

Energietechnik



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Kapitel R Ressourcen und Energieströme

Technische Universität Darmstadt
Institut für Elektrische Energiewandlung

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Andreas Binder



R Ressourcen und Energieströme



E Einleitung

G Grundlagen **Wird vorausgesetzt**

R Ressourcen und Energieströme

B Bedarf und Wachstum

P Prozesse

T Transformatoren und Generatoren

V Elektrische Energieversorgung

S Speicher **Ergänzung**



R Ressourcen und Energieströme

R1. Energieträger: Reserven und Ressourcen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

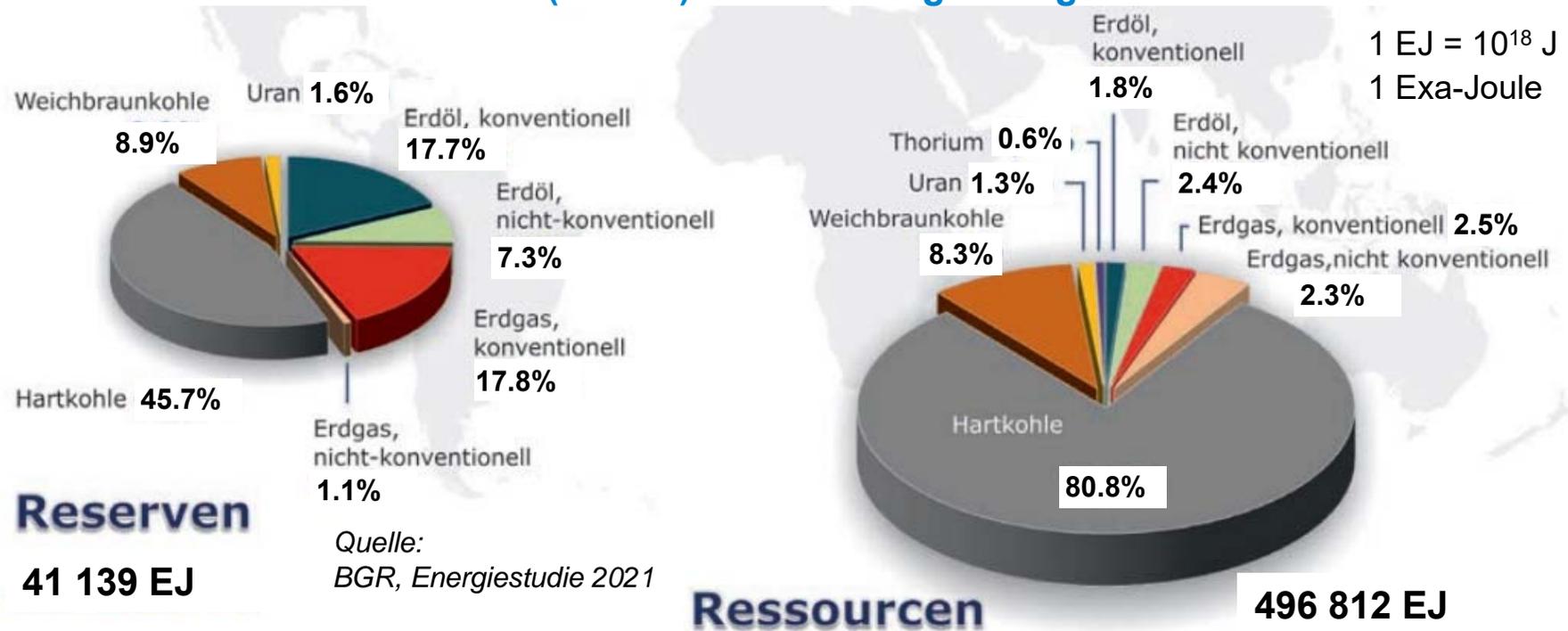
1. **Energieträger: Reserven und Ressourcen**
2. **Sonnenenergie**
3. **Wasserkraft**
4. **Windkraft**
5. **Meeresenergie**
6. **Erdöl**
7. **Erdgas**
8. **Steinkohle**
9. **Braunkohle**
10. **Kernbrennstoffe**
11. **Erdwärme**
12. **Biomasse**
13. **Energieströme**



R1 Energieträger: Reserven und Ressourcen

Weltenergiesreserven & Ressourcen 2020

- **Reserven:**
Vorkommen, die nach dem heutigen Stand der Technik wirtschaftlich **erschließbar sind**
 - **Ressourcen:**
Vorkommen, die nachweislich vorhanden, aber wirtschaftlich **noch nicht nutzbar sind**
- **Reserven + Ressourcen = (fossile) Gesamtenergiemenge**



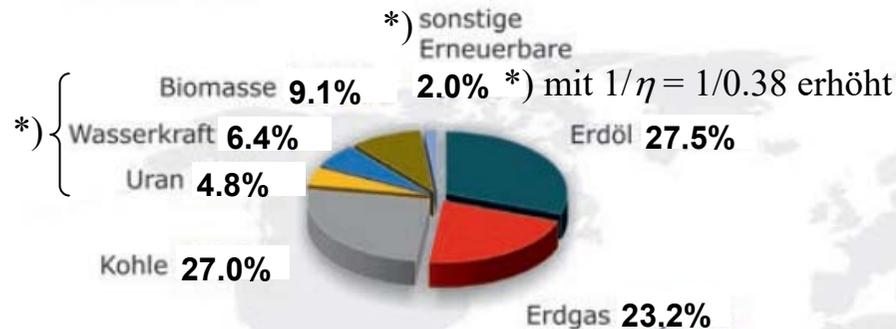
R1 Energieträger: Reserven und Ressourcen

Welt-Energieverbrauch & Produktion 2020

Energieverbrauch

Quelle: BGR, Energiestudie 2021

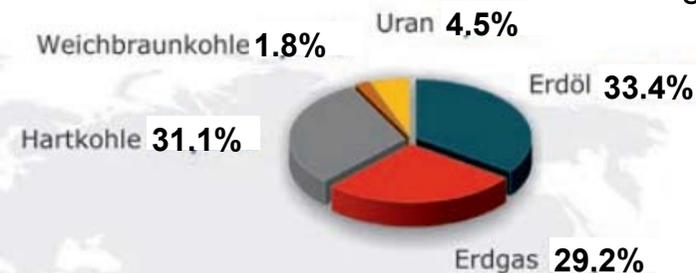
600 EJ



Produktion

(Jahresgewinnung:
aus nicht-
erneuerbaren
Energiequellen)

521.2 EJ



$$600 \text{ EJ, } 7.8 \text{ Mrd. Erdbewohner} \Rightarrow W = \frac{600 \cdot 10^{18}}{7.8 \cdot 10^9} = 77 \cdot 10^9 \text{ J/(Person \& Jahr)}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Wärmeabgabe / Person} = \text{ca. } 100 \text{ W} \Rightarrow \text{Wärmeenergie } W_p: \\ W_p = 100 \cdot 8670 \cdot 3600 = 3.1 \cdot 10^9 \text{ J/(Person \& Jahr)} \end{array} \right\} W / W_p = 25$$

Pro-Kopf-Energie“verbrauch“ W entspricht: 25 Glühbirnen à 100 W leuchten ganzes Jahr !

R1 Energieträger: Reserven und Ressourcen

Trends



- **Allgemeiner Trend:**
 - Anstieg in den **Reserven**
 - Stagnation der **Ressourcen**
- **Ressourcen** der nicht-erneuerbaren Energierohstoffe übertreffen die **Reserven** um das 12.1-fache

$$496\,812\text{ EJ} / 41\,139\text{ EJ} = 12.1$$

- Anteil **erneuerbarer Energien** (ohne Wasserkraft) am weltweiten Energieverbrauch: 11.1% (Stand 2020), davon über 80% biogene Brennstoffe (Biomasse)
- Anteil der Wasserkraft: 6.4% (Stand 2020)
- Relation von **Jahresgewinnung** („Produktion“) an fossiler und Kern-Primärenergie zu Gesamtenergiereserve: **1:75**

$$41\,139\text{ EJ} / 521.2\text{ EJ} \approx 79 \text{ („Reichweite“ daher } < 79 \text{ Jahre)}$$

- steigender Energiebedarf kann mittelfristig abgedeckt werden
- Frage der bedarfsgerechten Verfügbarkeit und der Klimabeeinflussung tw. offen

Quelle: BGR, Energiestudie 2020



R1 Energieträger: Reserven und Ressourcen

Äquivalenter Anteil am Energieverbrauch



- **Weltenergieverbrauch:**

Bei der Angabe zu den genutzten „Energiequellen“

Kernenergie, Wasserkraft, Biomasse, Wind- und Photovoltaikenergie

wird die genutzte Energiemenge als „äquivalente Energiemenge“ angegeben:

Es wird der tatsächliche Energiebeitrag als Primärenergie für ein **fiktives thermisches Kraftwerk** gleicher Nutzenergie mit einem Wirkungsgrad von ca. 38% umgerechnet.

- Damit soll angegeben werden, wie viel Primärenergie aus **fossilen Quellen** nötig wäre, um diesen Nutzenergie-Beitrag zu erbringen.

- **Beispiel:** Wasserkraft:

a) Tatsächlich erzeugte el. Energie weltweit: 2020: 4300 TWh

b) Äquivalente Primärenergie aus fossilen Trägern: $4300 \text{ TWh} / 0.38 = 11\,300 \text{ TWh} = 40 \text{ EJ}$

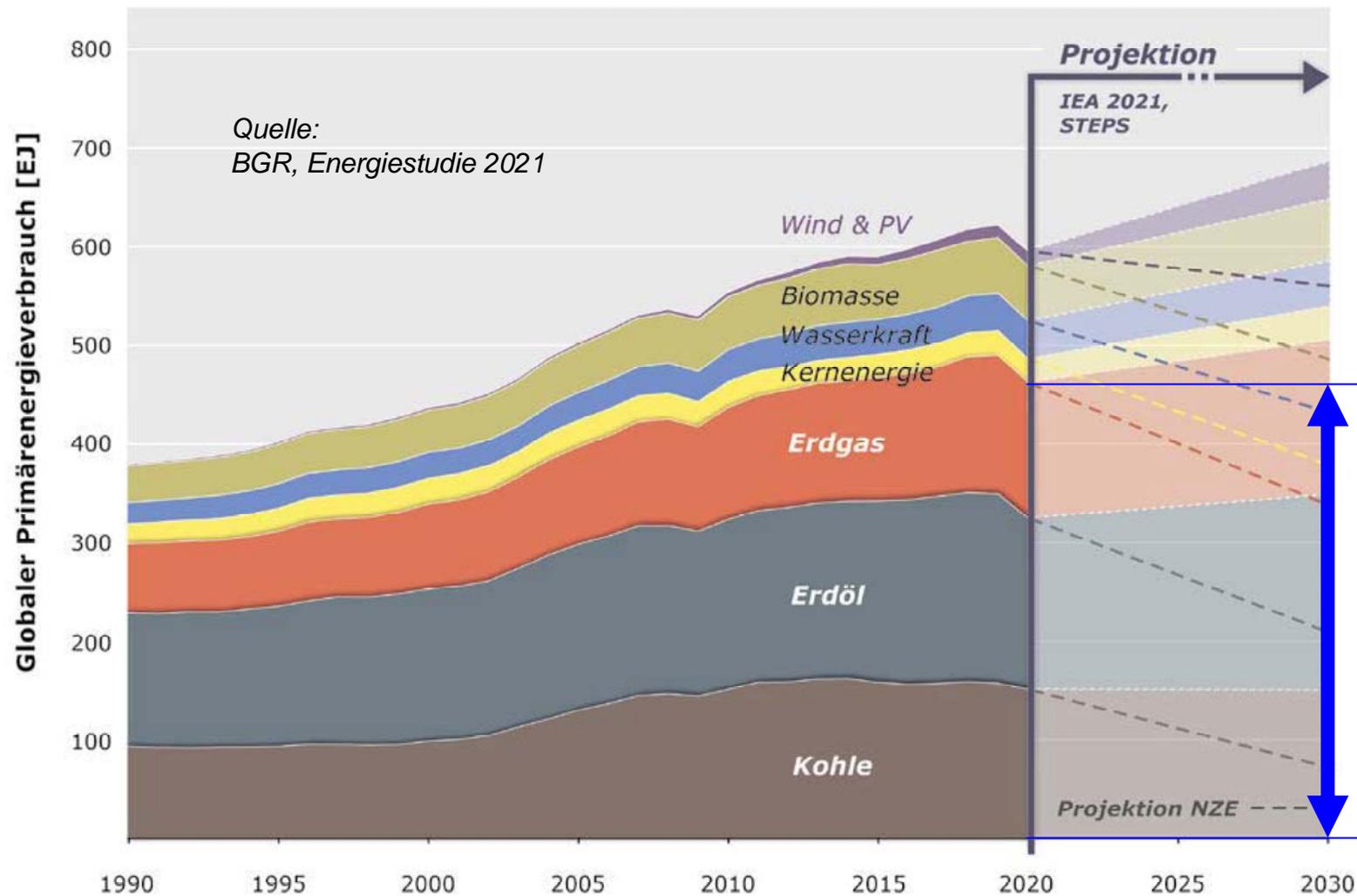
c) Äquivalenter Anteil der Wasserkraft am Welt-Energieverbrauch: $40 \text{ EJ} / 600 \text{ EJ} = 6.7\%$

Quelle: BGR, Energiestudie 2020



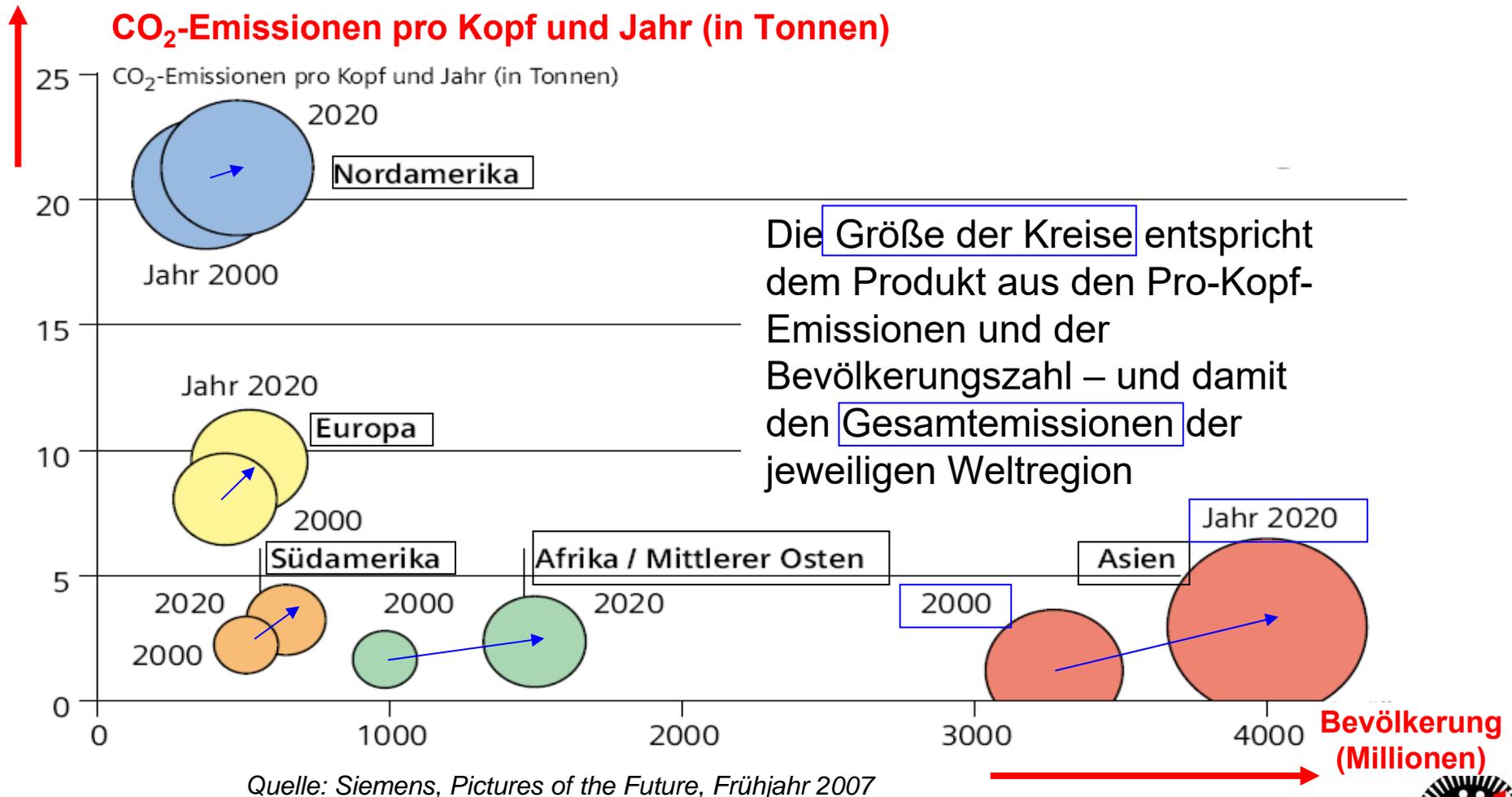
R1 Energieträger: Reserven und Ressourcen

