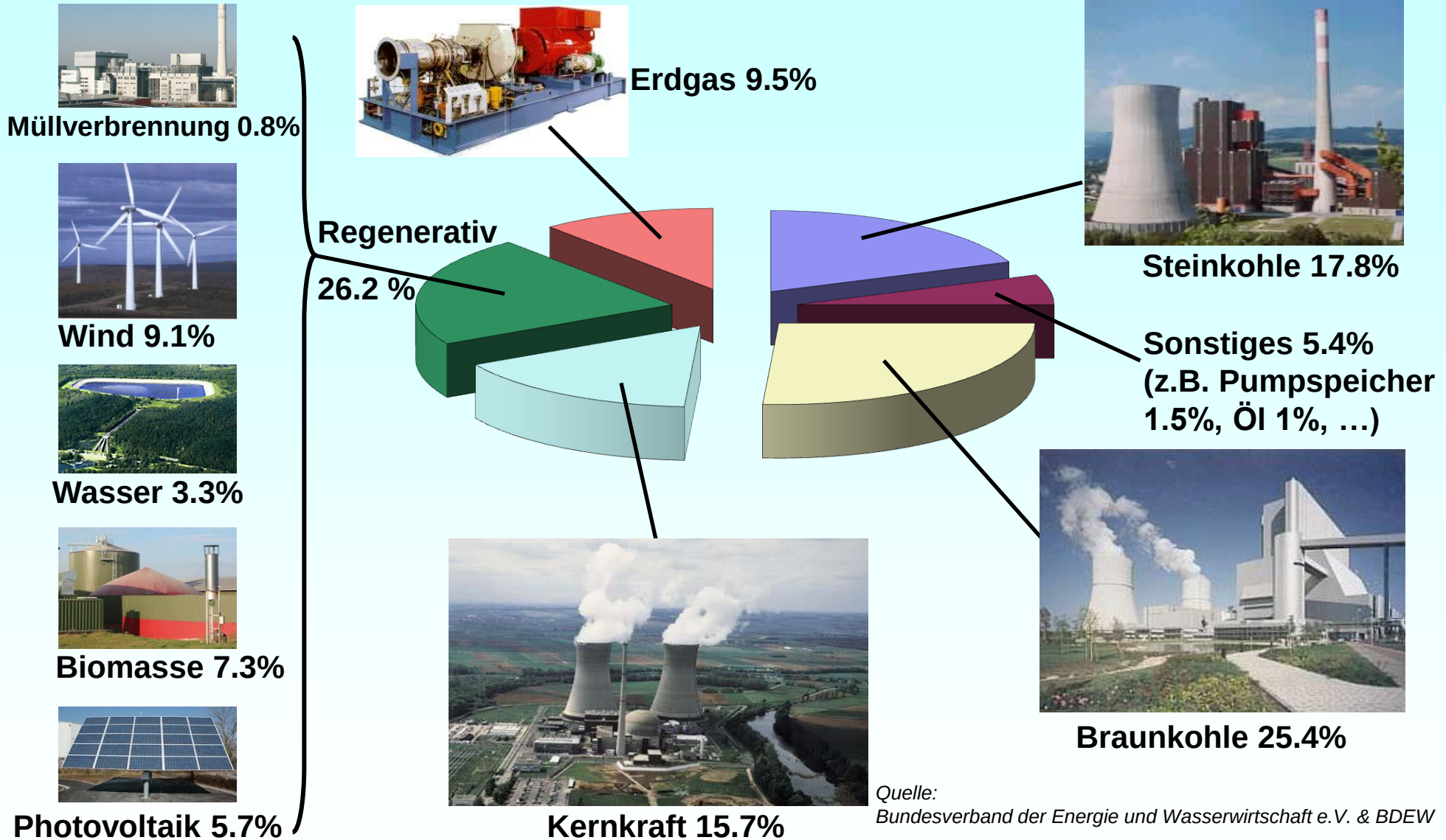


Schlüsseltechnologie „Elektrische Energietechnik“

Elektrische Energieerzeugung in *Deutschland*



Elektrische Energieerzeugung – Energiemix (Deutschland 2014)



Fossile Energieträger in Deutschland:

Beispiel Braunkohle (*Rhein, mitteldtsch. & Lausitz-Revier*)



- Tagebau *Profen/D*
- Oberflächenschürfung mit Großbaggern
- Der Abraumverkipfung folgt unmittelbar die Rekultivierung

Braunkohle

Quelle: BWK 63/ 2011, no. 4



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
1/40

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



Braunkohlebefeueretes Dampfkraftwerk *Boxberg/D*

Quelle: BWK 64/ 2012, no. 4, Foto: Vattenvall



Der „Qualm“ ist Wasserdampf der Kühlung !

Im *Lausitzer* Braunkohlerevier: Braunkohle wird „**vor Ort**“ **verstromt**, da der Transport energetisch ungünstiger ist.

Block Q: 900 MW (el.) Block R 675 MW (el.) (neu mit 43% Wirkungsgrad)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

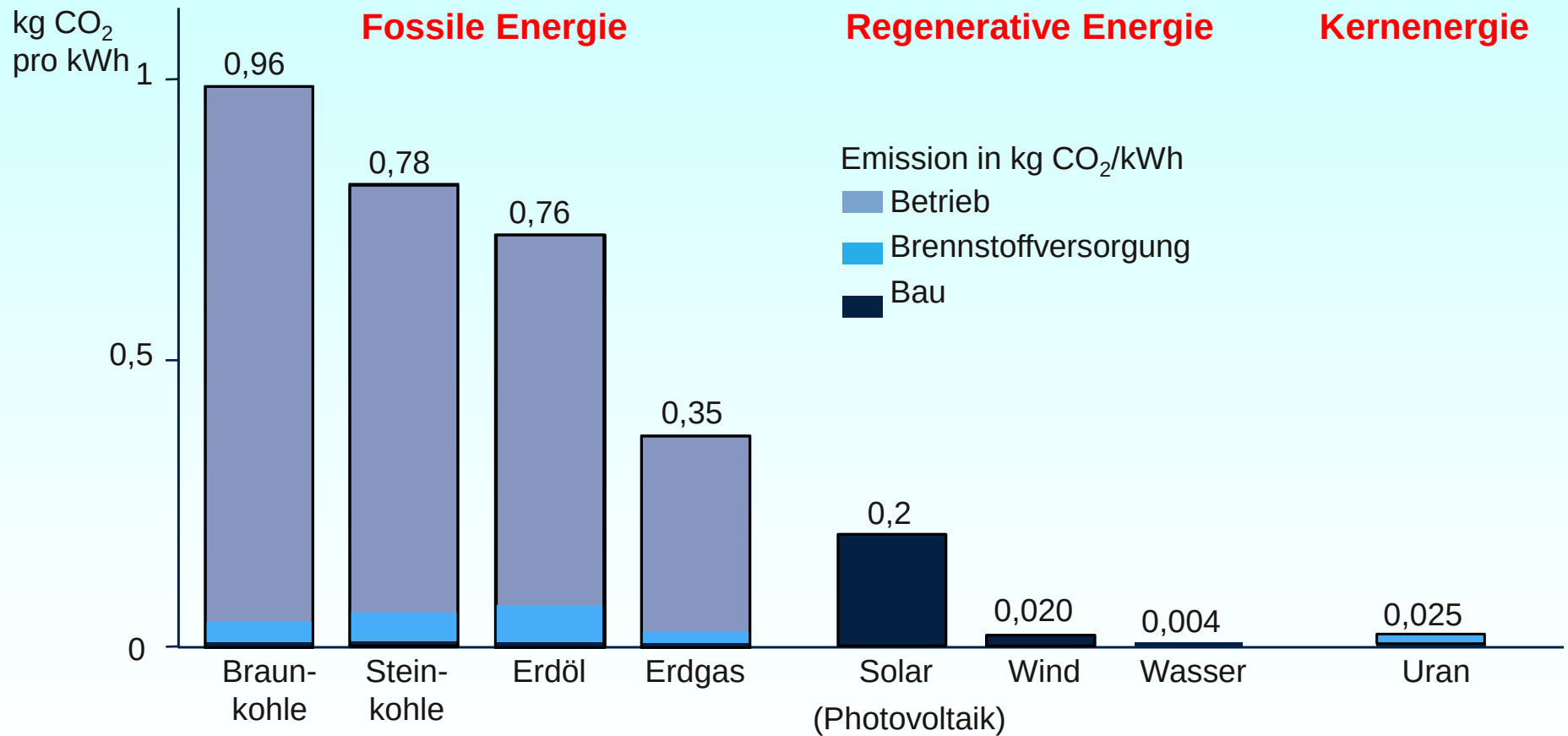
Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
1/41

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung

CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung in verschiedenen Kraftwerkstypen