Primärenergieverbrauch der Welt nach Energieträgern



R1 Energieträger: Reserven und Ressourcen

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



R1 Energieträger: Reserven und Ressourcen

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

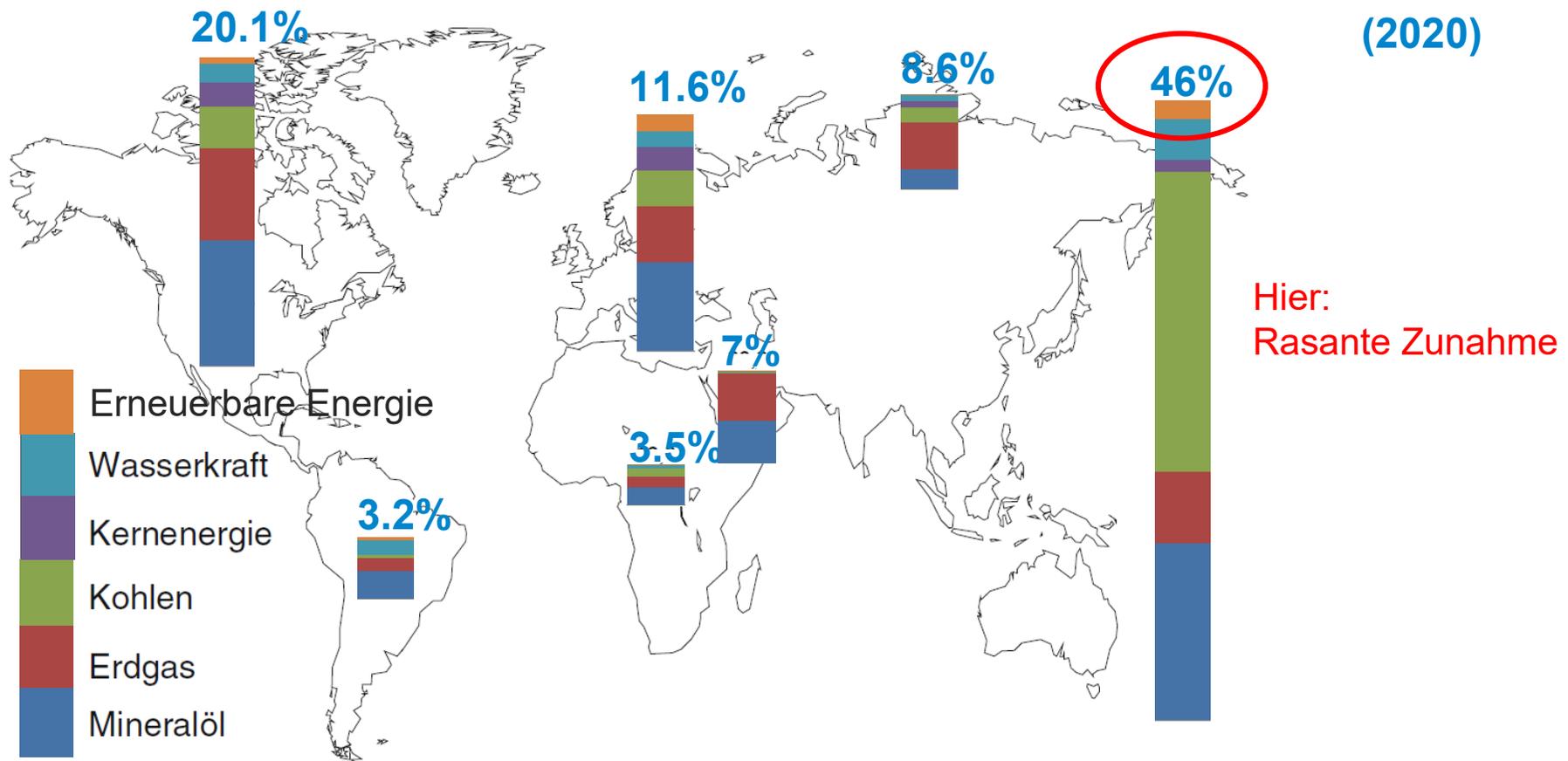


- Die höchsten pro-Kopf-Emissionen in *Nordamerika* und *Europa!*
- Die höchsten Absolutwerte in *VR China!*
- 2020: **Weltweit 4.7 t/a CO₂ pro Person als Durchschnitt.**



R1 Energieträger: Reserven und Ressourcen

Weltweiter Primärenergieverbrauch (nach Primärenergieträgern)



Quelle: PB Statistical Review of World Energy, 2019 & BGR Energiestudie 2021

R Ressourcen

R2. Sonnenenergie



1. Energieträger: Reserven und Ressourcen
2. **Sonnenenergie**
3. Wasserkraft
4. Windkraft
5. Meeresenergie
6. Erdöl
7. Erdgas
8. Steinkohle
9. Braunkohle
10. Kernbrennstoffe
11. Erdwärme
12. Biomasse
13. Energieströme



R2 Sonnenenergie

Übersicht



1. Solare Daten
2. Solare Kernfusion
3. Solares Strahlungsspektrum
4. Sonnenstrahlung auf der Erde



R2 Sonnenergie

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

R2.1 Sonne: Astronomische Daten

Entfernung zur Erde	$d_{SE} = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$
Durchmesser	$d_S = 1.39 \cdot 10^6 \text{ km}$ (109 Erddurchmesser)
Masse	$m_S = 1.98 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ (333 000 Erdmassen)
Dichte γ	Im Mittel: $1\,408 \text{ kg/m}^3$ Im Zentrum: $150\,000 \text{ kg/m}^3$ (Fusionsbereich)
Hauptbestandteile (Vol.-% / Masse-%)	92.1 % / 73.5 % Wasserstoff 7.8 % / 24.9 % Helium
Strahlungsleistung P	$3.85 \cdot 10^{26} \text{ W}$ in alle Richtungen $1.7 \cdot 10^{17} \text{ W}$ extraterrestrisch Vergleich: durchschnittlicher Primärenergiebedarf/Zeit weltweit $2 \cdot 10^{13} \text{ W}$ (2020)

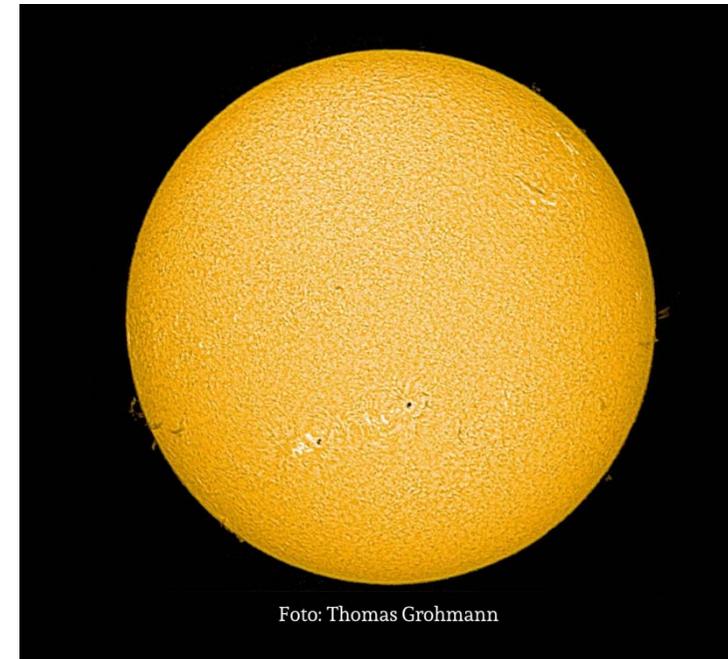


Foto: Thomas Grohmann

Alter	$4.6 \cdot 10^9 \text{ a}$
Verbleibende Leuchtdauer	$5.4 \cdot 10^9 \text{ a}$ (mindestens)



R2.1 Solare Daten

Welt: Leistungsbedarf (2020) und Sonneneinstrahlung



- **Energieverbrauch p. a.: (per annum): 2020** : $W = 600 \text{ EJ}$

- **Mittlerer Jahresleistungsbedarf:**

$$P = \frac{W}{a} = \frac{600 \cdot 10^{18} \text{ J}}{365 \cdot 24 \cdot 3600} = 1.9 \cdot 10^{13} \text{ W}$$

Sonne (Radius $r_S = 6.91 \cdot 10^8 \text{ m}$) strahlt Energiestrom P_S (= Energie je Zeit) ab:

$$P_S = 3.85 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Beim Eintritt in die Erdatmosphäre (= **extraterrestrisch**) auf der Verbindungslinie Erde-Sonne (Abstand $d_{SE} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ vom Sonnenmittelpunkt) tritt Leistungsdichte S_E auf:

Kugelhüllfläche um Sonne bei d_{SE} : $A_{SE} = 4\pi \cdot (d_{SE})^2 = 4\pi \cdot (1.5 \cdot 10^{11})^2 = 28.27 \cdot 10^{22} \text{ m}^2$

Extraterrestrische Solarkonstante:

$$S_E = P_S / A_{SE} = 3.85 \cdot 10^{26} / (28.27 \cdot 10^{22}) = 1.362 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2 = 1.362 \text{ kW/m}^2 \quad \text{Genauer: } 1.328 \text{ kW/m}^2$$

Extraterrestrisch die Erde erreichender Energiestrom P_E : Erdradius $r_E = 6.37 \cdot 10^6 \text{ m}$

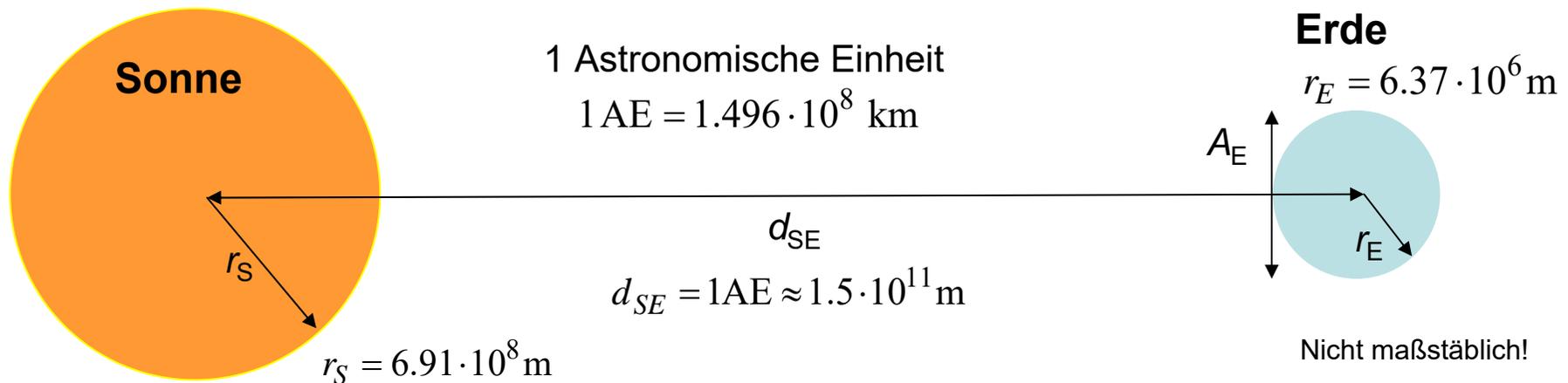
Projizierte Erdoberfläche: $A_E = r_E^2 \cdot \pi = (6.37 \cdot 10^6)^2 \cdot \pi = 1.275 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$

$$P_E = S_E \cdot A_E = 1.362 \cdot 10^3 \cdot 1.275 \cdot 10^{14} = 1.735 \cdot 10^{17} \text{ W} = 9132 \cdot P$$



R2.1 Solare Daten

Sonneneinstrahlung und Erderwärmung



- Eingestrahelte Sonnenenergie p.a.: $W_E = P_E \cdot t_a = 1.74 \cdot 10^{17} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60^2 = 5.5 \cdot 10^{24} \text{ J/a}$
- 30% der Sonneneinstrahlung an der Atmosphäre kurzwellig reflektiert:

Die Erdoberfläche erreichen $P_E = 0.7 \cdot S_E \cdot A_E = 0.7 \cdot 1.362 \cdot 10^3 \cdot 1.275 \cdot 10^{14} = 1.215 \cdot 10^{17} \text{ W}$

- Es werden auch diese 70% der eingestrahelten Sonnenenergie nahezu vollständig in den Weltraum langwellig (300 K: Strahlungsmaximum bei Infrarot) abgestrahlt.

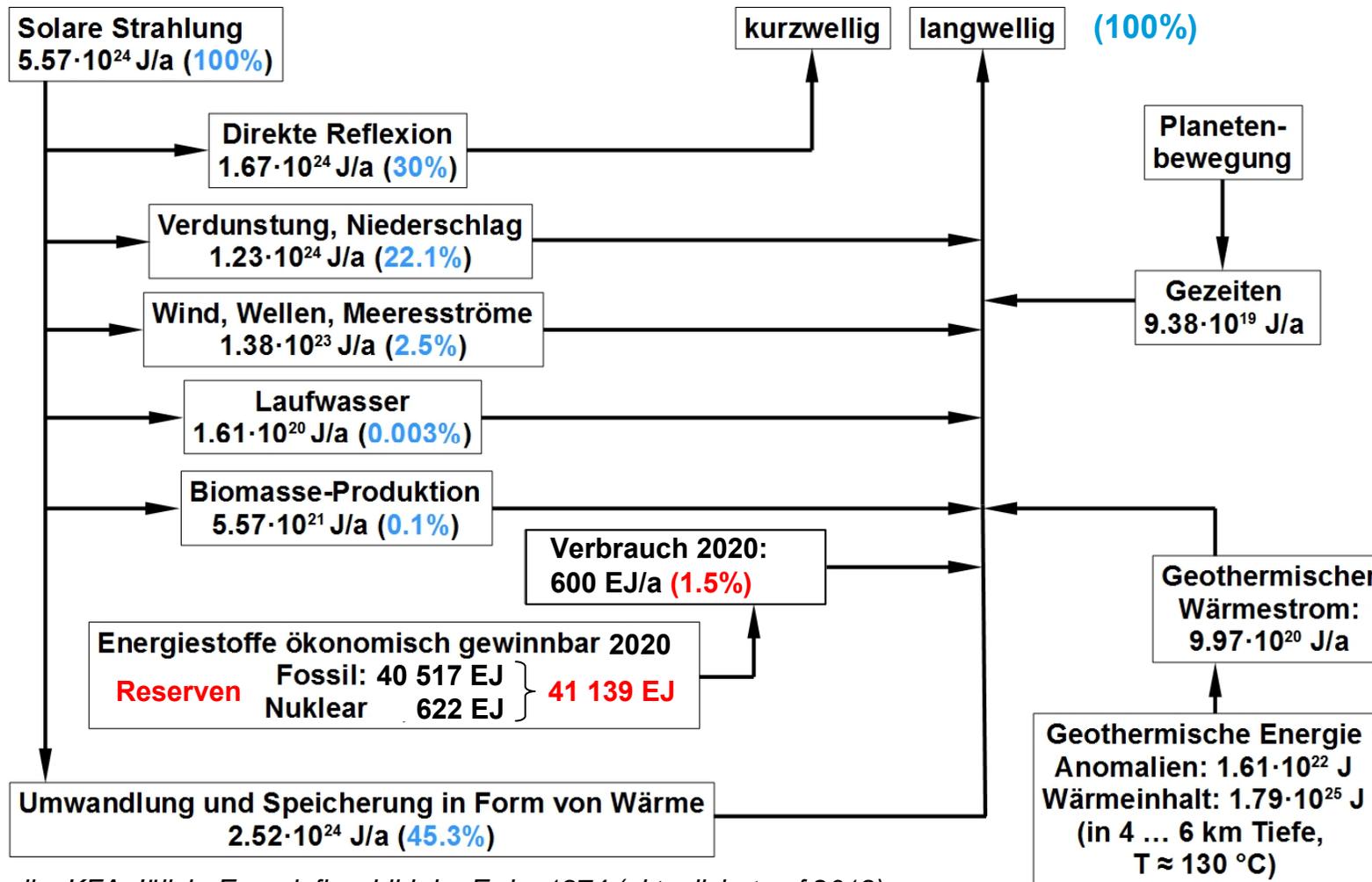
- **Die Erde ist im thermischen Gleichgewicht!**

Wärmestrahlung (Infrarot) $27^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$:
max. Strahlung bei $\lambda_m = 9.7 \mu\text{m} \approx 10^{-5} \text{ m}$

- Die Gesamtenergie der Erde und ihre Temperatur sind etwa **konstant** (abgesehen von der auf dieser Energieskala vernachlässigbar kleinen Klimaerwärmung)

R2.1 Solare Daten

Energieflussbild der Erde



Quelle: KFA-Jülich, Energieflussbild der Erde, 1974 (aktualisiert auf 2019)



R2 Sonnenergie

R2.2 Kernfusion



- Sonnen-Leistung aus Fusion von Wasserstoffkernen zu Heliumkernen
- Voraussetzung für Fusion: Große Masse der Sonne \Rightarrow solare Gravitationskraft überwindet Coulomb-Abstoßung der Wasserstoffkerne und ermöglicht Fusion („Gravitationseinschluss“)

Strahlungsflussdichte in Erdentfernung	1.328 kW/m ² „extraterrestrische Solarkonstante“ (Air Mass Zero AM0)
Edukte	6.57 · 10 ¹¹ kg/s Wasserstoffkerne
Produkte	6.53 · 10 ¹¹ kg/s Heliumkerne (\Rightarrow 99.4% der H-Kerne-Masse)
Massendefekt bei der Proton-Proton-Fusion	$\Delta m/\Delta t = -4.2 \cdot 10^9$ kg/s (= 1-0.994 = 1/164 der H-Kerne-Masse) entspricht abgegebener Strahlungsleistung $P = (\Delta m/\Delta t) \cdot c_0^2$ $P = -3.85 \cdot 10^{26}$ W in alle Richtungen
Temperatur	Kern: 15.6 · 10 ⁶ K Oberfläche: 6 · 10 ³ K = 6000 K

Masseverlust/Jahr: $\Delta \dot{m} = 365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 4.2 \cdot 10^9 = 132.4 \cdot 10^{15}$ kg/a

Tatsächlich zu erwartende Gesamt-Lebensdauer mit Leuchtkraft ca. $t = 12.5 \cdot 10^9$ a.

Dabei Masseverlust NUR: $(\Delta \dot{m} \cdot t) / m_S = (132.4 \cdot 10^{15} \text{ kg/a}) \cdot 12.5 \cdot 10^9 \text{ a} / (1.98 \cdot 10^{30} \text{ kg}) = 0.084\%$



R2.2 Solare Kernfusion

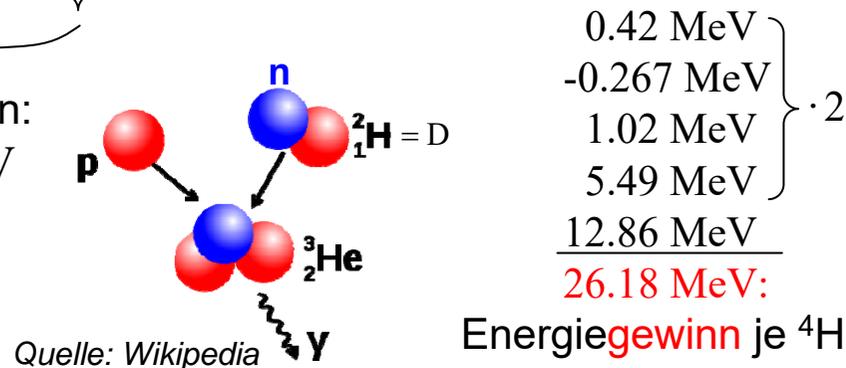
Proton-Proton-Reaktion

- **Sonnen-„Kern“-Temperatur** „nur“ 15 Mio. K statt der für Überwindung der *Coulomb*-Abstoßung erforderlichen Gastemperatur von $T \approx 100 \dots 200$ Mio. K!
- Jedoch sehr hoher Gravitationsdruck $2 \cdot 10^8$ bar \Rightarrow sehr hohe H-Teilchendichte 150 kg/dm^3 :
Bewirkt zusammen mit **quantenmechanischem Tunneleffekt** die Fusion.
- **Stabiler Sonnen-Gasball**: Gleichgewicht von **Gravitationskraft** und **Strahlungsdruck**

- **Proton-Proton-Reaktion**: $p + p = {}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{D} + e^+ + \nu_e + 0.42 \text{ MeV}$
 - Zwei Protonen verschmelzen zu: 1 Deuterium-Kern, 1 Positron, 1 Elektron-Neutrino
 - Neutrales Neutrino (0.267 MeV) verlässt die Sonne als Teilchenstrom ungehindert
 - Positron zerstrahlt mit vorhandenem Elektron in Licht (Gamma-Strahlung):
„**Paarvernichtung**“: $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma + 1.02 \text{ MeV}$

- Deuterium fusioniert mit einem Proton:
 ${}^2_1\text{D} + p = {}^2_1\text{D} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma + 5.49 \text{ MeV}$

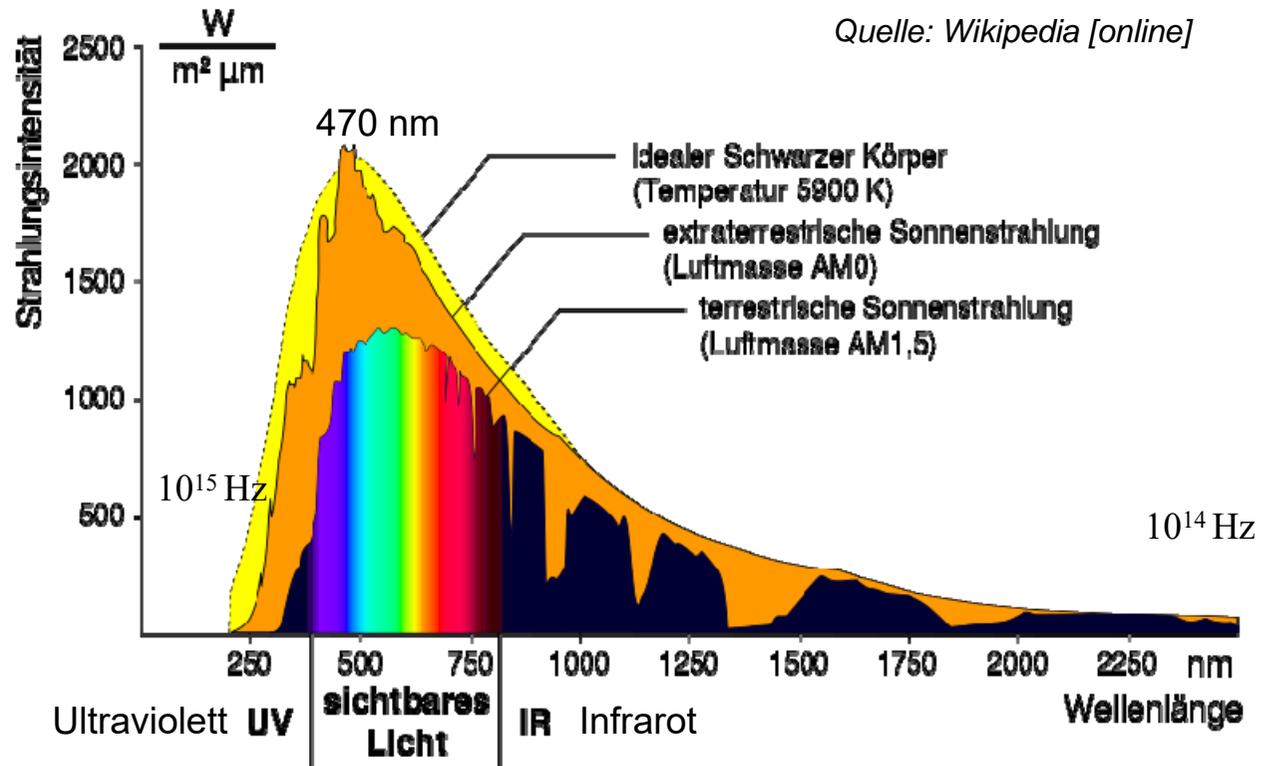
- He3 fusioniert zu He4:
 ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2p + 12.86 \text{ MeV}$



R2 Sonnenergie

R2.3 Solares Strahlungsspektrum

- Spektrale Verteilung der Bestrahlungsstärke der Sonne ist sehr ähnlich wie **schwarzer Strahler** (der dem *Planck'schen* Strahlungsgesetz gehorcht)
- **Strahlungsgesetz (Planck)**: spektrale, flächen-spezifische Strahlung eines ideal schwarzen Körpers der Temperatur T



Strahlungsintensität =
Strahlungsleistung/Fläche

$I = P/A$ im Wellenlängenintervall
 $[\lambda, \lambda + d\lambda]$

Planck'sches Strahlungsgesetz:

$$I_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c_0^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{h \cdot c_0}{e^{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1}$$

R2.3 Solares Strahlungsspektrum Sonnenoberflächen-Temperatur

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Sonne als „schwarzer“ Strahler: Stefan-Boltzmann'sches Strahlungsgesetz:

$$P/A = \sigma \cdot T^4 \quad \sigma = 0.56697 \cdot 10^{-7} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$$

- Abschätzung der Sonnen-Oberflächentemperatur:

Mit Sonnen-Strahlungsleistung $P_S = W/t = 38.5 \cdot 10^{25} \text{ W}$, Sonnenradius $r_S = 0.696 \cdot 10^9 \text{ m}$:

$$A_S = 4\pi \cdot r_S^2, \quad P_S = A_S \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \Rightarrow \quad T = 5737 \text{ K}$$

- Gemessenes extraterrestrisches Sonnenspektrum hat Maximum bei: $\lambda_m = 470 \text{ nm}$

Mit Wien'schem Verschiebungsgesetz: $\lambda_m \cdot T = 2.8978 \cdot 10^{-6} \text{ K}$

ergibt sich der (richtige) Wert $T = 6166 \text{ K}!$

Kommentar:

Differenz 6166 K zu 5737 K ist darauf zurückzuführen, dass die Sonnenstrahlung

- a) nicht nur thermische Strahlung, sondern auch
- b) Zyklotronstrahlung kreisender elektrisch geladener Teilchen im Sonnenmagnetfeld u.
- c) Strahlung durch Plasmaschwingungen in der Photosphäre enthält.

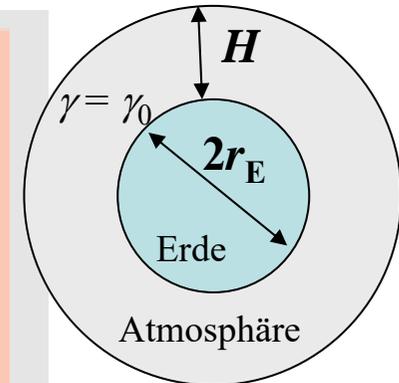
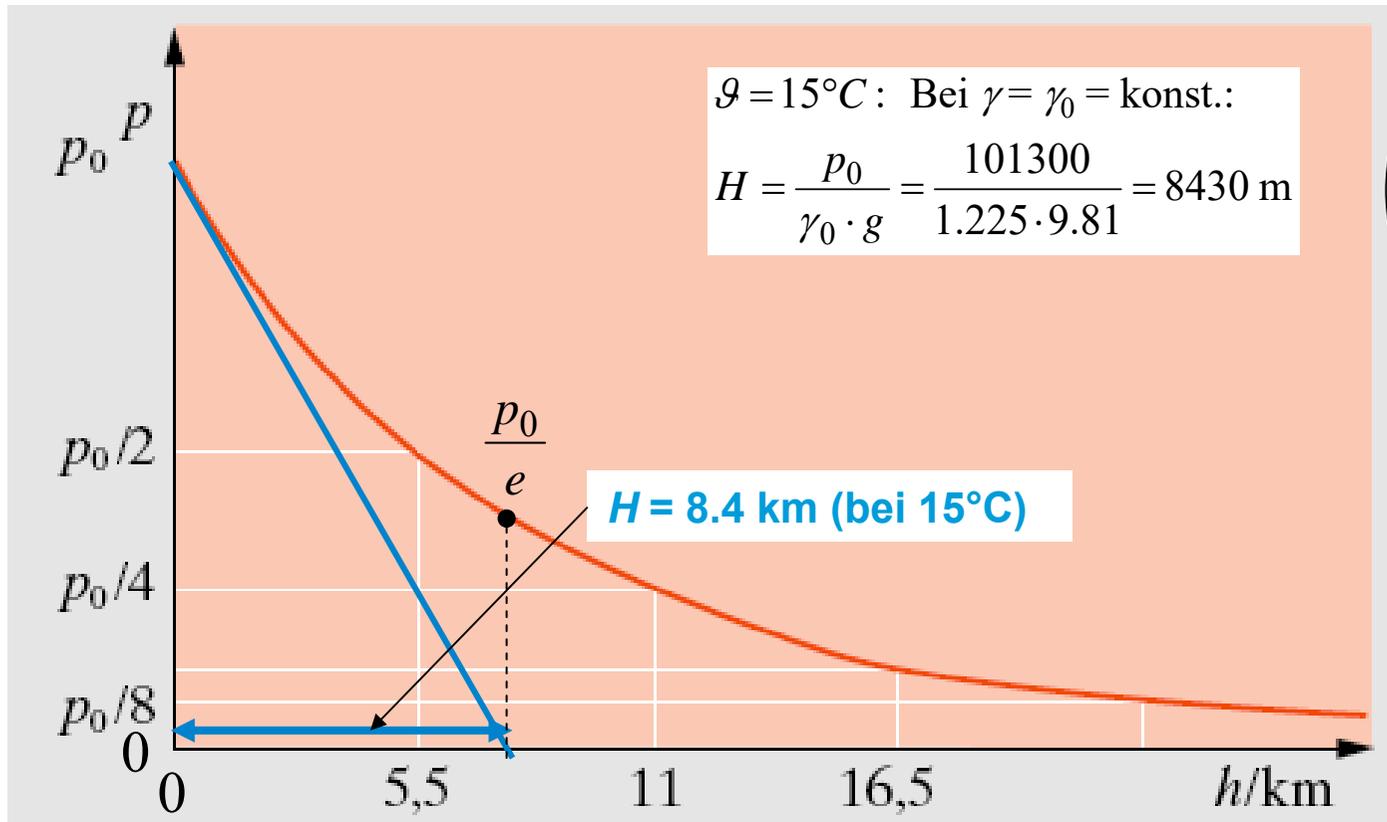


R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Erdatmosphäre

„Skalenhöhe“ H :

Atmosphärensichtdicke H , bei der Luftdruck p und Luftdichte γ (bei konstanter Temperatur) gegenüber dem Boden (p_0, γ_0) um $1/e$ abgenommen haben: **$H = 8.4 \text{ km}$ (bei 15°C)**



Nicht maßstäblich!

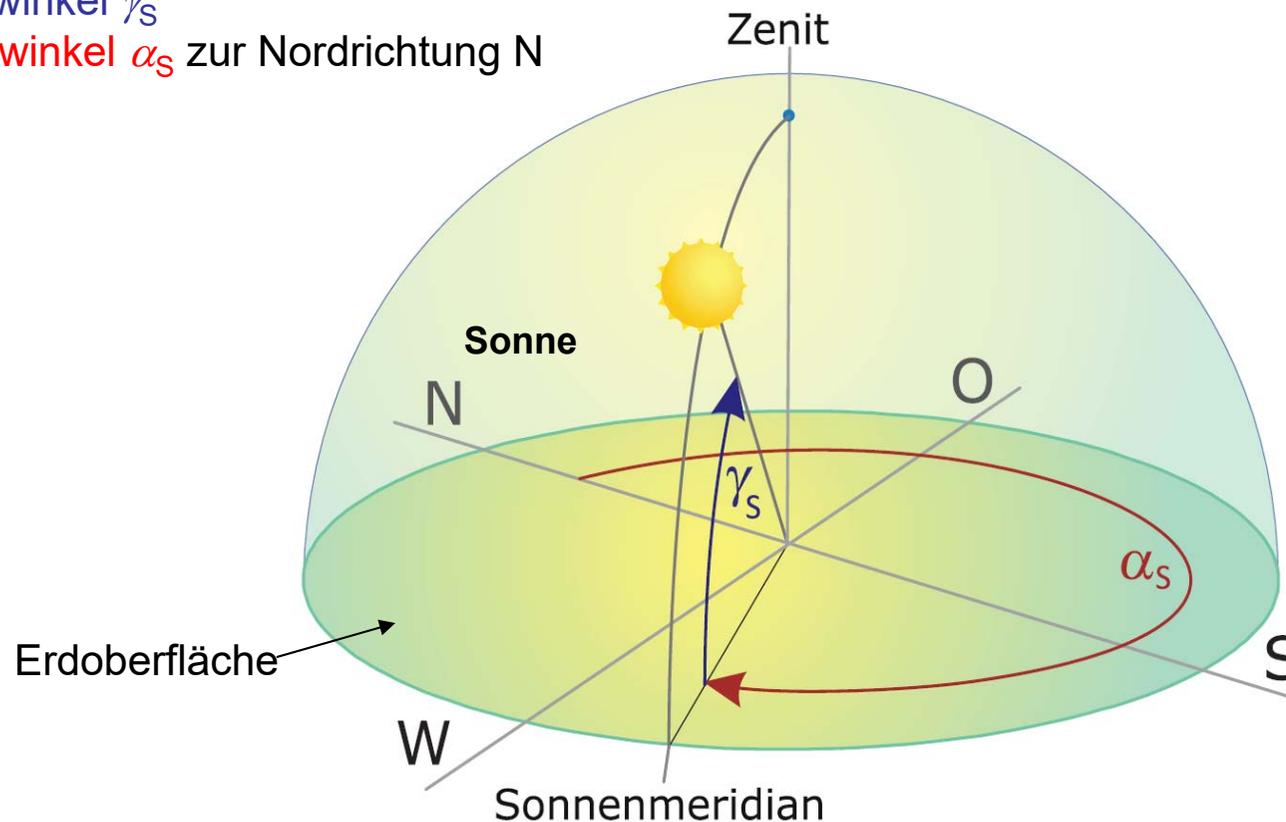
Quelle:
Gerthsen, Physik



R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Scheinbare Sonnenposition

- Scheinbare Sonnenposition für einen beliebigen Beobachter auf der Erdoberfläche:
Beschrieben durch
 - a) **Sonnenhöhenwinkel** γ_S
 - b) **Sonnenazimutwinkel** α_S zur Nordrichtung N



Quelle: V. Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme*

R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Real zu erwartende Sonneneinstrahlung

- Maximal mögliche Sonnenstrahlungsleistung pro Fläche = extraterrestrischer Wert!

Air Mass Zero: AM0: $I_0 = 1.328 \text{ kW / m}^2$ Extraterrestrische Solarkonstante

Tritt auf

- am Äquator,
 - ohne Schiefe der Ekliptik (= Neigung der Erdrotationsachse gegen Erd-Bahnebene),
 - ohne Atmosphäre,
 - bei angenommener Kreisbahn der Erde um die Sonne im Abstand einer „astronomischen Einheit“. $1 \text{ AE} = 1.496 \cdot 10^8 \text{ km}$
- Real gemessene mittlere jährliche Sonneneinstrahlung am Erdboden deutlich kleiner !