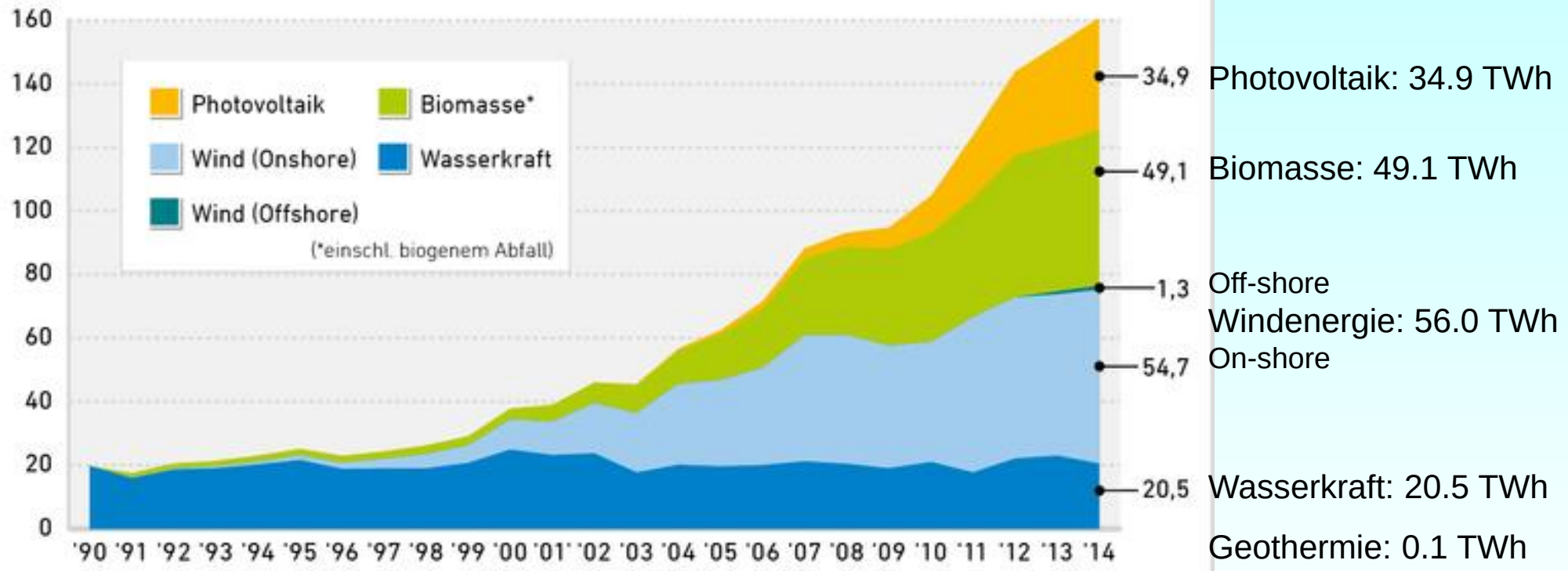


Quelle: Siemens AG



Brutto-Erzeugung elektrischer Energie aus regenerativen Energiequellen in Deutschland 1990-2014 (aus 93.1 GW)

Tera-Wattstunden



→ Jahr Typische äquivalente Volllaststunden:

Quelle: BMWi/AGEE-Stat Energiebilanzen, 03/2015, www.unendlich-viel-energie.de

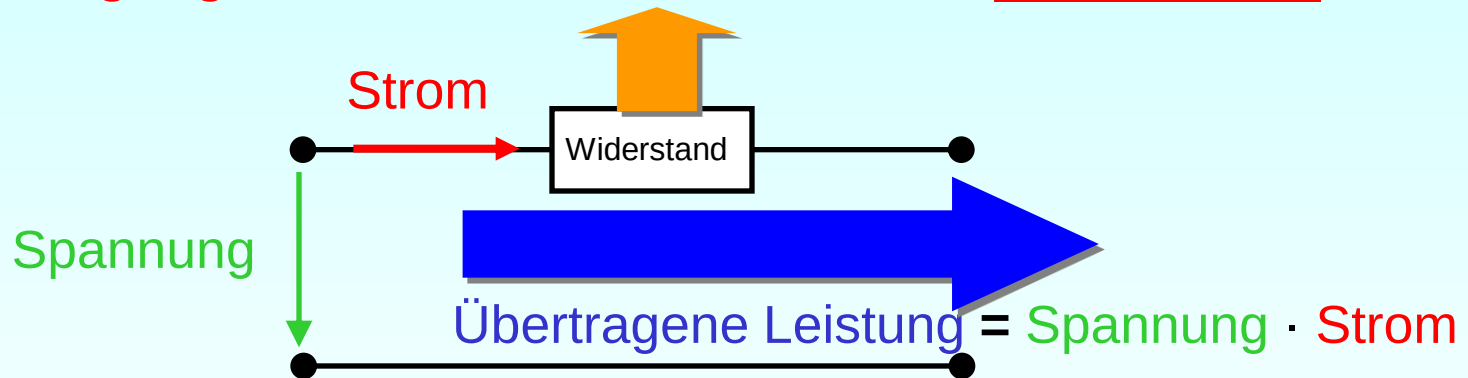
Photovoltaik:	890 h/a
Biomasse:	5940 h/a
Windenergie:	1430 h/a
Wasserkraft:	3970 h/a
Geothermie:	420 h/a



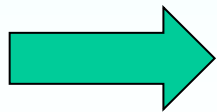
Warum hohe Übertragungsspannungen?

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

Übertragungsverluste = Widerstand · **Strom zum Quadrat**

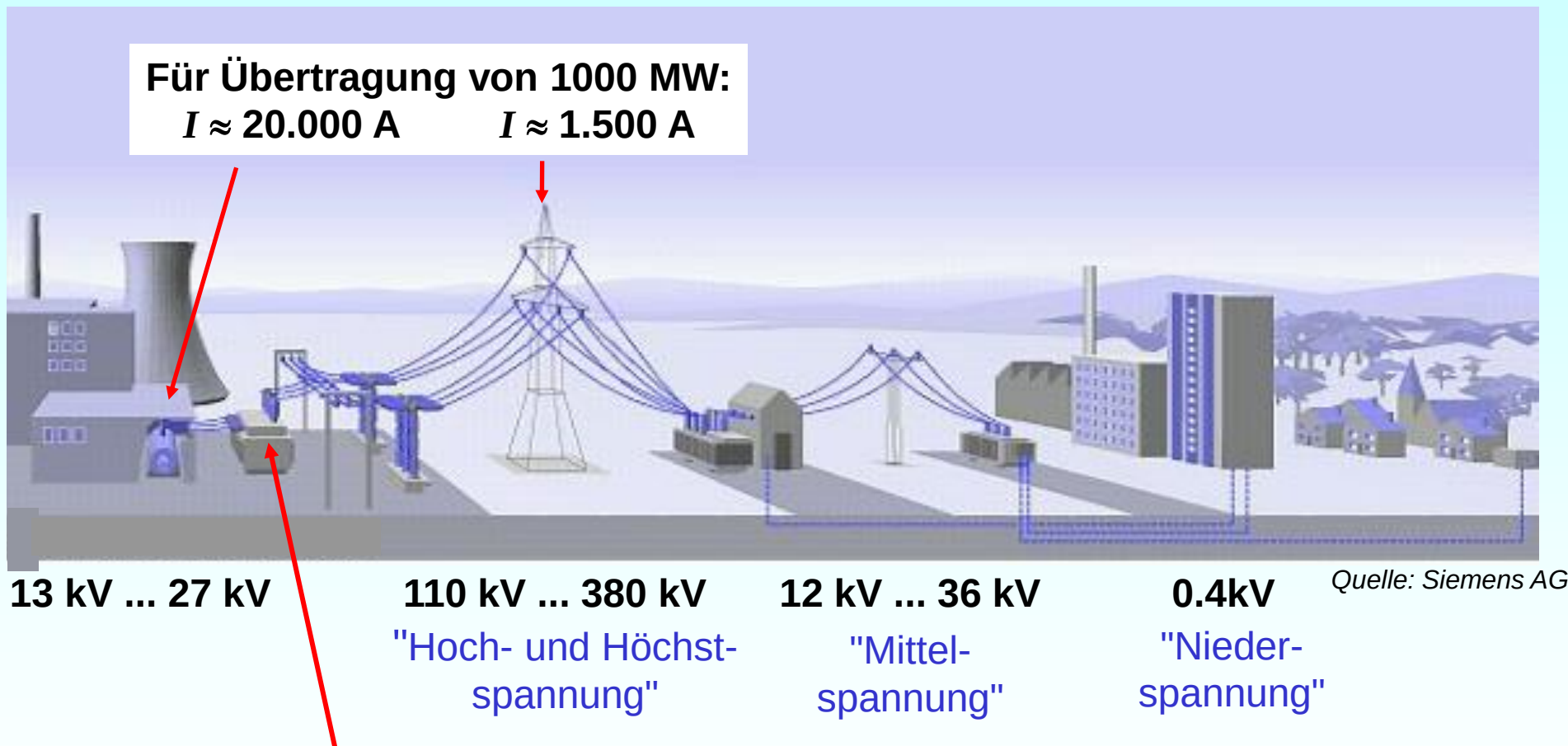


Hoher **Strom** → hohe Übertragungsverluste (quadratisch zum Strom!)
Hohe **Spannung** → hoher Isolationsaufwand