R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Air Mass-Faktor AM

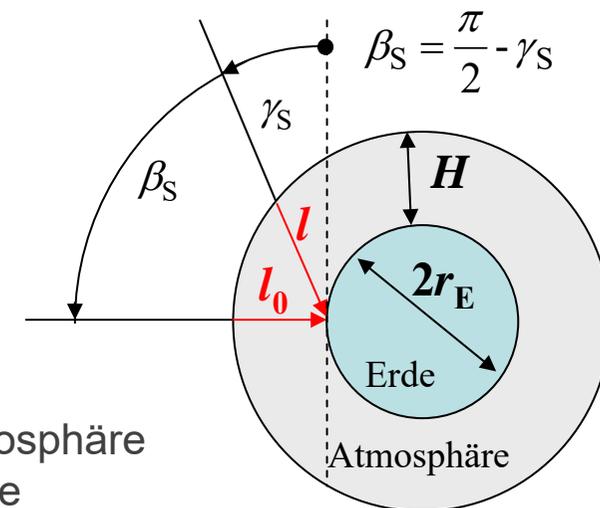
- Lichtweg l beeinflusst
 - a) die Streuung und Absorption des Lichts und
 - b) seine spektrale Zusammensetzung.
- „Luftmasse“ („Air Mass“) **AM**:
 Relatives Maß für die Länge des Weges l , den das Licht eines Himmelskörpers durch die Erdatmosphäre bis zum Erdboden zurücklegt, definiert als
AM = Verhältnis der Weglänge l zur Minimal-Weglänge l_0 bei senkrechtem Lichteinfall

$$AM = l / l_0$$

$$l_0 = H$$

$H = 8.4 \text{ km}$ (bei 15 °C):

Äquivalente Atmosphärenschichtdicke („Skalenhöhe“)



Nicht maßstäblich!

- AM 0:** $l = 0$: Strahlung ohne Schwächung durch Atmosphäre
AM 1: $l = l_0$: Senkrechter Einfall auf die Erdoberfläche
AM 1.5: $l = 1.5 \cdot l_0$ Einfallswinkel $\beta_S = 48^\circ$, bezogen auf Senkrechte

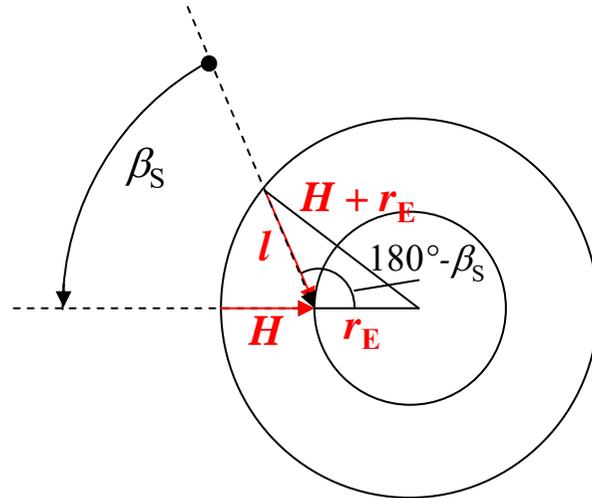
R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Air Mass-Faktor AM Herleitung (1)

Herleitung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



$$\text{Cosinus-Satz: } (r_E + H)^2 = r_E^2 + l^2 - 2 \cdot r_E \cdot l \cdot \cos(180^\circ - \beta_S)$$

$$l^2 + 2 \cdot r_E \cdot l \cdot \cos \beta_S - (r_E + H)^2 + r_E^2 = 0$$

Wurzel-Satz von VIETA:

$$l_{1,(2)} = -r_E \cdot \cos \beta_S \pm \sqrt{r_E^2 \cdot \cos^2(\beta_S) + (r_E + H)^2 - r_E^2}$$

$$\text{AM} = \frac{l}{l_0} = \frac{-r_E \cos \beta_S + \sqrt{(r_E + H)^2 - (r_E \sin \beta_S)^2}}{H}$$

$$\beta_S = 90^\circ : \text{AM}_{\max} = 38.96$$



R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Air Mass-Faktor AM Herleitung (2)

Herleitung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

$$AM = \frac{l}{l_0} = \frac{-r_E \cos \beta_S + \sqrt{(r_E + H)^2 - (r_E \sin \beta_S)^2}}{H}$$

Vereinfachung:

Atmosphärendicke H ist klein gegenüber Erdradius r_E : $H/r_E = 8.4/6370 = 0.0013 \ll 1$

$$AM = -\frac{r_E}{H} \cdot \left(\cos \beta_S - \sqrt{\cos^2(\beta_S) + \left(\frac{H}{r_E} + 1\right)^2} - 1 \right) \approx \frac{r_E}{H} \cdot \cos \beta_S \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\cos^2(\beta_S)} \cdot \frac{H}{r_E}} \right)$$

$$AM \approx \frac{r_E}{H} \cdot \cos \beta_S \cdot \left(-1 + 1 + \frac{1}{\cos^2(\beta_S)} \cdot \frac{H}{r_E} \right) = \frac{1}{\cos \beta_S}$$

$$AM \approx \frac{1}{\cos \beta_S} = \frac{1}{\sin \gamma_S}$$

$$\beta_S < 60^\circ$$

$$\beta_S = \frac{\pi}{2} - \gamma_S$$



R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Reduktionseinflüsse der Sonneneinstrahlung



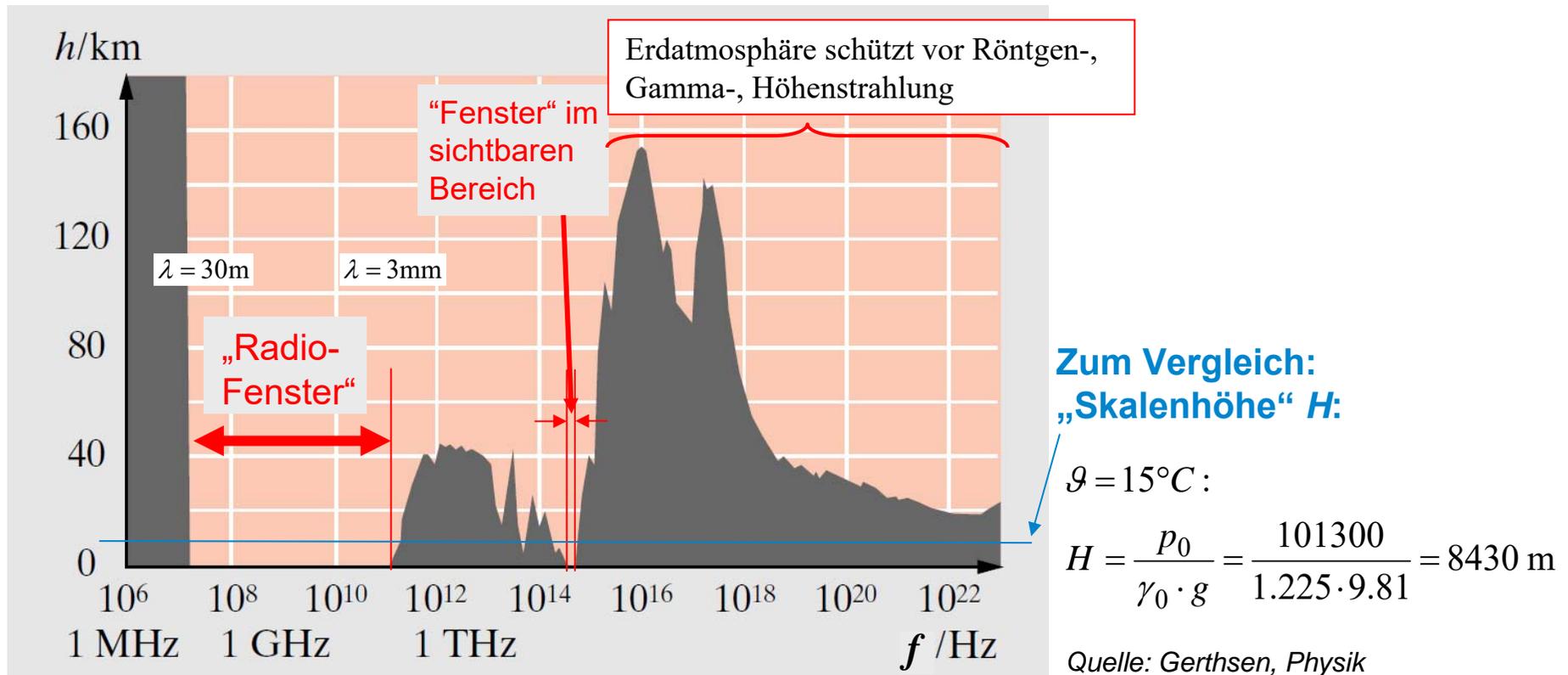
Reduktion um 30% der aus dem Weltall eintreffenden Strahlung in Normalrichtung durch kurzwellige Reflexion an Atmosphäre:

- Absorption u. Emission („Anregung“) der Moleküle O_3 , H_2O , O_2 , CO_2
- Streuung an Molekülen: *Rayleigh*-Streuung: $\lambda \approx 3 \mu\text{m} \gg d$ (Luftmoleküldurchmesser)
Deshalb erscheint der taghelle Himmel **blau**.
- Wasserdampf der Wolken:
 - a) *Mie*-Streuung: $\lambda \sim d$ (Wassertröpfchendurchmesser ca. $5 \mu\text{m}$ in Wolken)
Deshalb erscheinen die Wolken **weiß**.
 - b) Wolken-Wasserdampf absorbiert Strahlung.



R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Eindringtiefe der extraterrestrischen Strahlung in die Erdatmosphäre (2) – „50%-Höhe h “

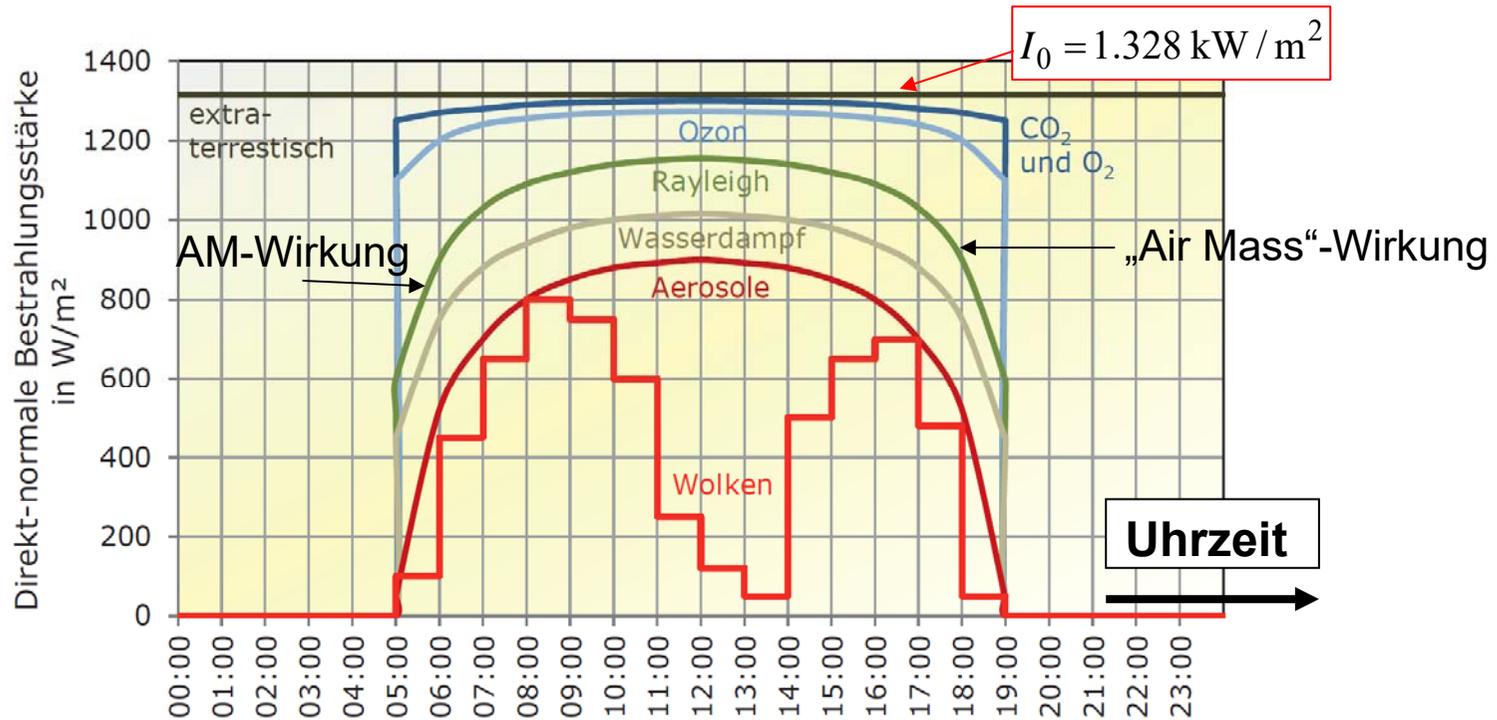


Gemessene spektrale Verteilung jener Höhe h über dem Erdboden, bis zu der die extraterrestrische Strahlung in die Erdatmosphäre eindringt und dabei noch 50% der einfallenden extraterrestrischen Strahlungsleistung (durch Absorption/Reflexion) aufweist

R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Reduktion durch die Atmosphäre (1)

- **Strahlungsreduktion durch die Atmosphäre** abhängig von
 - a) Distanz l , die das Licht durch die Atmosphäre zurücklegt und damit
 - b) vom Sonnenstand über dem Horizont: **Sonnenhöhenwinkel γ_S** .
- „**Air Mass**“ Faktor $AM \approx 1/\sin(\gamma_S)$ $\gamma_S > 30^\circ$

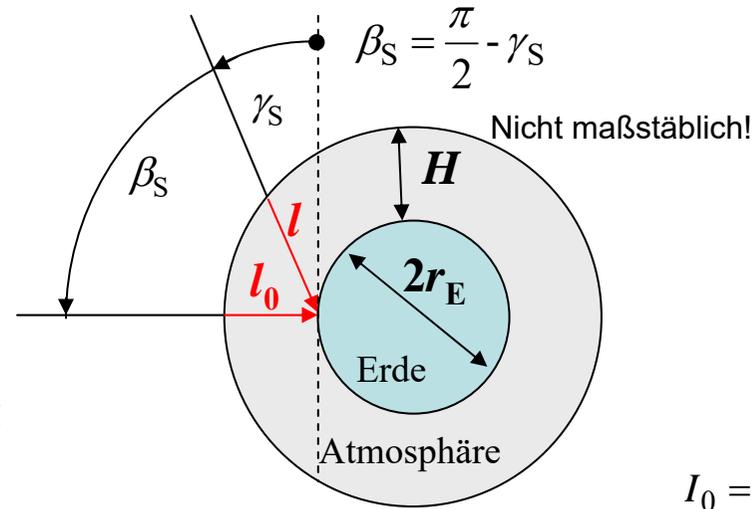


Quelle: V. Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme*

R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Reduktion durch die Atmosphäre (2)

$$AM = \frac{l}{l_0} \approx \frac{1}{\sin \gamma_S} \quad \gamma_S > 30^\circ$$



Bsp.: $\gamma_S = 90^\circ$:

$$(1 - 0.087) \cdot (1 - 0.094) \cdot (1 - 0.256) = 0.615$$

$$(I_0 - I) / I_0 = 1 - 0.615 = 0.385 = 38.5\%$$

$$I_0 = 1.328 \text{ kW/m}^2$$

γ_S	AM	Absorption	Rayleigh-Streuung	Mie-Streuung	Gesamt-schwächung	$\frac{I_0 - I}{I_0}$
90°	1,00	8,7 %	9,4 %	0 ... 25,6 %	17,3 ... 38,5 %	
60°	1,15	9,2 %	10,5 %	0,7 ... 29,5 %	19,4 ... 42,8 %	
30°	2,00	11,2 %	16,3 %	4,1 ... 44,9 %	28,8 ... 59,1 %	
10°	5,76	16,2 %	31,9 %	15,4 ... 74,3 %	51,8 ... 85,4 %	
5°	11,5	19,5 %	42,5 %	24,6 ... 86,5 %	65,1 ... 93,8 %	

Quelle: V. Quaschnig, Regenerative Energiesysteme

R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Einfallswinkel der Sonneneinstrahlung



Reduktion der Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche nicht nur durch die Sonnenposition, sondern auch durch den Einfallswinkel:

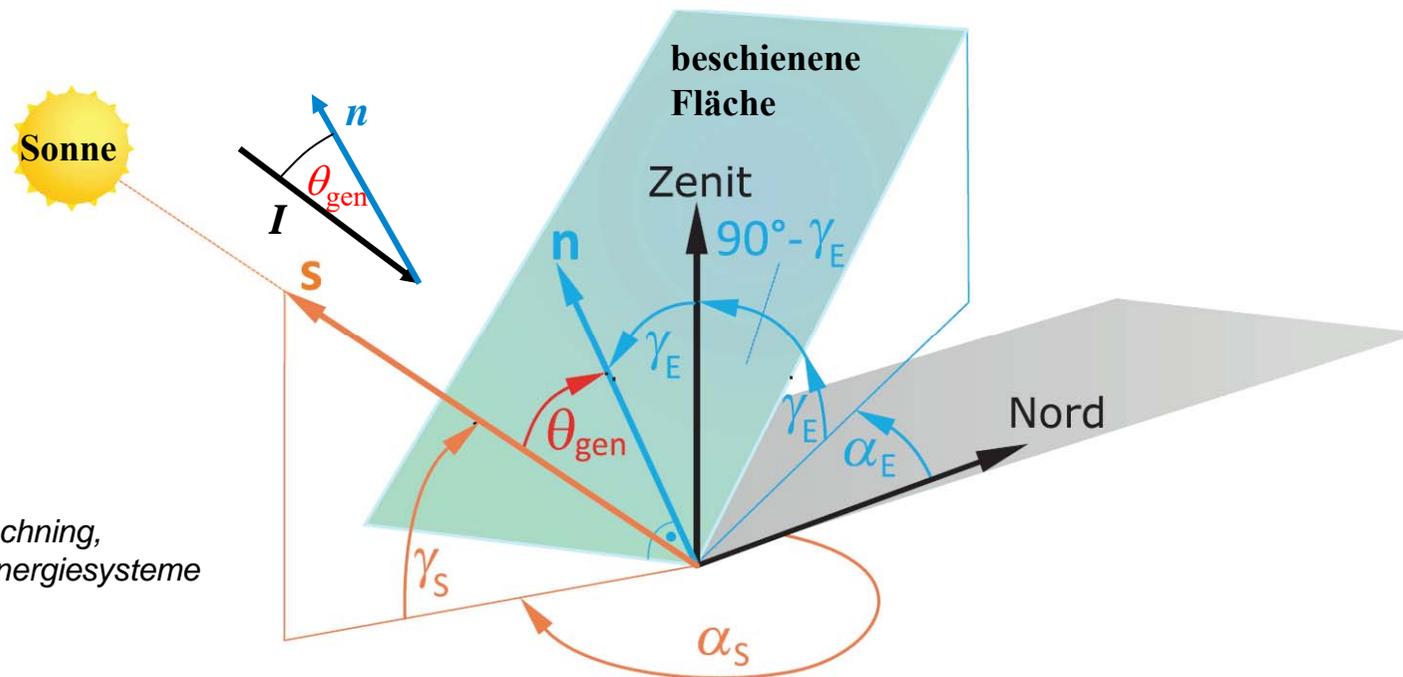
- Für Flächen, deren Normale nicht auf die Sonne gerichtet ist, ergibt sich eine entsprechende Verringerung der spezifischen Bestrahlungsstärke.
- Dies wird über geometrische Berechnungen erfasst.



R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Reduktion durch Strahlungseinfallswinkel θ_{gen}

- Beschienene Fläche: Orientierung dieser Fläche durch Normalenvektor n :
 - a) n geneigt zum Lot (Zenit): **Neigungswinkel** γ_E
 - b) **Flächenazimutwinkel** α_E zur Nordrichtung N
- **Sonnenlicht-Einfallswinkel** θ_{gen} : $\cos \theta_{\text{gen}} = -\cos \gamma_S \cdot \sin \gamma_E \cdot \cos(\alpha_S - \alpha_E) + \sin \gamma_S \cdot \cos \gamma_E$
- **Spezifische Bestrahlungsstärke** I_{gen} : $I_{\text{gen}} = I \cdot \cos \theta_{\text{gen}}$



R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Beispiel: Strahlungseinfallswinkel θ_{gen}

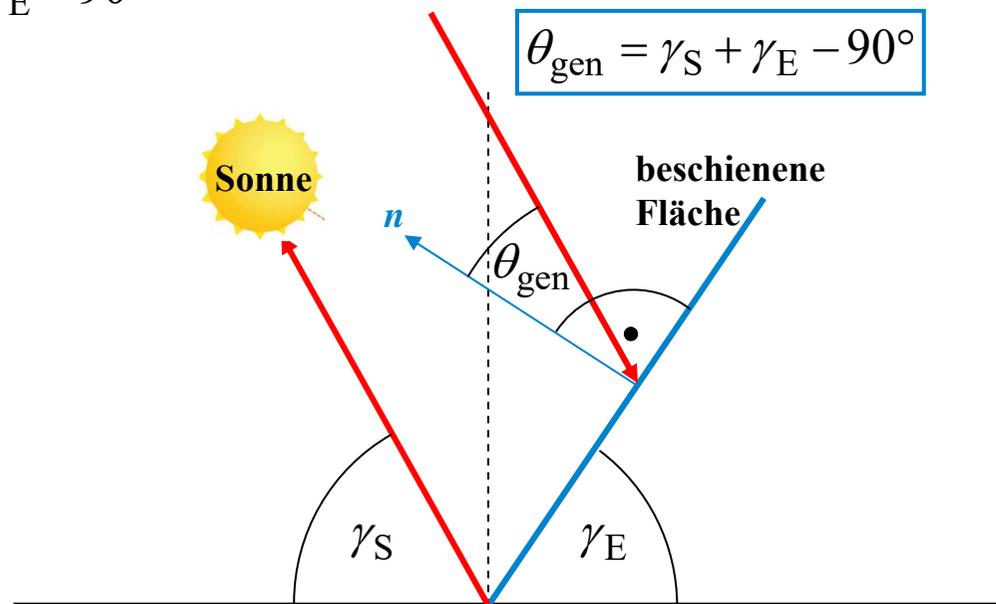


$$\cos \theta_{\text{gen}} = -\cos \gamma_S \cdot \sin \gamma_E \cdot \cos(\alpha_S - \alpha_E) + \sin \gamma_S \cdot \cos \gamma_E$$

- Ausrichtung der Fläche auf den Sonnenazimut: $\alpha_S - \alpha_E = 180^\circ$;
z. B.: 12.00 Mittags: Sonne im Süden: $\alpha_S = 180^\circ \rightarrow \alpha_E = 0^\circ$!

$$\cos \theta_{\text{gen}} = -\cos \gamma_S \cdot \sin \gamma_E \cdot \cos 0 + \sin \gamma_S \cdot \cos \gamma_E = \cos(\gamma_S + \gamma_E - 90^\circ)$$

$$\theta_{\text{gen}} = \gamma_S + \gamma_E - 90^\circ$$



R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Beispiel: In unseren Breiten: θ_{gen}



$$I_{\text{gen}} / I = \cos \theta_{\text{gen}} = -\cos \gamma_{\text{S}} \cdot \sin \gamma_{\text{E}} \cdot \cos(\alpha_{\text{S}} - \alpha_{\text{E}}) + \sin \gamma_{\text{S}} \cdot \cos \gamma_{\text{E}}$$

- 48° nördlicher Breite: 24.6.: Sonne am Höchststand:

Mit der „Schiefe“ der Ekliptik 23.4° ergibt dies $\gamma_{\text{S}} = 90^\circ - (48^\circ - 23.4^\circ) = 65.4^\circ$

- Sonnenkollektorfläche geneigt: $\gamma_{\text{E}} = 45^\circ$
- Bei Ausrichtung der Fläche auf den Sonnenazimut $\alpha_{\text{S}} - \alpha_{\text{E}} = 180^\circ$:

$$\cos \theta_{\text{gen}} = \cos(\gamma_{\text{S}} + \gamma_{\text{E}} - 90^\circ) = \cos(\underbrace{65.4^\circ + 45^\circ - 90^\circ}_{\theta_{\text{gen}} = 20.4^\circ}) = 0.94$$

$$I_{\text{gen}} / I = 0.94$$



R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Gemessene Sonneneinstrahlung

Beispiel:

Standort *Wien, Österreich*, 48° nördliche geographische Breite:

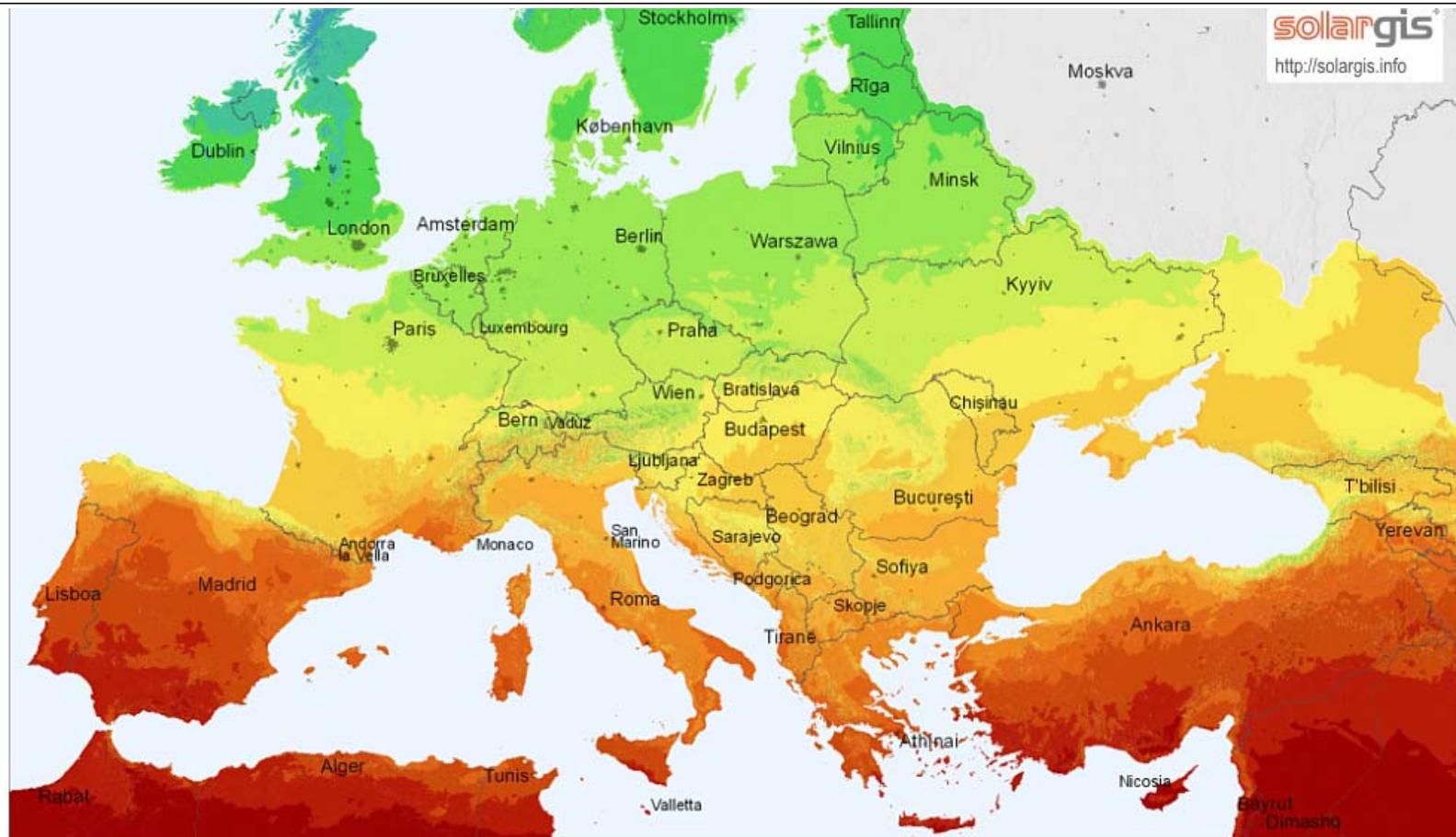
- Astronomisch mögliche jährliche Sonnenscheindauer:
4470 h/a bzw. 51% eines Jahres.
- Gemessene jährliche mittlere Sonnenscheindauer (Mittel über 80 Jahre):
Verringerung durch Wolken- u. Nebelbildung:
 $T' = 1889$ h/a (21.5% eines Jahres 8760 h)
- Gemessene jährliche mittlere Sonneneinstrahlung $W/A = w = 1124$ kWh/(m²·a) ⇒
⇒ flächenbezogene Strahlungsleistung im langjährigen Jahresmittel:

$$\bar{I} = w / T' = 1124 / 1889 = 0.6 \text{ kW/m}^2 \quad \boxed{45\% \text{ von } I_0}$$

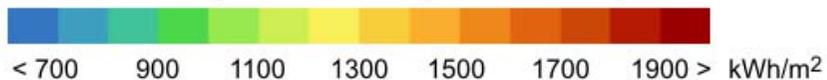
$$\boxed{I_0 = 1.328 \text{ kW/m}^2}$$

R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Gemessene terrestrische globale Sonneneinstrahlung w



Durchschnittliche jährliche Summe (4/2004 - 3/2010)



0 250 500 km

© 2011 GeoModel Solar s.r.o.



R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Nutzung der Sonneneinstrahlung



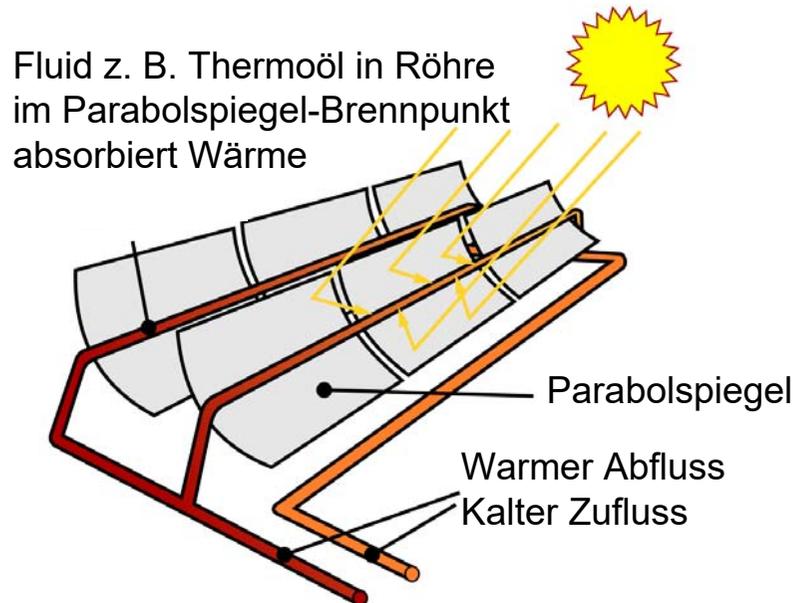
- **Solarthermie:** Direkte Wärmenutzung z. B. Erwärmung von Wasser
Meist **Haushaltsanwendung:** a) Thermische Flachkollektoren,
b) Vakuumröhren-Kollektoren,
- **Solarthermisch-elektrisch:** Wärmenutzung zur Verdampfung eines Fluids z. B. Wasser, Dampfturbinen treiben el. Generatoren.
Meist **Großkraftwerke** als **Concentrated Solar Power (CSP):**
a) Spiegel-Konzentratoren auf zentralen Turm,
b) Parabolspiegel mit Fluidrinnen,
- **Photovoltaik:** siehe Kap. T
Direktumwandlung der Sonneneinstrahlung in el. Energie in Solarzellen
a) **Großkraftwerke:** Tw. mit nachführbaren Solarpaneelen
b) **Haushaltsanwendung:** Fest installierte PV-Module



R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

CSP: Parabolrinnenkraftwerk

Quelle: RWE Renewables GmbH



Quelle: Wikipedia.de

Fluiderhitzung bis 150 ... 350°C,
bis zu 500 °C möglich



Andasol III, Spanien, 50 MW_{el}, 500 000 m²

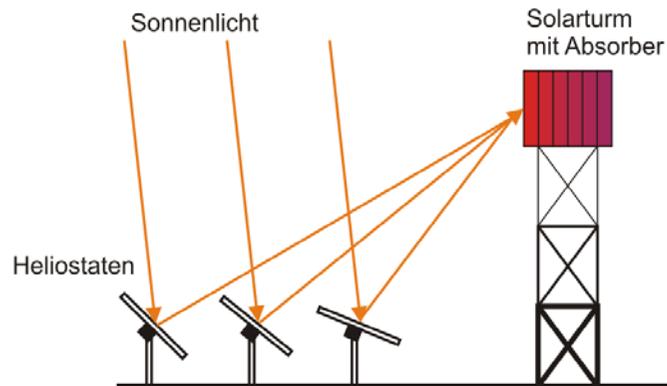
3700 Volllaststunden, Thermoöl, Wasserdampf-Turbinen,
Salzgemisch-Wärmespeicher (28500 t) für den Nachtbetrieb
(7 h für 50 MW_{el})

Max. Wirkungsgrad 28%, im Jahresmittel 15%

Bisher nur wenige Großkraftwerke im Einsatz; großer Flächenbedarf; Speicher zusätzlich erwünscht

R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

CSP: Solarturmkraftwerk



Quelle: Wikipedia.de

Dem Sonnenstand nachgeführte Spiegel (Heliostate) konzentrieren das Sonnenlicht auf den Turm, wo Salz geschmolzen wird. Über einen Wärmetauscher wird Wasser verdampft, das einen Dampfturbinen-Generator-Satz antreibt.