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

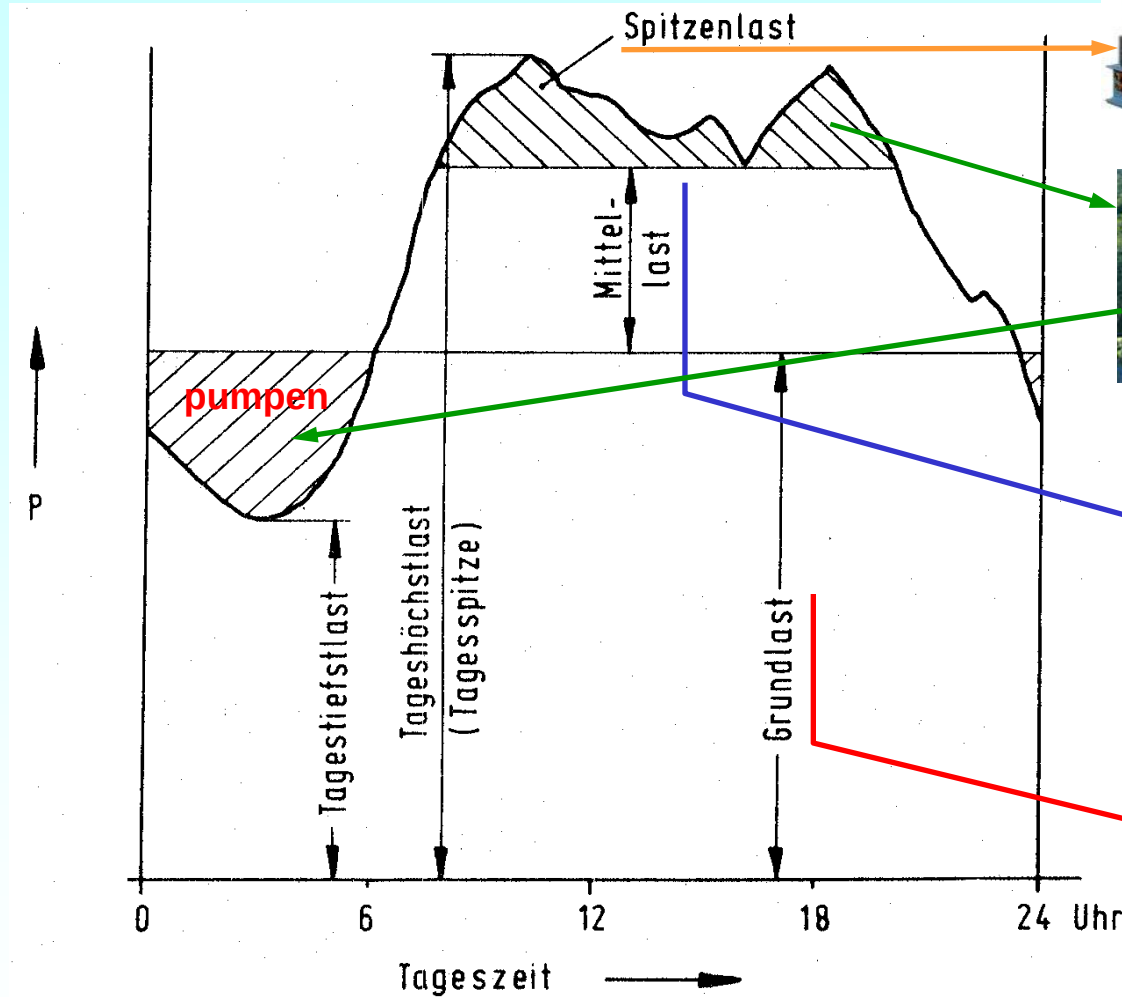
Vom Erzeuger zum Verbraucher



Blocktransformator im Kraftwerk:

Transformiert Generatorspannung auf Netzspannung

Typische Tageslastkurve – Einsatz der Kraftwerkstypen



Gasturbinen
Wasserkraft
Fremdbezug



Pumpspeicher

Quelle: BWK, VDI



Kohlekraftwerke



Kernkraftwerke



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
1/46

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



Herausforderung „Netzstabilität“

- Der Netzbetreiber hat faktisch **keinen Einfluss** auf die Netzlast und das Verbraucherverhalten.
- Verbrauch und Einspeisung müssen zu jedem Zeitpunkt **im Gleichgewicht** sein. Das elektrische Netz ist (nahezu) KEIN Speicher!



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



Offshore-Windpark zur Erzeugung von elektrischer Energie



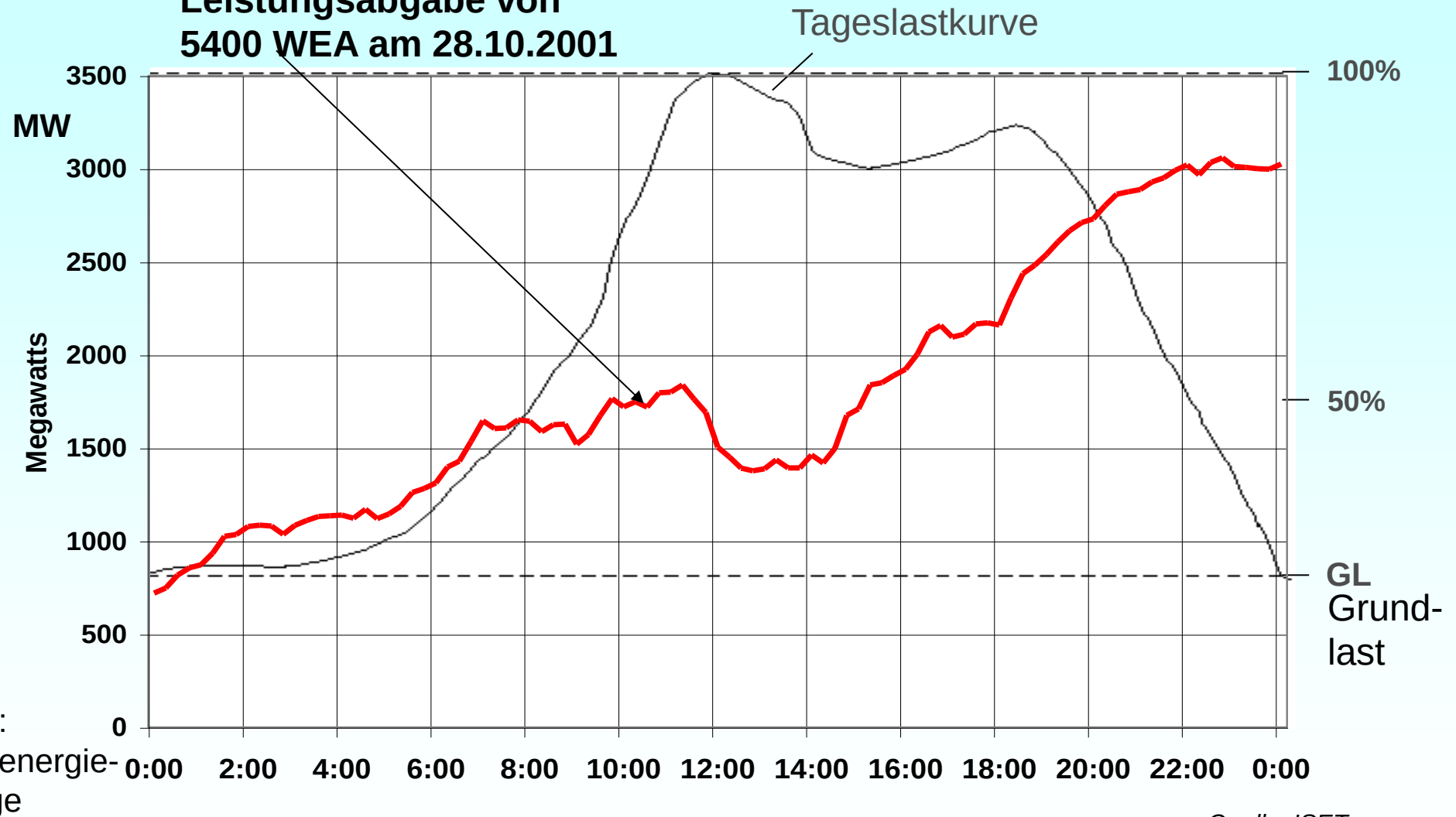
Bild: Peter von Hindte

Quelle:
BWK 67, 2015, no. 1/2

Im Hintergrund: Zentrale Transformatorstation für die AC-Seekabelverbindung zum Festland

Windenergie: Zeitliche Verfügbarkeit

Leistungsabgabe von
5400 WEA am 28.10.2001

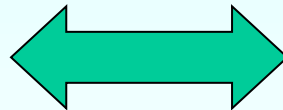


Quelle: ISET



Wind- und Solarenergie: Zeitliche Verfügbarkeit ?

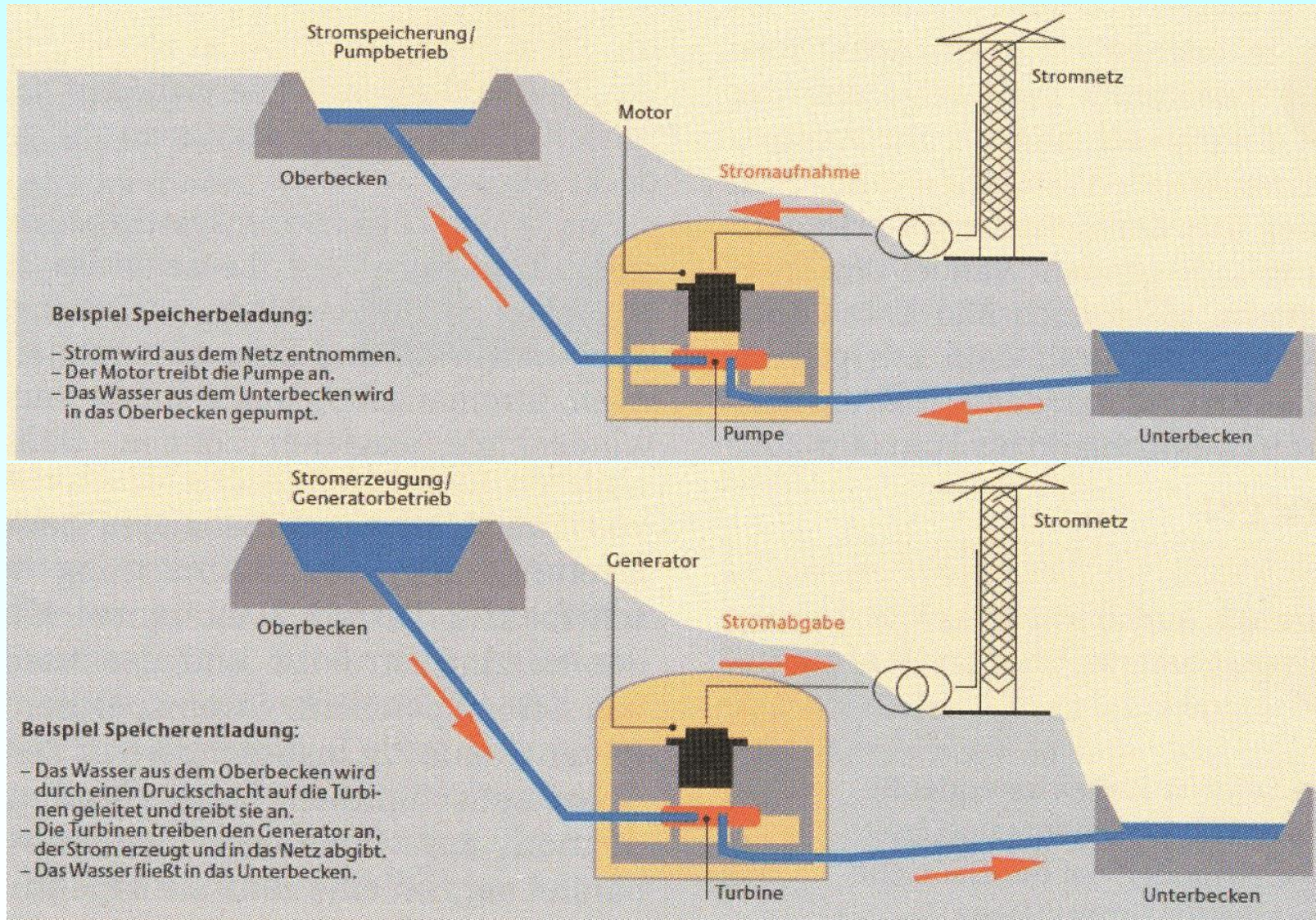
- Für jedes installierte Megawatt Leistung aus Windenergieanlagen muss ein Megawatt schnell verfügbarer Reserveleistung aus konventionellen Kraftwerken vorgehalten werden.
- Bestehende Kraftwerke müssen zunehmend für Regelungsaufgaben eingesetzt werden und arbeiten damit nicht mehr wirtschaftlich optimal.
- Abhilfe: Wesentlich mehr Großspeicher sind erforderlich.



Pumpspeicherwerk Geesthacht bei Hamburg

Jedoch: In Deutschland kaum neue Pumpspeicherwerke mehr möglich !

Pumpspeicherung



Quelle: Jerin,
TU München, aus:
BWK 64, 2012, no. 11

Pumpspeicher-Kraftwerk Goldisthal/Thüringen

1060 MW

Oberbecken



Unterbecken

Quelle: BWK 67, 2015, no. 1/2



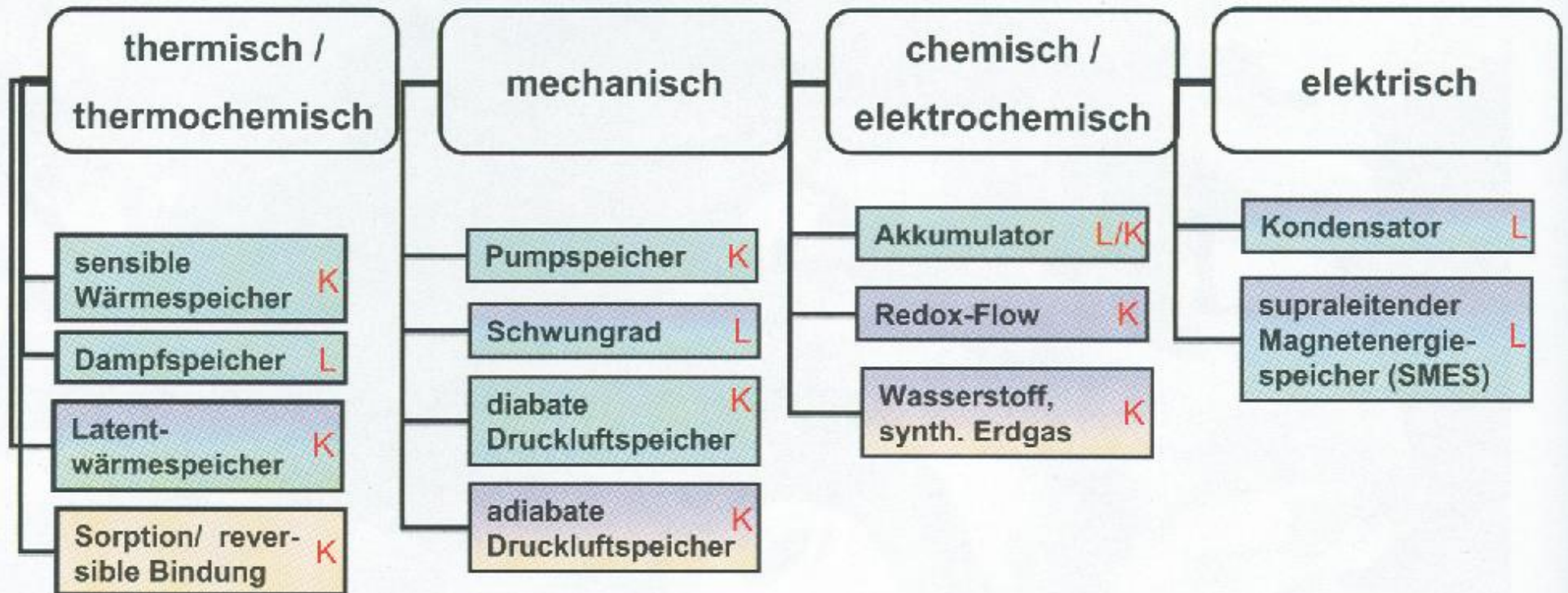
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
1/52

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



Forschung: Wie kann Energie gespeichert werden ?