Fluid erhitzt bis 1300°C technisch erprobt („Sonnenöfen“)



Cerro Dominador, Atacama-Wüste, Chile, $1\,500\,000\text{ m}^2$

a) Innen: CSP: Heliostate u. Sonnenturm (252 m), $110\text{ MW}_{\text{el}}$

b) Außen: Photovoltaik 100 MWp

Salzgemisch-Wärmespeicher (45000 t) für Nachtbetrieb: 17.5 h

Bisher nur wenige Großkraftwerke im Einsatz; großer Flächenbedarf; Speicher durch das Salz gegeben

R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde Photovoltaik vs. Solarthermie (1)

Beispiel: Energiebedarf in einem *deutschen* Haushalt:

- 4-Personen-Haushalt, 120 m² Wohnfläche,
- mittlere Heizenergie: 150 kWh/(m²·a)
 - 75 Liter 50°C-Warmwasser/Person&Tag,
 - el. Energie 3500 kWh/a

a) Energie für Warmwasser: $V_{\text{H}_2\text{O}} = 75 \cdot 4 \cdot 365 = 109.5 \text{ m}^3/\text{a}$

$$20^\circ\text{C} \rightarrow 50^\circ\text{C} : \Delta\vartheta = 30\text{K} : W_{\text{H}_2\text{O}} = 109.5 \cdot 1000 \cdot 4187 \cdot 30 / (8760 \cdot 3600) = 3.8 \text{ MWh/a}$$

b) Heizungsenergie: $W_{\text{H}} = 150 \cdot 120 = 18 \text{ MWh/a}$

c) Elektrische Energie: $W_{\text{e}} = 3.5 \text{ MWh/a}$

R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde Photovoltaik vs. Solarthermie (2)

- Mittlere Sonnenscheindauer 1890 h/a, mittlere solare Einstrahlung 600 W/m² :

A) Photovoltaik-Anlage: $\eta = 0.15$ (inkl. Wechselrichter, Li-Ionen-Speicher): Modulfläche $A = ?$

$$q = 600 \cdot 0.15 \cdot 1890 = 170 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \Rightarrow A = W_e / q = 3500 / 170 = 20 \text{ m}^2$$

$$W_e = 3.5 \text{ MWh/a}$$

B) Solarthermie: $\eta_K = 0.6$ (hochwertige Vakuumröhren), $\eta = 0.9$ (Wärmetauscher, Rohre):
 W_S bei **gleicher Kollektor-Fläche A** für Nutzung mit Wärmespeicher:

$$q = 600 \cdot 0.6 \cdot 0.9 \cdot 1890 = 612 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \Rightarrow W_S = q \cdot A = 612 \cdot 20 = 12.2 \text{ MWh/a}$$

$$W_S = 12.2 \text{ MWh/a}$$

- Solarer Deckungsbeitrag: 56%

(„typische“ Obergrenze für unsere Breiten)

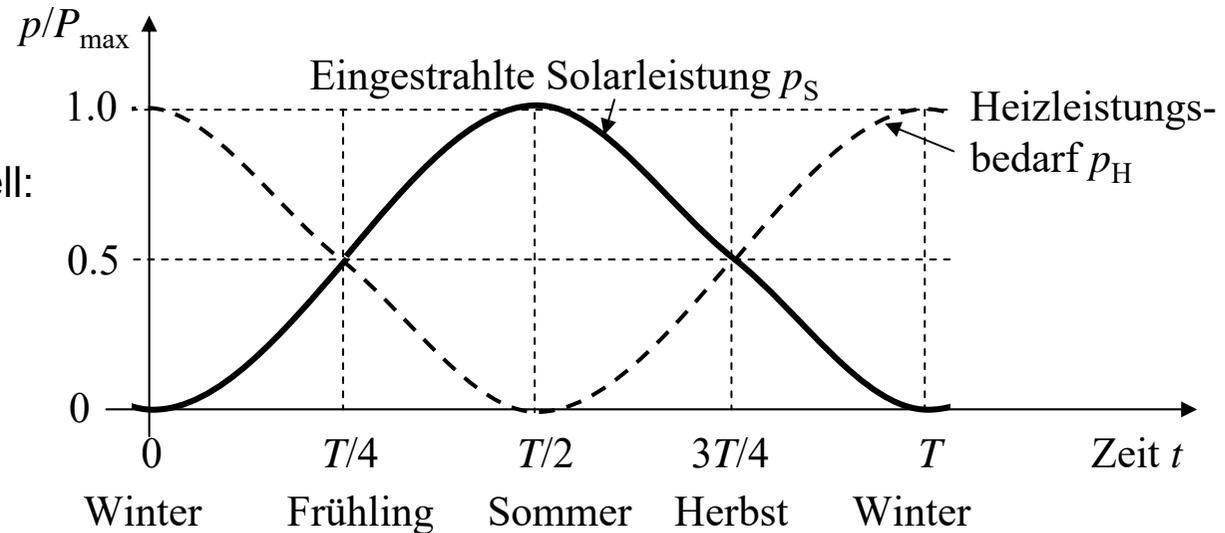
$$\frac{W_S}{W_{\text{H}_2\text{O}} + W_H} = \frac{12.2 \text{ MWh/a}}{(3.8 + 18) \text{ MWh/a}} = 0.56$$

ABER: Großer Wärmespeicher nötig !

R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Beispiel: Jahres-Wärmespeicher

- Einfaches Jahres-Modell:
 $T = 1$ Jahr



- Annahmen:

- Solarleistung und Heizleistung: $p_S(t) = \frac{P_{\max}}{2} \cdot (1 - \cos(\frac{2\pi \cdot t}{T}))$ $p_H(t) = \frac{P_{\max}}{2} \cdot (1 + \cos(\frac{2\pi \cdot t}{T}))$

- Solarenergie = Heizenergie: $W_S = \int_0^T p_S \cdot dt = \frac{P_{\max} \cdot T}{2} = W_H = \int_0^T p_H \cdot dt$

- Erforderliche Speicherenergie: $W_{Sp} = \int_0^T (p_S - p_H) \cdot dt = \frac{P_{\max} \cdot T}{\pi}$ $W_{Sp} = \frac{2 \cdot W_S}{\pi} \approx 0.62 \cdot W_{Sp}$

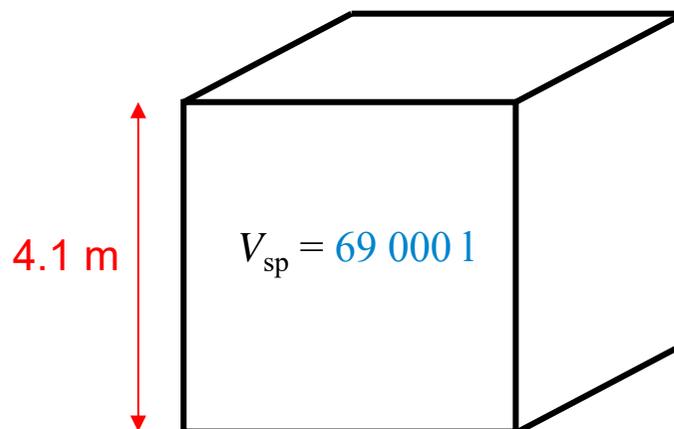
R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Beispiel: Wärmespeicher für Solarthermie

- $W_S = 12.2$ MWh/a: Werden überwiegend in der Zeit von April bis September erzeugt, ABER von Oktober ... März („Heizperiode“) benötigt !
- Speicherung von z. B. 62% von $(12.2 - 3.8)$ MWh \rightarrow 5.2 MWh mit 90°C Heißwasserspeicher
- Aufheizen von Wasser (25°C) u. speichern: Speichervolumen $V_{sp} = ?$:

$$\Delta Q = 5.2 \text{ MWh} = V_{sp} \cdot 1000 \cdot 4187 \cdot (90 - 25) \text{ J} \Rightarrow V_{sp} = 69 \text{ m}^3$$

Es werden $V_{sp} = 69\,000$ Liter als Heißwasserspeicher benötigt (ohne Berücksichtigung von Wärmeverlusten!) $V_{sp} = L^3 \Rightarrow L = 4.1 \text{ m}$



ABER:
Übliche Speichertemperaturen nur 65°C
(kein Ausfällen von Kalk) \Rightarrow
größeres Speichervolumen nötig!

R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Beispiel: Solarthermie und Wärmedämmung



Zweifamilienhaus (zwei Geschosse und Dachausbau, je 75 m² Grundfläche)

A) Ohne Wärmedämmung, ohne Solarthermie:

Therm. Jahresenergiebedarf (inkl. Warmwasser) mit Erdgasheizung:
40 000 kWh (⇔ 178 kWh/(m²a))

B) Mit Wärmedämmung, mit 10 m² Vakuumröhren-Solarkollektoren, 850 Liter-Wasserspeicher, Erdgasheizung mit Brennwert-Kessel:

Thermischer Jahresenergiebedarf (Erdgasheizung): 16 000 kWh (Messwert)

Einsparung: $1 - \frac{16000}{40000} = 60\%$

Aber:

Investitionskosten **deutlich höher** als für eine Photovoltaik (PV)-Anlage,
so dass viele Privathaushalte diese Ausgaben trotz einer gewissen staatl. Förderung scheuen!



R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Energienutzung in *deutschen* Haushalten



• Raumwärme	68%	} Großes Energieeinsparungs-Potential: - Solarthermie, Wärmedämmung, ...
• Warmwasser	16%	
• Wärme f. Kochen, Waschen	6%	
• Kühlen & Gefrieren	4%	
• Computer, TV, Radio, Telefon	3%	
• Beleuchtung	2%	
• Mech. Energie (Bohren, Sägen ...)	1%	
<hr/>		
Summe (2019): 666 TWh	100%	Quelle: Umweltbundesamt, D

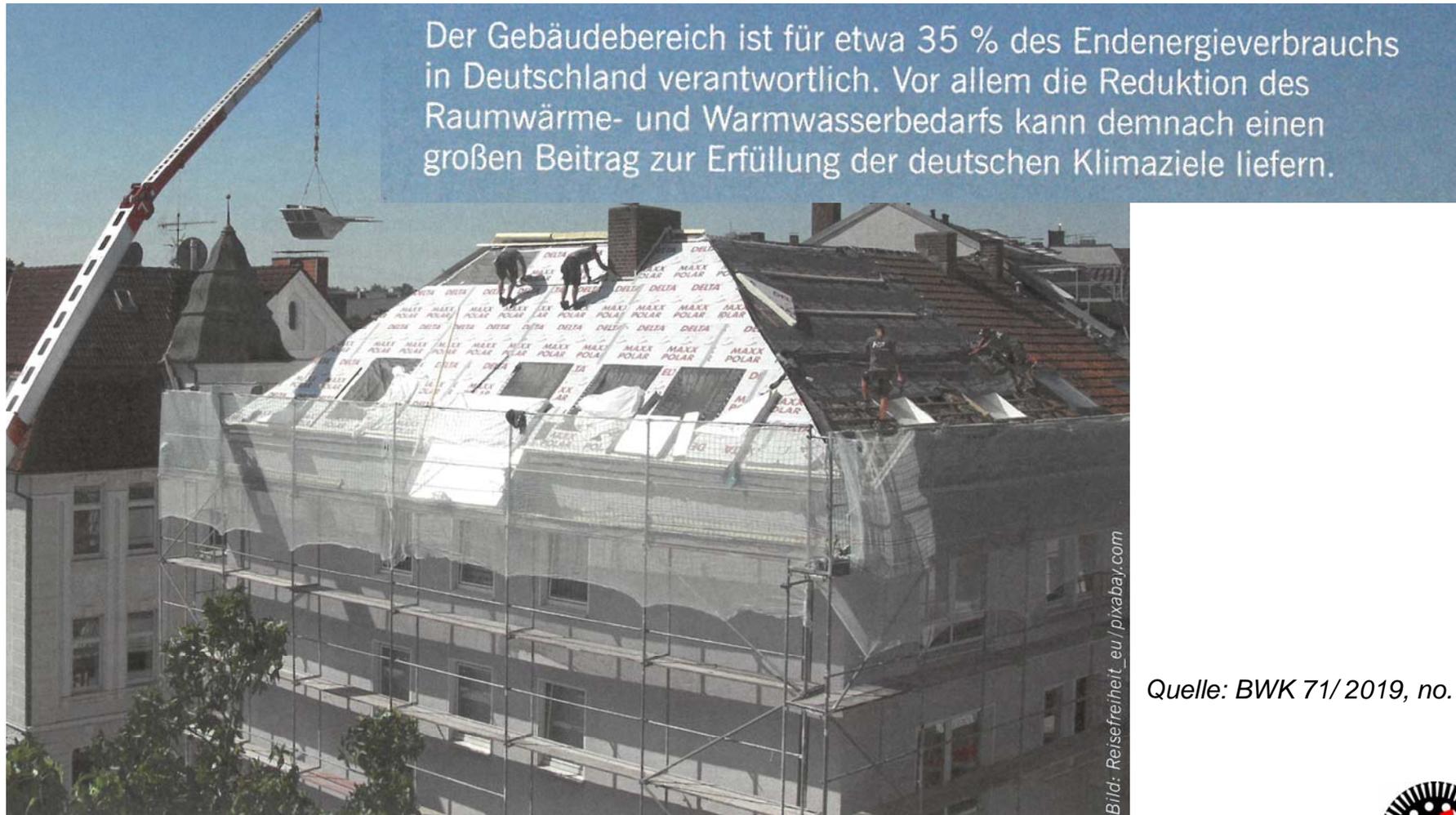
Wärmewirtschaft: **Raumwärme:** ca. 35% des Primärenergieverbrauchs,
Gebäudebestand 3.8 Mrd. m² Nutzfläche,
Häusersanierungsrate z. Zt. nur 1% des Bestands p.a. (Dämmung, ...)

Quelle: Riedle, K.: Effiziente Energiewende, VDI-nachrichten, 14/15, 2017



R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Deutschland: „Wärme“-Wende



Quelle: *BWK 71/2019, no. 6*

R2.4 Sonnenstrahlung auf der Erde

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Beispiel: Erstellung der Energiebilanz von Gebäuden

- Primärenergiefaktor $f_{p,tot}$: Notwendiger primärenergetischer Aufwand W_{PE} (J) zur Bereitstellung der Endenergie W_{EE} (J) am Einsatzort (= Gebäude): (Förderung, Aufbereitung, Umwandlung, Transport, Verteilung d. Endenergie)

$$f_{p,tot} = W_{PE} / W_{EE} \geq 1$$

$$f_{p,tot} = f_{p,nren} + f_{p,ren}$$

- $f_{p,nren}$ bzw. $f_{p,ren}$: Aufwand aus nicht erneuerbarer bzw. erneuerbarer Energie
- Für die Bilanzerstellung festgelegte Werte für *Deutschland*: DIN V 18599-1

		$f_{p,tot}$	$f_{p,nren}$
Fossile Brennstoffe	Heizöl, Erdgas, Steinkohle	1.1	1.1
	Braunkohle	1.2	1.2
Biogene Brennstoffe	Biogas, Bioöl	1.5	0.5
	Holz	1.2	0.2
Nah-/Fernwärme aus 70% Kraft-Wärme-Kopplung	Fossiler Brennstoff	0.7	0.7
	Erneuerbarer Brennstoff	0.7	0
Elektrischer Strom	Strommix 2016	2.8	1.8
„Umwelt-Energie“	Solarenergie, Erd-/Luftwärme	1	0

Quelle: Wiss. Dienst des Bundestags WD 5-3000-103/16 9.12.2016



R Ressourcen

R2. Sonnenenergie



Zusammenfassung

- Extraterrestrische Sonneneinstrahlung p.a. ca. 8760-facher Weltenergiebedarf p.a.:
 - 30% davon direkt reflektiert
 - 25% treiben Wasserkreislauf, Winde, Meeresströmung, Biokreislauf an
 - 45% werden gespeichert (Bodenwärme) und langwellig (Infrarot) abgestrahlt
- Sonnenalter ca. 4.6 Milliarden Jahre
- Sonnenleucht-“Restlebensdauer“ ca. $12.5 - 4.6 = 7.9$ Milliarden Jahre
- Sonneneinstrahlung auf der Erdoberfläche:
Lageabhängige Verringerung auf ca. 45% in unseren Breiten



R Ressourcen

R3 Wasserkraft



1. **Energieträger: Reserven und Ressourcen**
2. **Sonnenenergie**
3. **Wasserkraft**
4. **Windkraft**
5. **Meeresenergie**
6. **Erdöl**
7. **Erdgas**
8. **Steinkohle**
9. **Braunkohle**
10. **Kernbrennstoffe**
11. **Erdwärme**
12. **Biomasse**
13. **Energieströme**



R3 Wasserkraft

Übersicht



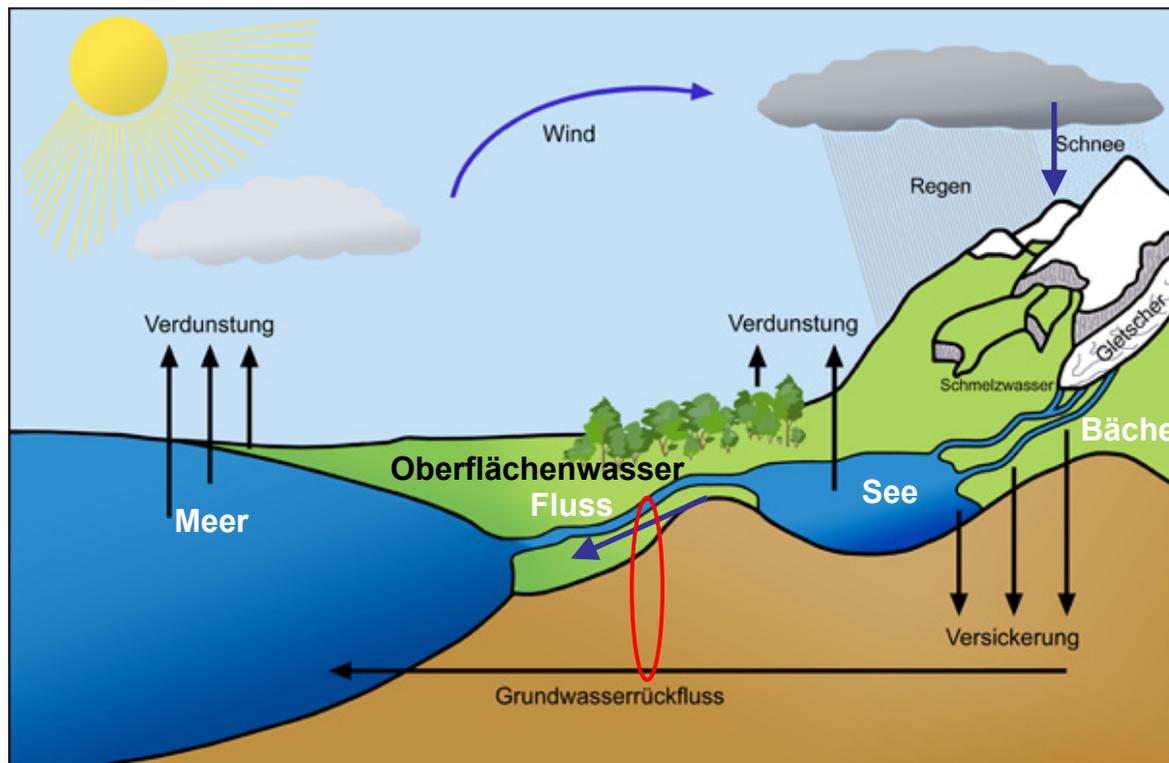
1. Wasserkreislauf
2. Wasserkraftwerke
3. Historisches Beispiel
4. Wasserkraftnutzung