Auslegungsziel

K - hohe Kapazität

L - hohe Leistung

Entwicklungsstand

F&E

Demonstration

Markt

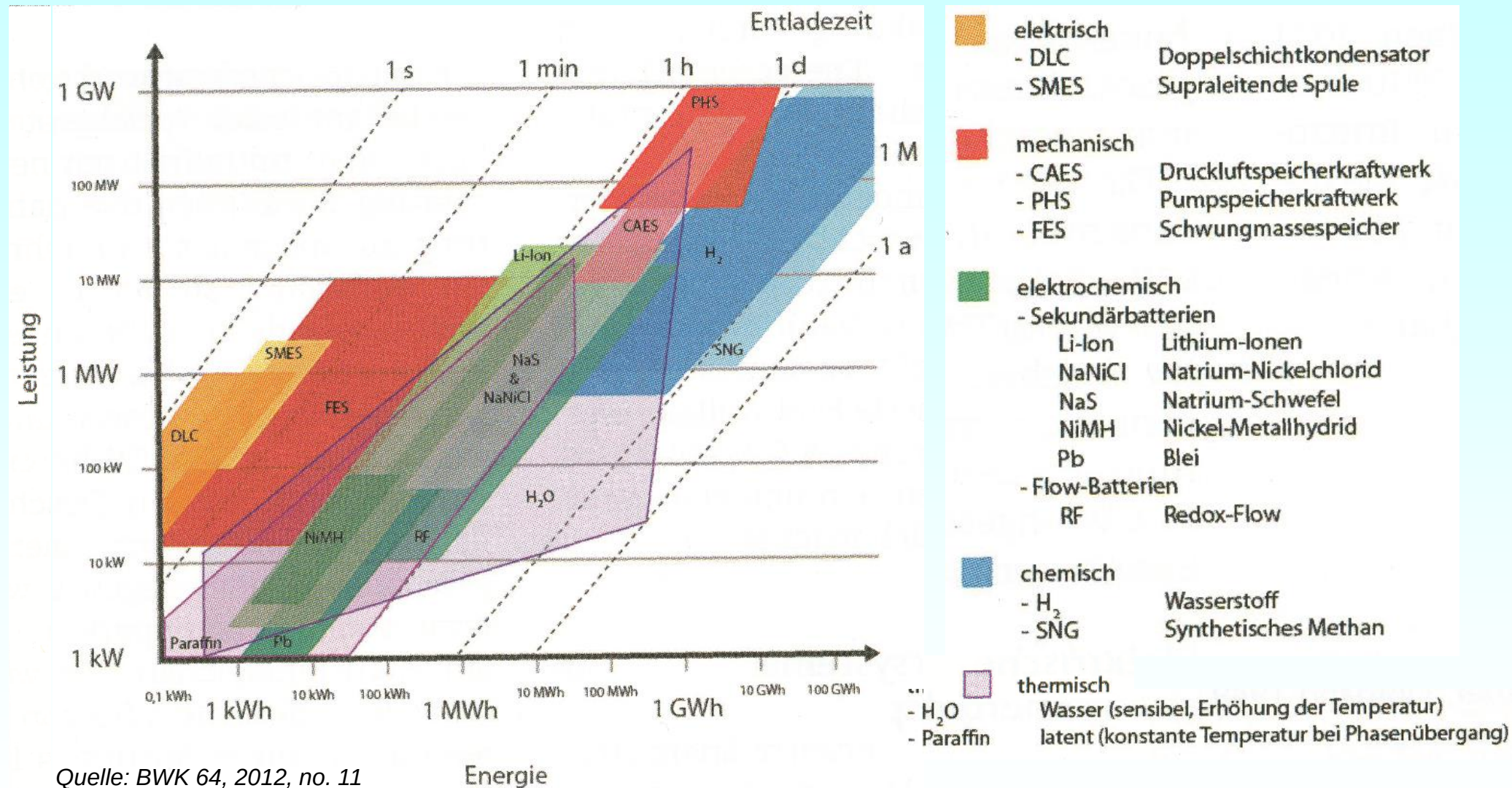
Physikalische Einteilung von Energiespeicher-Optionen

K: hohe Speicherenergie

L: hohe Speicherleistung



Energiespeicher – Ragone-Diagramm



Quelle: BWK 64, 2012, no. 11



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
1/54

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



Zum Nachdenken: Kriterien für Energiespeicher

		spez. Kapazität [kWh/t]	Leistung [MW]	Speicher- nutzungs- grad	Speicher- dauer	Inves- titionen [€/kWh]	Anmerkung
Mechanisch	Pumpspeicher	0.1 ... 3.3 bei 30 ... 1200 m	1 bis 1000	80 %	Tag bis Monate	50	hohe Nutzungsgrade und Kapazitäten, begrenzttes Potenzial in D, hoher Flächenbedarf
	Druckluftspeicher	6 ... 9 bei 70 ... 100 bar	300	40 bis 70 %	Tag	400 bis 800	Diabate Druckluftspeicher: Bedarf an fossilen Energien; diabate Speicherung: notwendige Wärmezwischenspeicherung
Elektro-chemisch	Bleisäure-Batterien	40	skalierbar	85 %	Tag bis Monat	200	geringe Zyklenfestigkeit und niedrige spezif. Kapazität, niedrige Kosten im Vergleich zu anderen Batterie-Systemen
	Li-Ionen-Batterien	130	skalierbar	90 %	Tag bis Monat	1000	Hohe spezifische Leistungen, hohe Kosten, Potenzial zur Kosten- reduktion vorhanden
	NaS-Batterien	110	skalierbar	85 %	Tag	300	Hohe Ruheverluste, hohe Gefährdungs- potenziale
	Redox-Flow-Batterien	25	0,01 bis 10	75 %	Tag bis Monat	500	Hohe Speicherkapazitäten, problematische Umweltverträglichkeit
Thermisch	Sensible Wärmespeicher	10 bis 50	0,001 bis 10	50 bis 90 %	Tag bis Jahr	0,1	Markt-etabliert, niedrige Kosten; niedrige spezifische Speicherkapazität
	Latent-Wärmespeicher	50 bis 150	0,001 bis 1	75 bis 90 %	Stunde bis Woche	10 bis 50	höhere Kosten im Vergleich zu sensiblen Wärmespeichern; höhere spezifische Speicherkapazitäten
	Thermochemische Speicher	120 bis 250	0,01 bis 1	100 %	Stunde bis Tag	8 bis 40	
Chemisch	Wasserstoff	30 000	0,001 bis 1	25 bis 50 %	Tag bis Jahr	1000 €/kW	sehr hohe Speicherkapazitäten; niedriger elektrische Speichernutzungsgrade, hohe Kosten

Quelle: BWK, 63 no.5/2011, S. 54



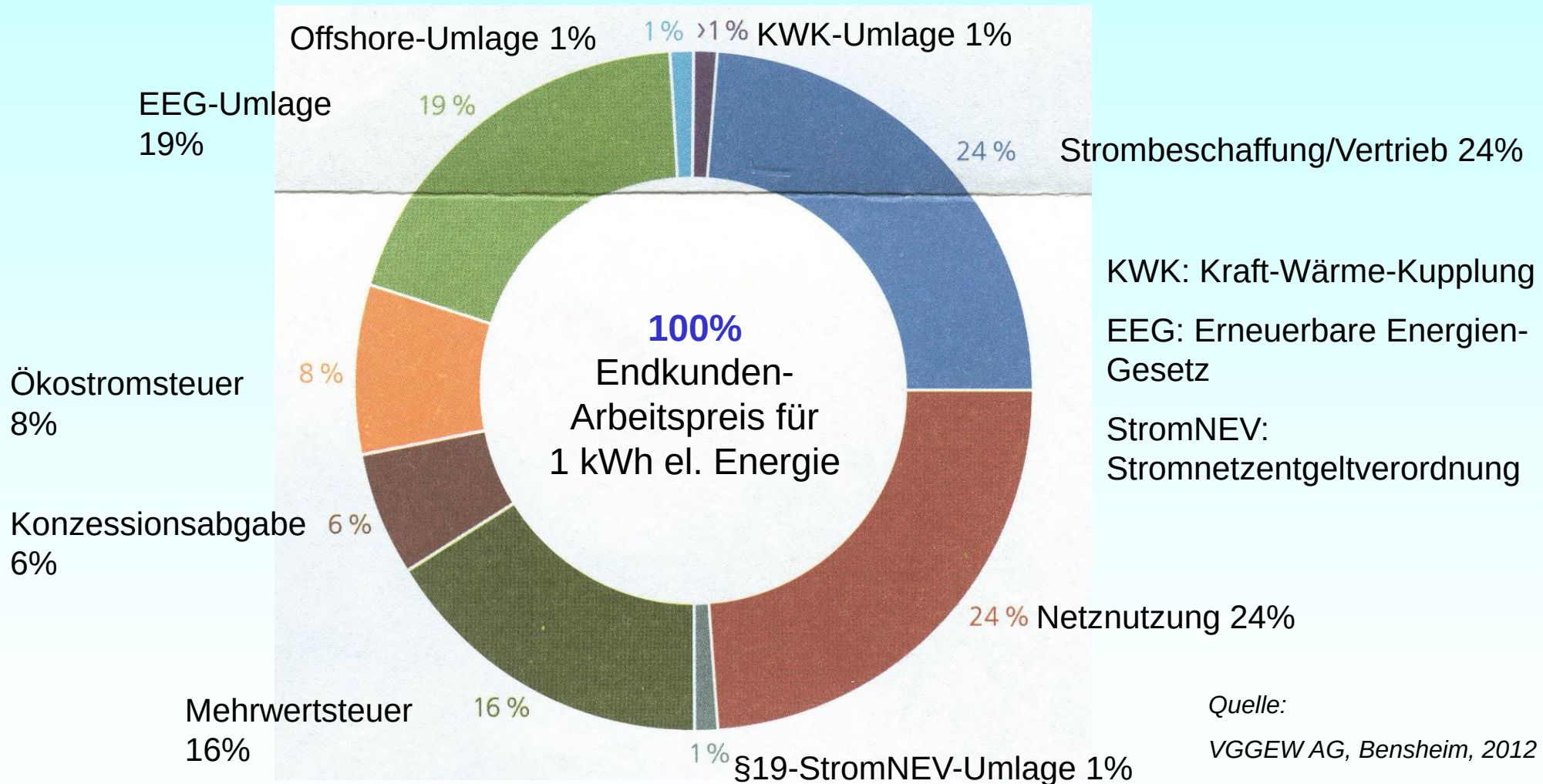
Photovoltaik-Solarkraftwerk *Alt-Daber/Brandenburg* zur Erzeugung von elektrischer Energie (DC)