R3 Wasserkraft

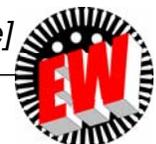
R3.1 Prinzip des Wasserkreislaufs

- **Oberflächenwasser verdunstet** durch die Einwirkung der Sonnenstrahlung \Rightarrow Wasserdampf
- Wasserdampf in der Luft kondensiert (Unterschreiten des Taupunkts) \Rightarrow **Wolkenbildung**
- Gesättigter Wasserdampf \Rightarrow **Abregnen** und **Versickern**: Oberflächen- und Grundwasser
- Nach dem Regen fließt das Wasser in **Bächen** und **Flüssen** in die Weltmeere



Sonnenstrahlung:
22.1% ($= 1.23 \cdot 10^{24}$ J/a) für
Verdunstung u. Niederschlag
0.003% ($= 1.6 \cdot 10^{20}$ J/a) für
Laufwasser

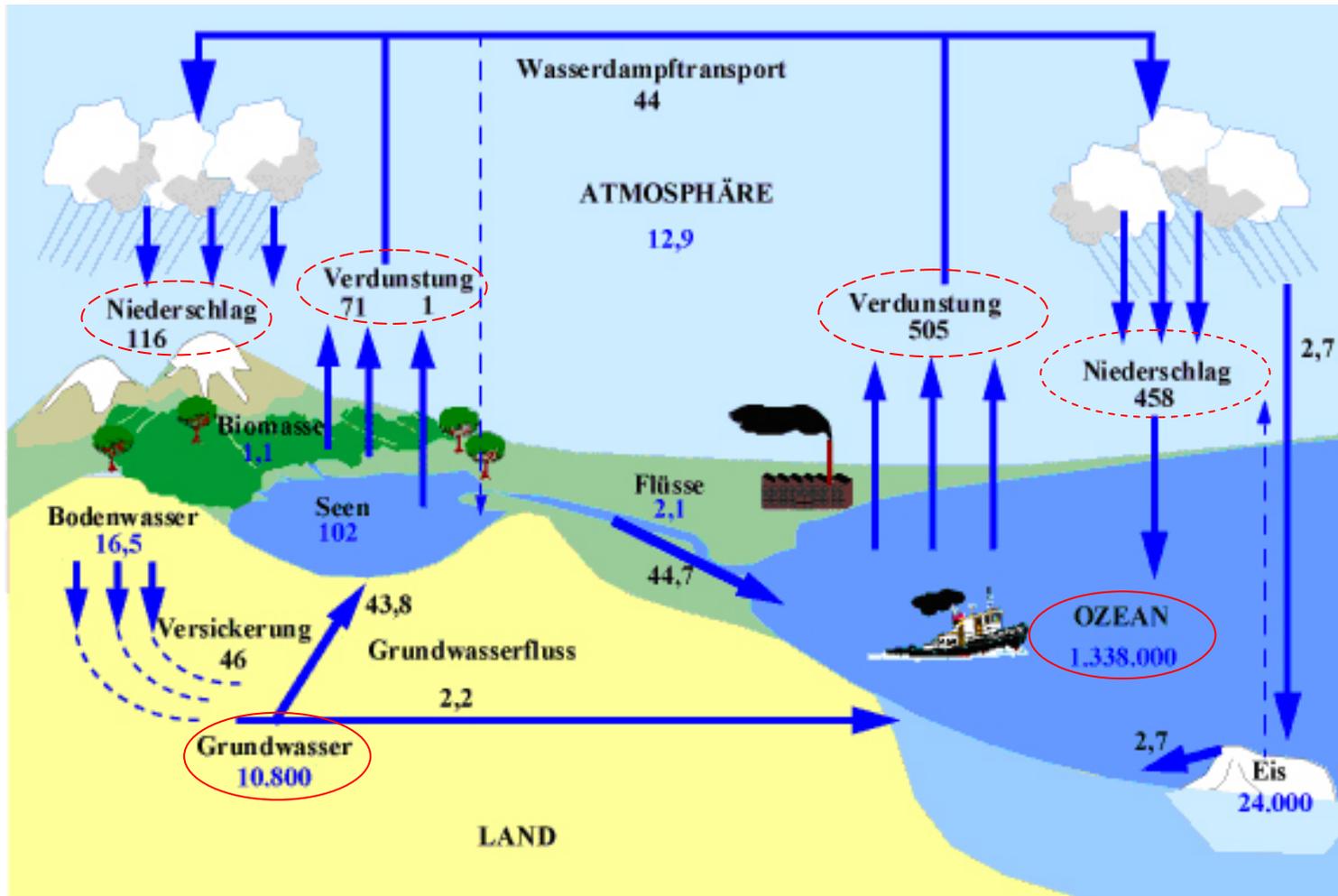
Quelle: www3.hhu.de [online]



R3.1 Wasserkreislauf

Globaler Wasserkreislauf

Ergänzung



Wasserreservoir
(blaue Ziffern)
Einheit: 1000 km³

Flüsse, ...
(schwarze Ziffern)
Einheit:
1000 km³/Jahr

Quelle: Hamburger
Bildungsserver HBS

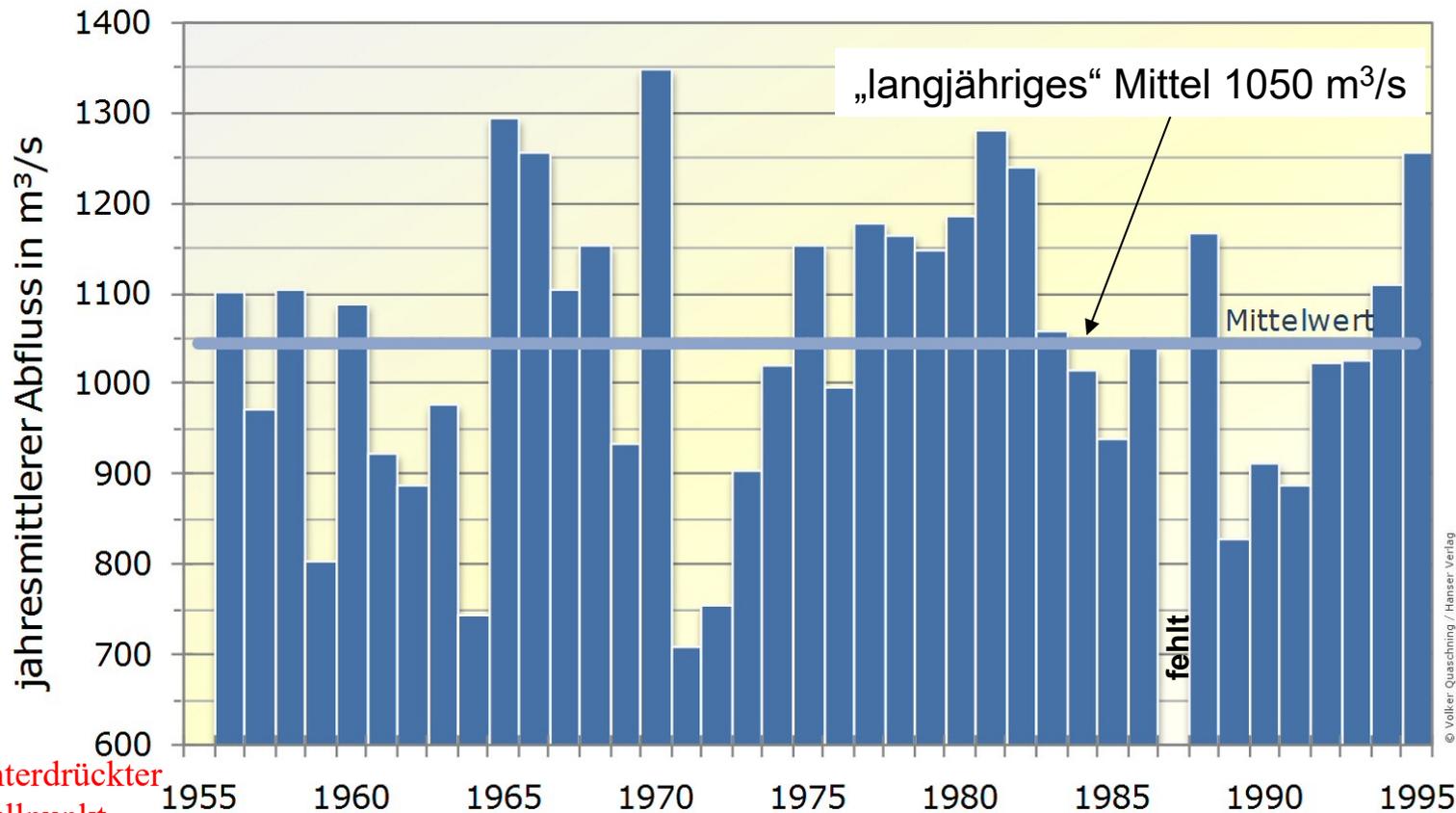
Daten:
Wiss. Beirat der
Bundesregierung
Globale Umwelt-
veränderung
(WBGU): 1997, Berlin



R3.1 Wasserkreislauf

Volatilität des jährlichen Wasserdargebots

Mittlerer Abfluss des *Rheins*, gemittelt über ein Jahr, Messort *KW Rheinfelden*, 1956 ... 2013:
Es gibt wasserreiche und wasserarme Jahre: „Spreizung“ um Faktor 2!



Quelle:
Quaschnig, V.:
Regen. Energien,
Datenbasis aus:
LGRP, LUBW,
BAFU14

© Voller Quaschnig / Hanser Verlag
Regenerative Energiesysteme

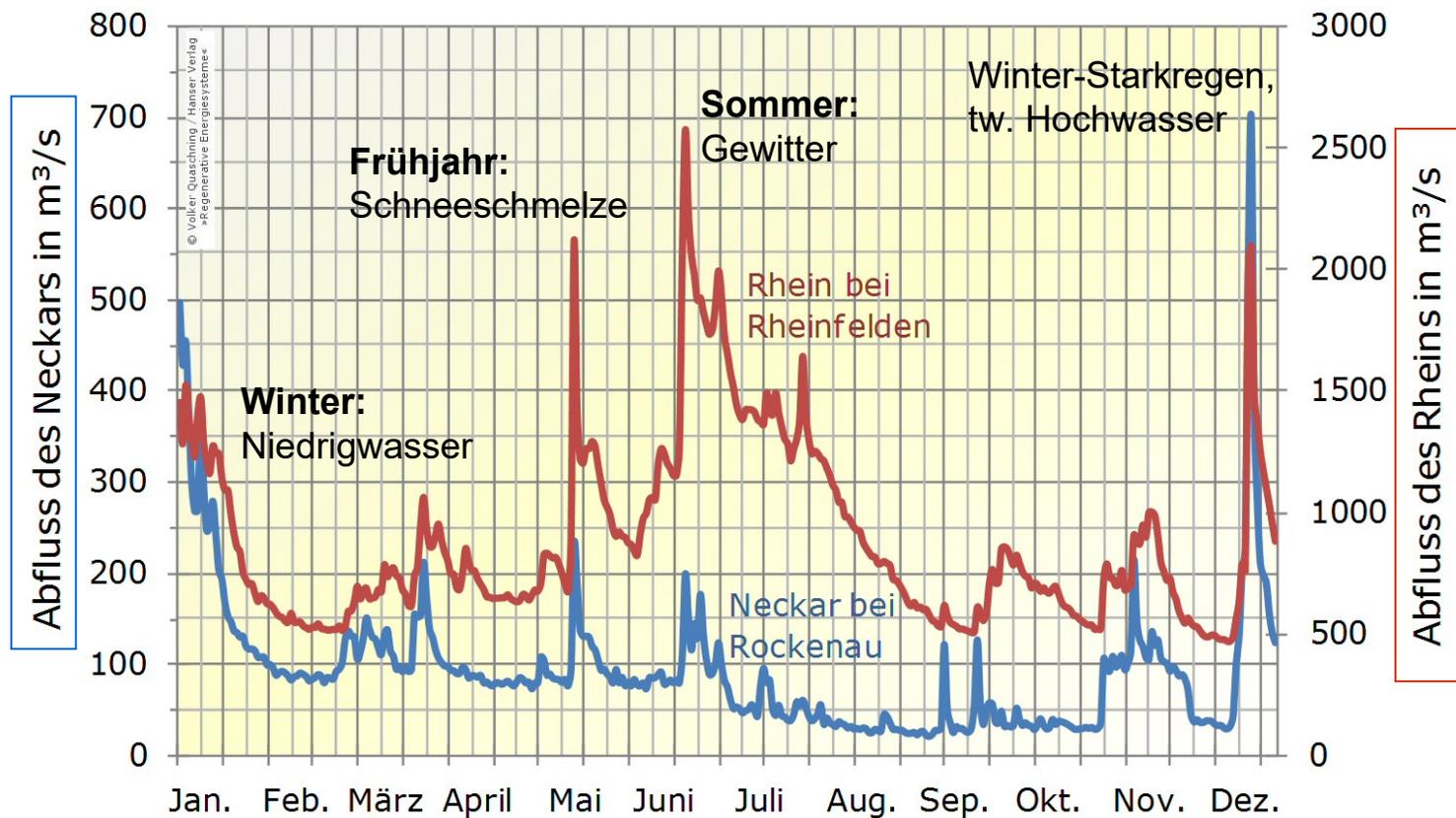
Unterdrückter
Nullpunkt



R3.1 Wasserkreislauf

Volatilität des Wasserdargebots im Jahr

1991: Tagesgemittelter Abfluss des a) **Rheins**, Messort **KW Rheinfelden**
b) **Neckars**, Messort **Rockenau-Eberbach**



Quelle:
Quaschnig, V.:
Regen. Energien,
Datenbasis aus:
LUBW

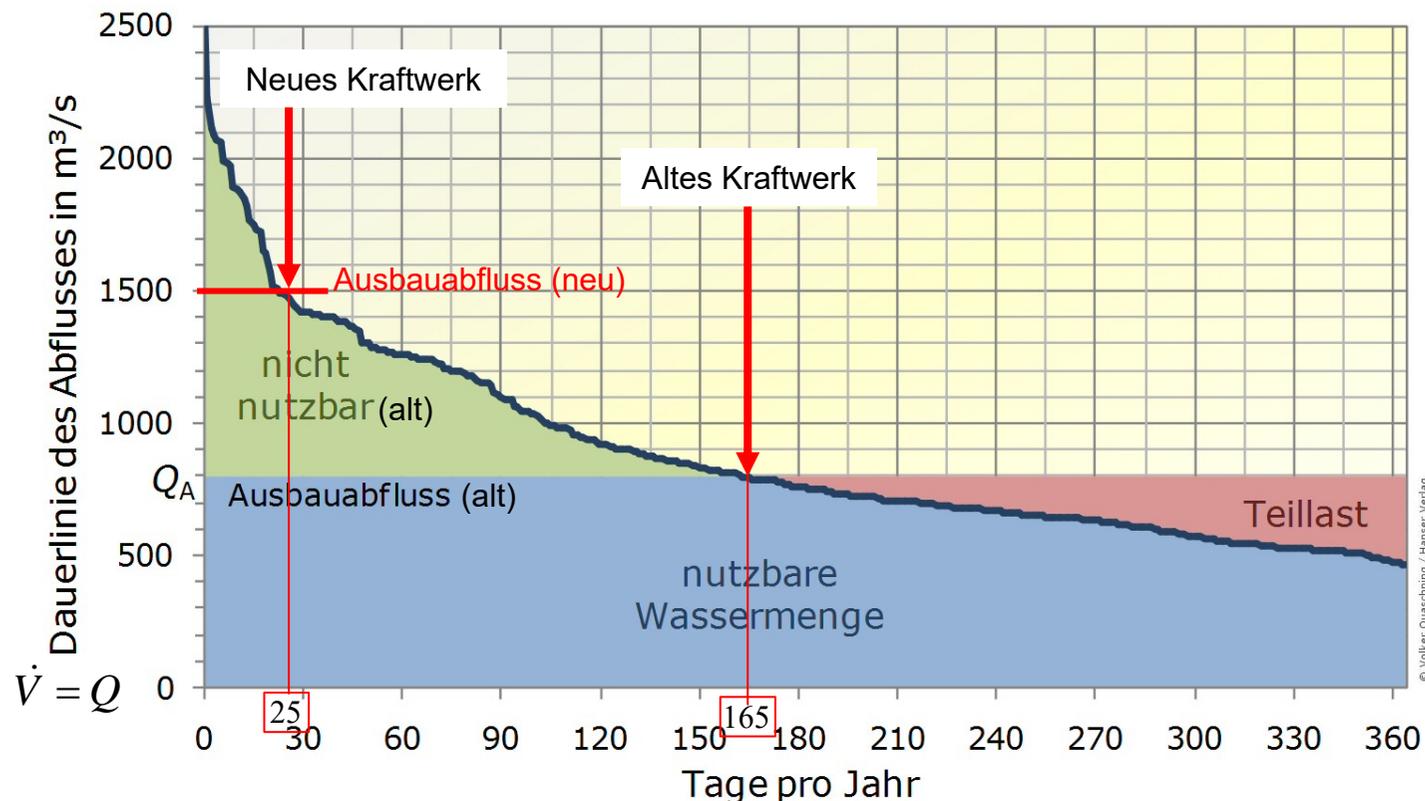
R3.1 Wasserkreislauf

Jahresdauerlinie des Rheins bei Rheinfelden



Der pro Tag gemittelte Abfluss wird für $\dot{V}_{\min} \dots \dot{V}_{\max}$ nach Tagen geordnet, wo eine bestimmte Abflussmenge \dot{V} überschritten wird. Mittelwertbildung über mehrere Jahre!

Es wird jener **Ausbauabfluss** $\dot{V}_N = Q_A$ festgelegt, für den ein Kraftwerk bemessen wird, so dass es **wirtschaftlich** betrieben werden kann!



Quelle:
 Quaschnig, V.:
 Regen. Energien,
 Datenbasis aus:
 LGRP, LUBW,
 BAFU14



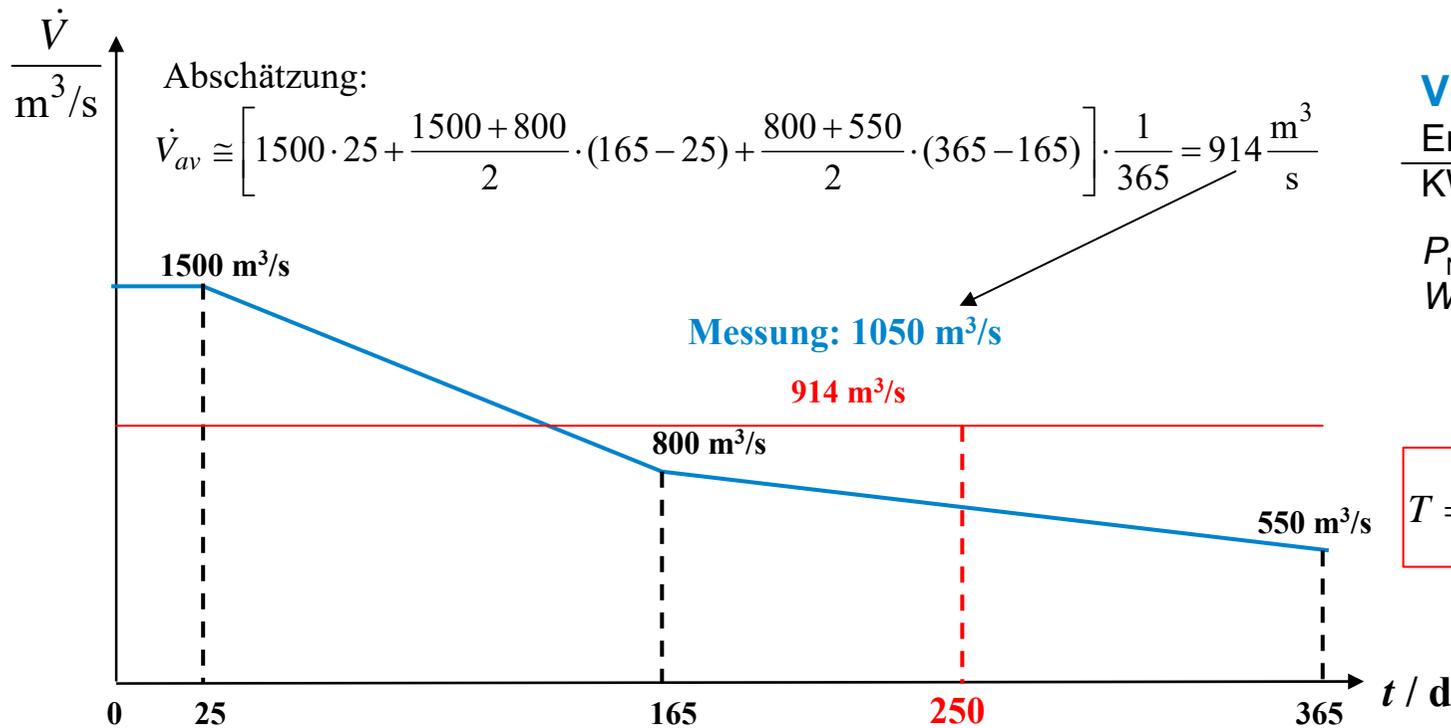
R3.1 Wasserkreislauf

Beispiel: Neues Kraftwerk Rheinfelden 100 MW



- Nenndurchfluss $\dot{V}_N = Q_A = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, Stauhöhe $H = 9.1 \text{ m}$, Nennleistung: 100 MW

$$P[\text{kW}] \approx 8 \cdot \dot{V}_N [\text{m}^3/\text{s}] \cdot H[\text{m}] = 109 \text{ MW}$$
- Mittlerer Jahresdurchfluss ca. $1050 \text{ m}^3/\text{s}$: $P_{av} = P \cdot \dot{V}_{av} / \dot{V}_N = 109 \cdot 1050 / 1500 = 76.3 \text{ MW}$
- Energie/Jahr: $W = P_{av} \cdot T_a = 76.3 \text{ MW} \cdot 8760 \text{ h} = 668 \text{ Mio. kWh}$ Offizielle Angabe: 600 Mio. kWh



Volllast-Stunden T:

$$\frac{\text{Energie/Jahr}}{\text{KW-Nennleistung}}$$

$$P_N = 100 \text{ MW},$$

$$W = 600 \text{ GWh/a}$$

$$T = \frac{W}{P_N}$$

$$T = \frac{600 \cdot 10^9}{100 \cdot 10^6} = 6000 \text{ h}$$

$$T = 250 \text{ d}$$



R3 Wasserkraft

R3.2 Wasserkraftwerke

- **Wasserkraftwerk - Wandlungsprinzip:**

Umwandlung **potentieller Energie** des **gestauten Wassers** in **elektrische Energie** (Generator)

- **Mit Staudamm:** KURZER Weg vom Oberwasser (OW) zum Unterwasser (UW) =
= geringe Strömungsreibungsverluste!
- **Ohne Staudamm:** LANGER Weg vom OW zum UW bei gleicher Stauhöhe H =
= sehr hohe Strömungsreibungsverluste = kein Energiegewinn!



R3 Wasserkraft

R3.2 Wasserkraftwerke

- **Energiewandlungskette:**

Gestautes Wasser (Stauhöhe H) \Rightarrow Ausflussformel $v = \sqrt{2gH}$ \Rightarrow Strömendes Wasser \Rightarrow
 \Rightarrow Wasserturbine (Rotationsbewegung) \Rightarrow direkt oder über Getriebe
(Getriebe meist bei Kleinkraftwerken) Antreiben eines el. Generators \Rightarrow
 \Rightarrow Wandlung von mechanischer Rotationsenergie in **elektrische Energie**

- a) **Stauanlage mit Wehr:**

Hält Wasser im Stauraum (Höhe H) auf potentielltem Energieniveau W_p

- b) **Rohrleitung: (Querschnitt A)**

Umwandlung der **potentiellen** Energie in die **Bewegungsenergie**
des abfließenden Wassers (*Bernoulli*-Gleichung, Ausflussformel) $\rightarrow \dot{V} = v \cdot A$

- c) **Turbine-Generatorsatz:** Auf einer Welle (oder mit Getriebe)

- d) **Umspannwerk:**

Niedrige Generatorspannung / **hoher** Strom wird transformiert auf **hohe** Spannung /
niedriger Strom zum **verlustarmen** Energietransport im Mittel- oder Hochspannungsnetz.

R3.2 Wasserkraftwerke

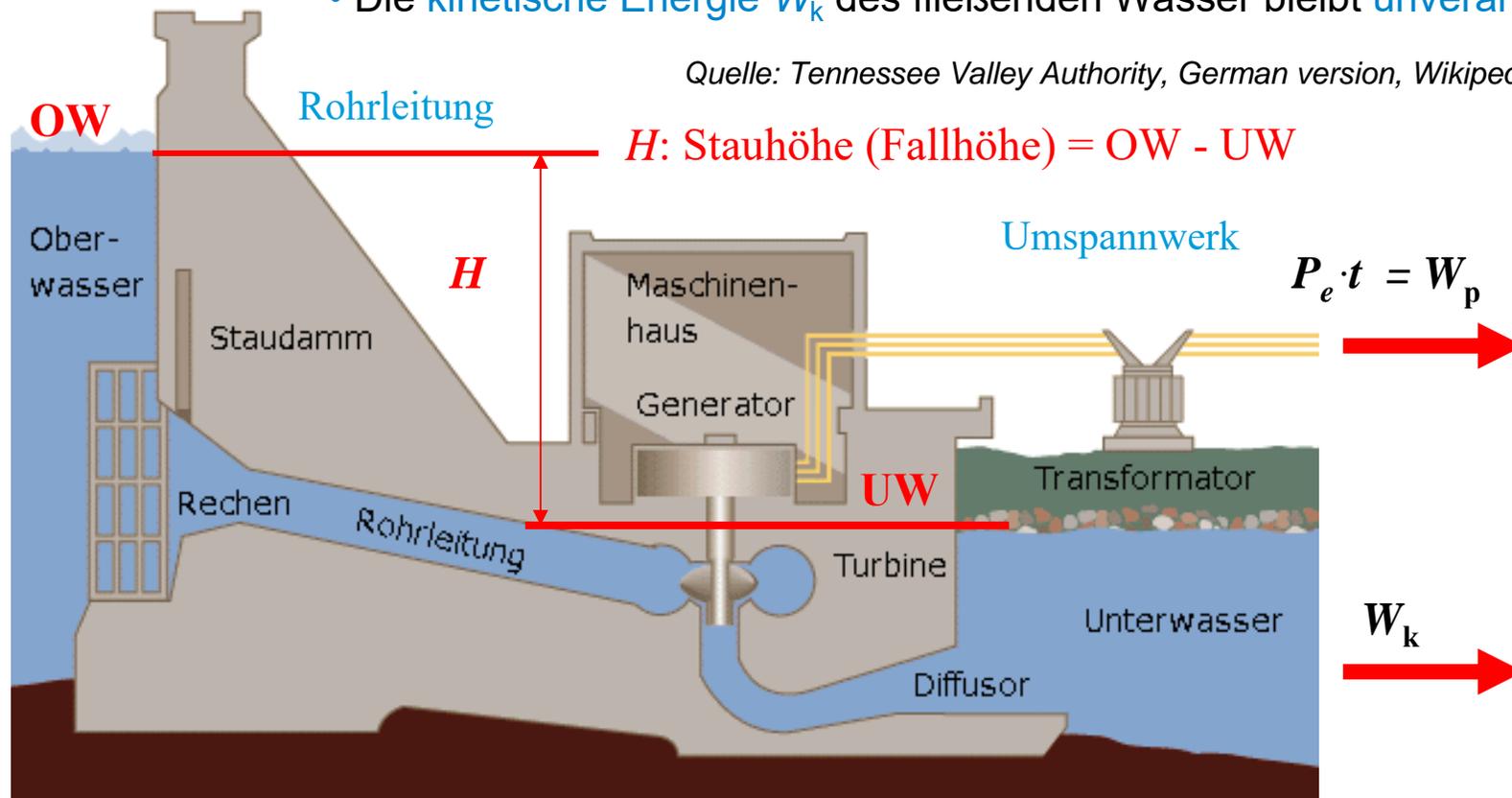
Wasserkraftwerk - Aufbau

$W_k + W_p$

 Stauanlage

- Die **potentielle Energie** W_p des Wassers wird in elektrische Energie $P_e \cdot t$ verwandelt.
- Die **kinetische Energie** W_k des fließenden Wasser bleibt **unverändert**.

Quelle: Tennessee Valley Authority, German version, Wikipedia



R3.2 Wasserkraftwerke

Wasserkraftwerkstypen



- **Laufwasserkraftwerke:** In fließenden Gewässern
 - Haben nur sehr begrenzten Einfluss auf das Volumen an aufgestautem Wasser.
 - Durchfließendes Wasser wird über die von **Staumauer** und **Wehr** gebildete Staustufe auf **Stauhöhe H** gehalten, die die Durchflussgeschwindigkeit durch die Turbine bestimmt.
 - Betrieb hängt vom **aktuellen natürlichen** Durchfluss ab (Eingriff über Wehr möglich).
- **Speicherwasserkraftwerke:** Besitzen einen Energiespeicher
 - Meist künstliche Stauseen mittels Staudämmen.
 - Betrieb (= Abfluss aus Stausee) **wird vom Kraftwerksbetreiber festgelegt.**
- **Pumpspeicherkraftwerke:**
 - Können **bei Bedarf** mit elektrischer Energie Wasser zurück in Stausee (= Speicherbecken) **pumpen.**
 - **Zwischenspeicherung als potentielle Energie** des Wassers:
Erlaubt gleichmäßigere Auslastung des Stromnetzes zu unterschiedlichen Zeiten.



R3.2 Wasserkraftwerke

Wirkungsgradkette

Potentielle Energie des gestauten Wassers: $W_p = m \cdot g \cdot H = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V \cdot g \cdot H$

Leistung: $P_{in} = W_p / t = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (V / t) \cdot g \cdot H = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \dot{V} \cdot g \cdot H$

\dot{V} : Wasserdurchflussrate, H : Stauhöhe, Wasserdichte: $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ kg/m}^3$

Wirkungsgradkette im Wasserkraftwerk:

Hydraulischer Wirkungsgrad (Einlaufbecken, Druckrohrleitung, Auslauf → Wasserreibung!):	0.95
Turbinenwirkungsgrad (Reibung!):	0.9
Generatorwirkungsgrad (elektrische Verluste):	0.98
Kraftwerkseigenbedarf (Stellantriebe, Beleuchtung, ...):	0.97

Resultierender Kraftwerkswirkungsgrad: $\eta_{KW} = 0.95 \cdot 0.9 \cdot 0.98 \cdot 0.97 = 0.81$

Elektrische Abgabeleistung: $P_{out} = P_e = \eta_{KW} \cdot P_{in} = \eta_{KW} \cdot \gamma_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \dot{V} \cdot g \cdot H$

Zahlenwertgleichung: $P_{out} = P_e = 0.81 \cdot 9.81 \cdot 1000 \cdot \dot{V} \cdot H$

"Daumenregel": $P_e = 8000 \cdot \dot{V} \cdot H$, $[P_e] = \text{W}$, $[\dot{V}] = \text{m}^3/\text{s}$, $[H] = \text{m}$

R3.2 Wasserkraftwerke

Wasserdruck Δp

- **Stauhöhe (Fallhöhe): H**

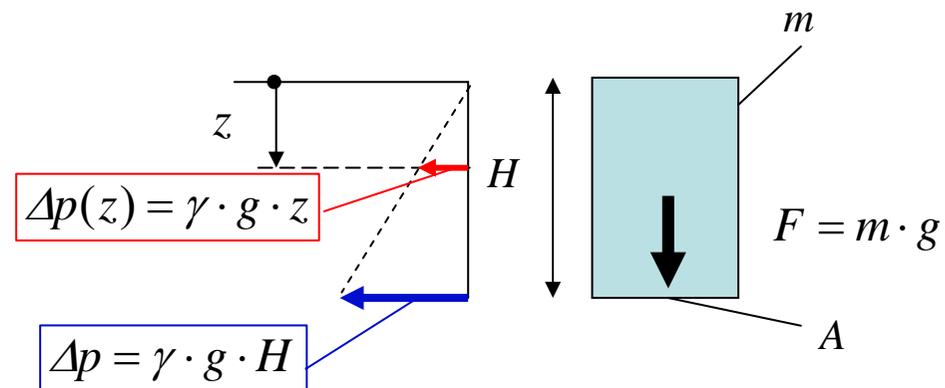
Senkrechte Höhendifferenz zwischen Ober- und Unterwasser einer Wasser-Staustufe.

- **Wasserdruck:**

Ist der durch die Fallhöhe H bestimmte hydrostatische Druck der senkrechten Wassersäule.

$$\Delta p = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{A \cdot H \cdot \gamma \cdot g}{A} = \gamma \cdot g \cdot H$$

$$\Delta p = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} \cdot g \cdot H$$



Niederdruck **Mitteldruck**

Hochdruck



R3.2 Wasserkraftwerke

Hoch-, Mittel- und Niederdruckkraftwerke



- **Niederdruckkraftwerk:** Fallhöhe $H < \text{ca. } 15 \dots 20 \text{ m}$
 - Meist im Mittellauf eines Flusses angeordnet
 - Hohe Wasserdurchflussmengen
 - Weitere