Quelle:
BWK 67, 2015, no. 1/2

Eines der ersten Photovoltaik-Kraftwerke mit angeschlossenem Speicher für elektrische Energie (Blei-Säure-Batterien, 2000 kWh)

Endnutzer-Preis der elektrischen Energie – Kleinverbraucher 2013



Energietechnik

Zusammenfassung

Schlüsseltechnologie: Elektrische Energietechnik

- Weltbevölkerung steigt rasant und damit der Energiebedarf
- Fossile Energieträger dominant
- Bedarf an elektrischer Energie steigt überproportional
- Deutschland hat einen sehr hohen Reifegrad des Energieversorgungssystems
- Fossile Energieträger bei der elektrischen Energieversorgung dominieren
- „Energiewende“: Regenerative Energiequellen wesentlich stärker nützen
- Daher: Erfordernis von Energiespeichern und Netzausbau
- Tiefgreifende Umstrukturierung des deutschen ele. Energiesystems
- Hoher Ingenieursbedarf



Energietechnik

Inhalt des Vorlesungsteils

I Elektrische Energiewandler

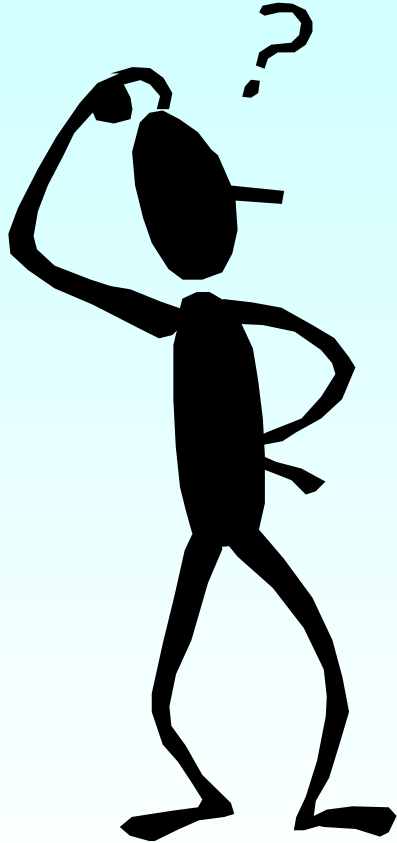
Schlüsseltechnologie: Elektrische Energietechnik

Repetitorium: Grundlagen der Elektrotechnik

1. Elektrische Energiewandlung - Einführung
2. Transformatoren
3. Gleichstrommaschinen
4. Drehfeldmaschinen



1. Elektrische Energiewandlung



Einführung

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:

$$P_{zu} - P_{ab} = 12.5 - 11.0 = 1.5 \text{ kW} = \text{Wärme!}$$



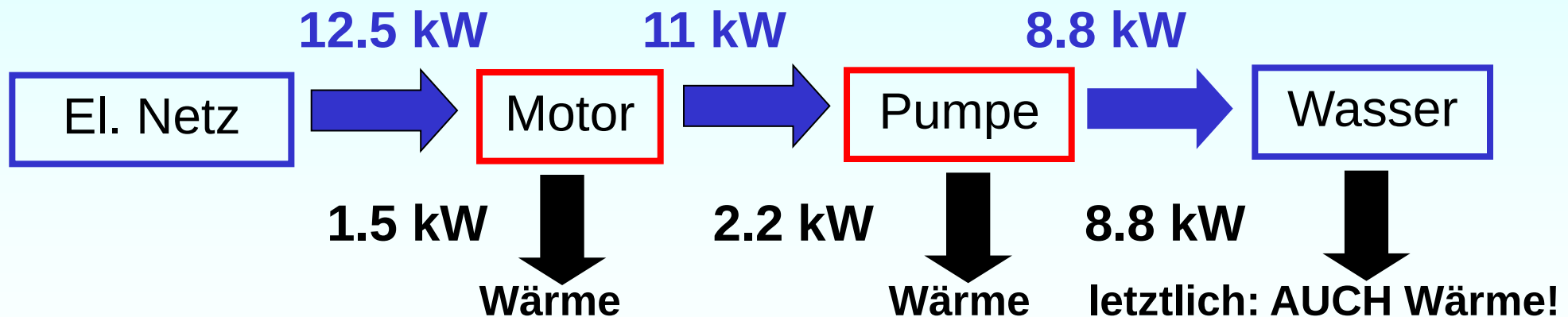
Quelle:
VEM Motors, Wernigerode, D

Verlustenergie = Thermische Energie

Beispiel: 11-kW-Elektromotor als Pumpenantrieb

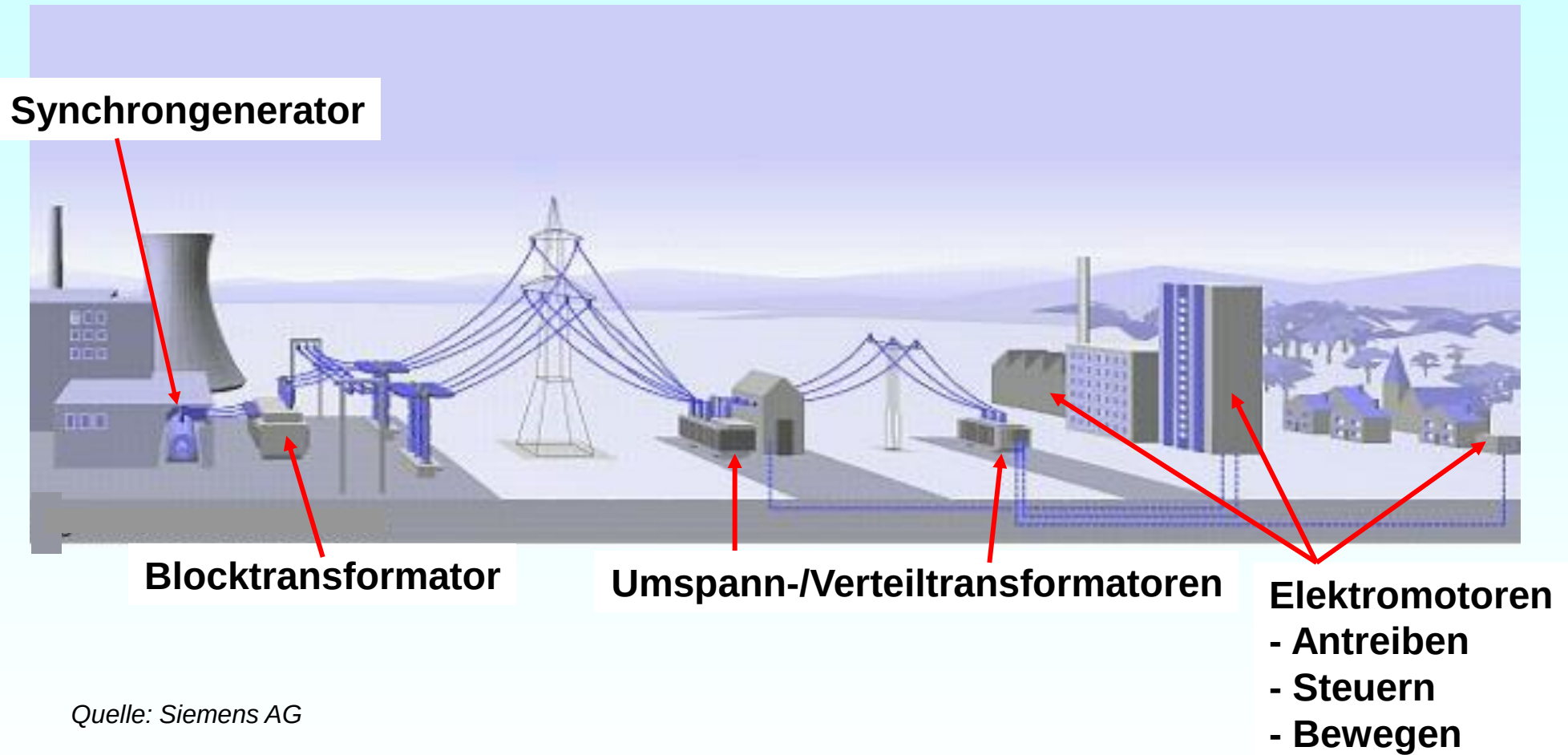
Wirkungsgrade: Motor 88%, Pumpe 80%

- Verlustleistung: Motor: 1.5 kW, Pumpe: 2.2 kW
- Betriebszeit: 1 Jahr = 8760 Stunden
- Verlustenergie Motor $W = 1.5 \times 8760 = 13140$ kWh



Fazit: Wir heizen leider unsere Erde auf. Das CO₂ „hilft“ uns dabei !

Komponenten der elektrischen Energienutzung



Was ist ein elektrischer Energiewandler ?

- Elektrische Energiewandler formen elektrische Energie um:

Elektrisch $\Leftrightarrow$ Elektrisch:	Transformator , DC-DC-Wandler, ...
Elektrisch $\Leftrightarrow$ Mechanisch:	Elektromechanische Energiewandler Elektrische Maschine : Linear oder rotierend Elektromagnetische Stellventile (Aktoren)
Elektrisch $\Leftrightarrow$ Chemisch:	Batterie, Brennstoffzelle,..
Elektrisch $\Leftrightarrow$ Optisch:	Photozelle, (Leuchtdiode)
Elektrisch $\Leftrightarrow$ Fluidmechanisch:	Magnetohydrodynamische Wandler

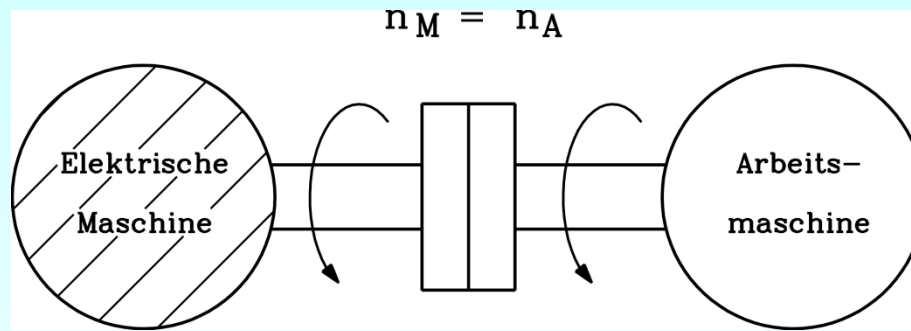
u. s. w.

DC: Direct current (Gleichstrom)

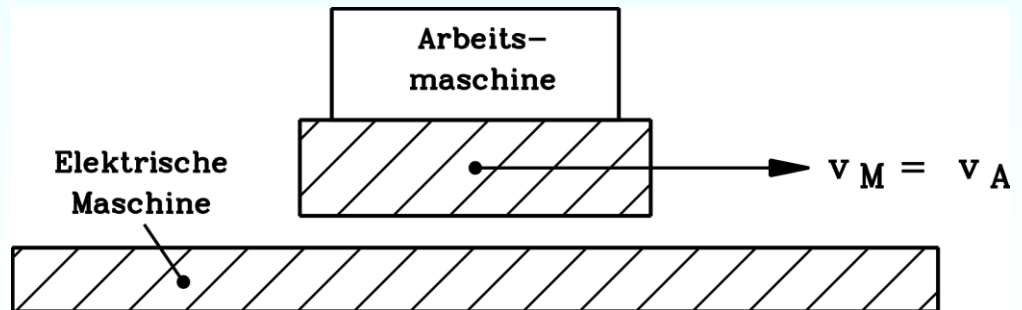


Beispiel: Elektrische Maschine als Energiewandler

- **Rotatorische** Energiewandler: Antrieb einer Arbeitsmaschine (z. B. Pumpe):

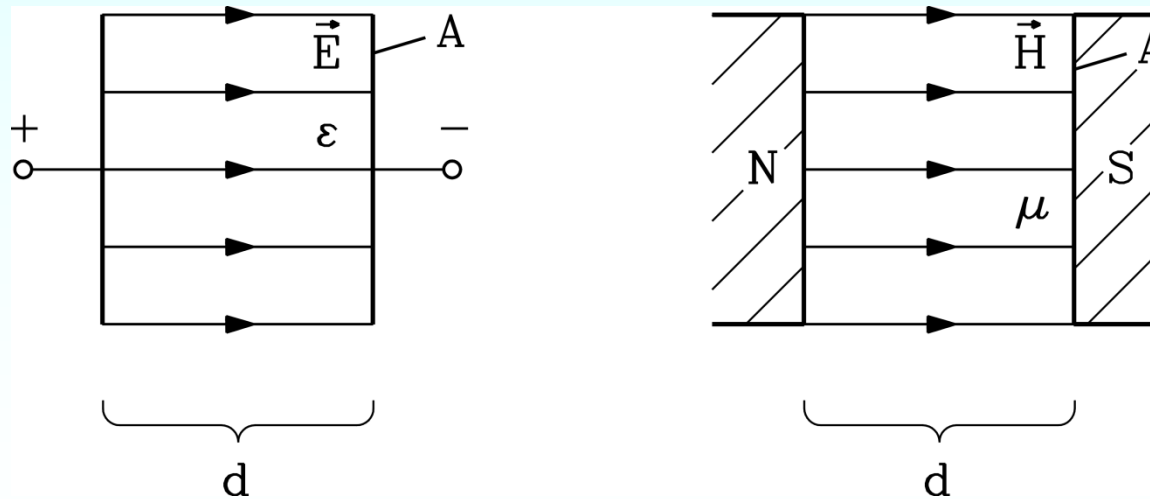


- **Translatorische** Energiewandler (Linearmaschinen) : z. B. Antrieb eines Fahrzeugs (TRANSRAPID), eines Werkzeugschlittens, eines Katapults,...



Elektromagnetische Energie

- **Niederfrequenz**bereich: Elektrisches Feld E bzw. D und magnetisches Feld H bzw. B getrennt betrachtbar (= Magnetfelder zufolge $\partial D/\partial t$ vernachlässigt)
- **Gespeicherte elektrische bzw. magnetische Energie** im Volumen $A \cdot d$:
im ele. Feld E bzw. $D = \varepsilon \cdot E$ (z. B. Kondensator): $W = Ad \cdot (\varepsilon E^2)/2 = Ad \cdot D^2/(2\varepsilon)$
im mag. Feld H bzw. $B = \mu \cdot H$ (z. B. Luftspalt zw. Polen):
 $W = Ad \cdot (\mu H^2)/2 = Ad \cdot B^2/(2\mu)$



Energieumsetzung mit Magnetfeld statt elektrischem Feld

Änderung der Energie bei kleinen Wegänderungen = Kraft $F = dW/dx$

- **Beispiel:** gleiches Luft-Volumen: Fläche $A = 1\text{m}^2$, Abstand $d = 1\text{mm}$

Luft: Durchschlagfeldstärke $E = 40\text{ kV/cm}$, $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}\text{ As/(Vm)}$

Magnetfeld $B = 1\text{T}$, $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\text{ Vs/(Am)}$

- **elektrische Energie:**

$$W = Ad \cdot (\varepsilon E^2)/2 = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot (4 \cdot 10^6)^2 / 2 = 0.07\text{ Ws}$$

- **magnetische Energie:**

$$W = Ad \cdot B^2 / (2\mu) = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1^2 / (2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}) = 400\text{ Ws} \Rightarrow \underline{400/0.07 = 5700 (!)}$$

- ***Das magnetische Feld erlaubt wesentlich größere Energiedichten und wird daher bevorzugt für elektrische Energiewandler eingesetzt!***

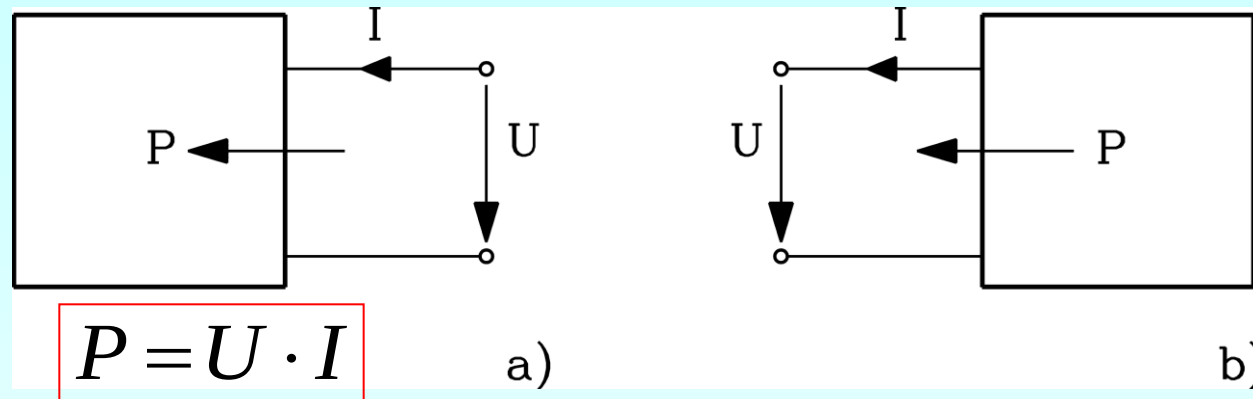
Ausnahmen: Mikromotoren: Elektrostatische Kräfte, Piezoeffekt-Kräfte
(gut miniaturisierbar, Kräfte sehr klein)



Nutzung des Elektromagnetismus für die Energiewandlung

- **Nutzung** für Transformatoren, elektrische Maschinen, magnetohydrodynamische Wandler, elektromagnetische Aktoren etc.
- Erregung von **Magnetfeldern** mit Strom (AMPERE'scher Durchflutungssatz) oder Permanentmagneten
- Berührungslose **Spannungsinduktion** und damit Energieübertragung (FARADAY'sches Induktionsgesetz)
- **Kraftwirkung** auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld bewirkt Umsatz von elektrischer in mechanische Energie (LORENTZ-Kraft)

Zählpfeilsystem für Wirkleistungen



a) Zugeführte elektrische Wirkleistung P ist positiv: **Verbraucherzählpfeilsystem**

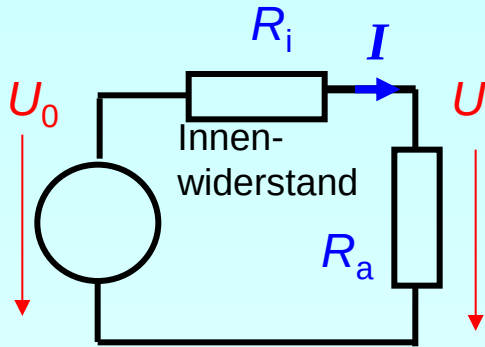
b) Abgegebene elektrische Wirkleistung P ist positiv: **Erzeugerzählpfeilsystem**

Hier wird ausschließlich das **VZS** verwendet.

Im **VZS** gilt:

- $P > 0$: **Verbraucher** (z. B. Motor, Heizwiderstand, Laden v. Batterien,...)
- $P < 0$: **Erzeuger** (z. B. Generator, Batterie, Brennstoffzelle,...)

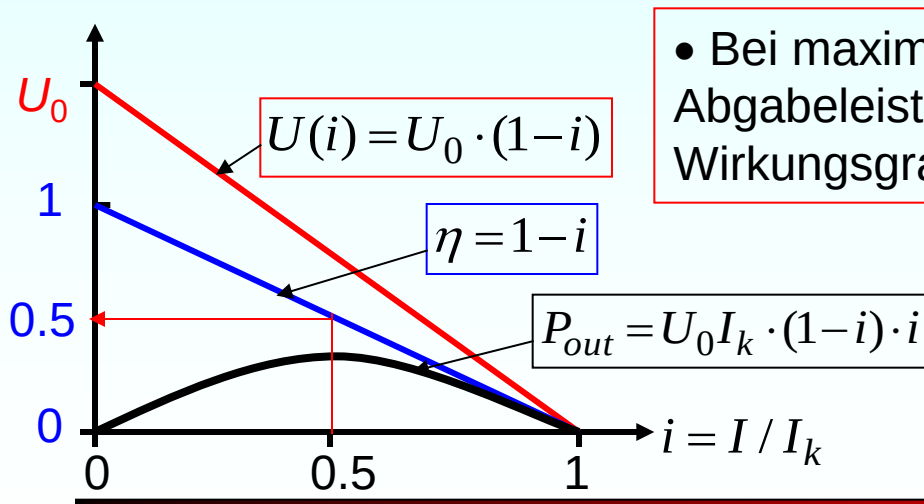
Beispiel: Gleichspannungsquelle U_0 , Verbraucher R_a



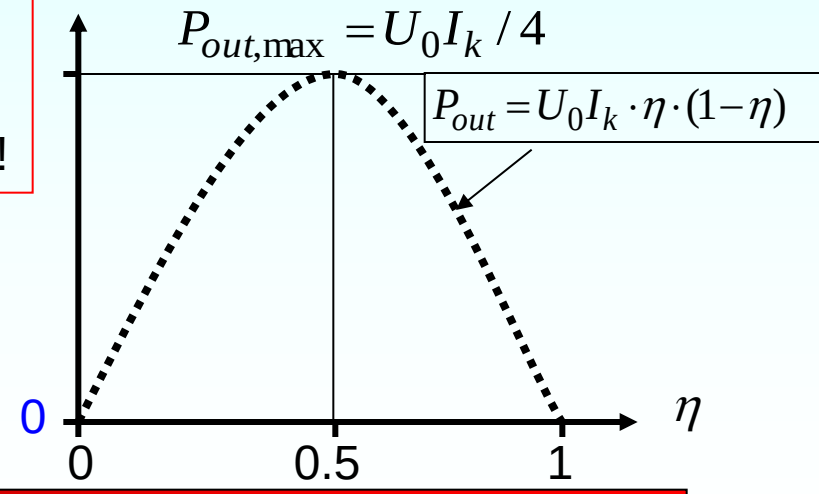
- Kurzschlussstrom: ($R_a = 0$): $I_k = U_0 / R_i$
- Laststrom: $I = \frac{U_0}{R_i + R_a}$
- Bezogener Laststrom: $i = I / I_k$
- Lastspannungscharakteristik:

$$U = U_0 - I \cdot R_i = U_0 \cdot (1 - I / I_k) = U_0 \cdot (1 - i) = U(i)$$

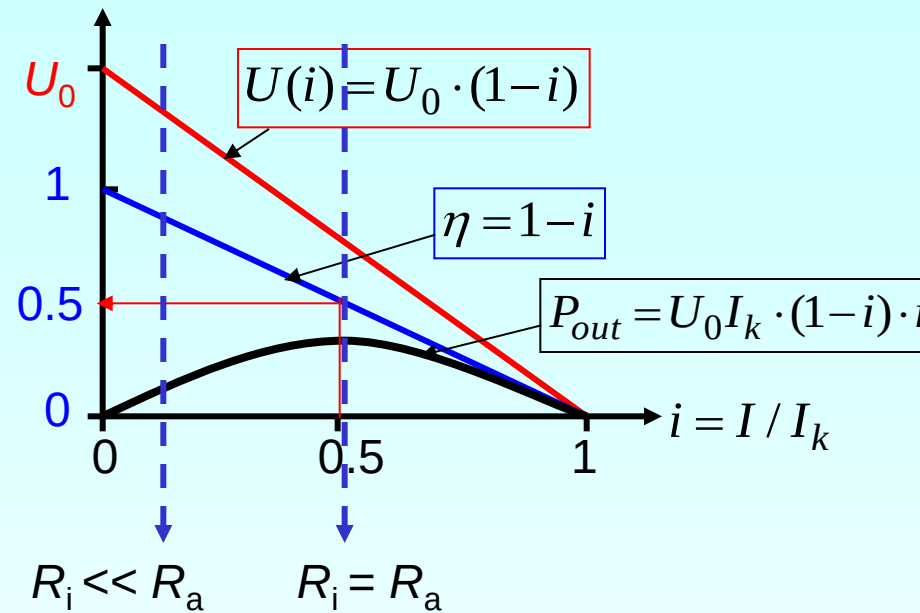
- Abgabeleistung: $P_{out} = U \cdot I = U_0 I_k \cdot (1 - i) \cdot i$
- Wirkungsgrad: $\eta = P_{out} / P_{in} = (U \cdot I) / (U_0 \cdot I) = U / U_0 = 1 - i \Rightarrow P_{out} = U_0 I_k \cdot \eta \cdot (1 - \eta)$



- Bei maximaler Abgabeleistung ist der Wirkungsgrad nur 50%!



Arbeitsbereiche der Energie- und Nachrichtentechnik



$R_i \ll R_a$:

Einsatzbereich der **Energietechnik**:
hoher Wirkungsgrad η angestrebt!

Aber: Maximale Systemleistung (z. B.
Netzkurzschlussleistung $U_0 I_k = U_0^2 / R_i$)
viel höher als die genutzte Leistung!

$R_i = R_a$:

Einsatzbereich der **Nachrichtentechnik**:
hohe Empfangs- und Sendeleistung P_{out}
angestrebt („Leistungsanpassung“)!

Kleiner Wirkungsgrad wegen der rel.
niedrigen Leistungen verschmerzbar!



Energietechnik

Zusammenfassung Elektrische Energiewandlung - Einführung

- Energienutzung: Maßzahl „Wirkungsgrad“
- Keine unnötige Überdimensionierung der Komponenten
- Unterschiedliche Arten von elektrischen Energiewandlern
- Elektrische und elektromechanische Wandler größerer Leistung nutzen das Magnetfeld
- Erzeuger- und Verbraucher-Zählpfeilsystem
- Energietechnik: Hoher Wirkungsgrad, daher KEINE Leistungsanpassung

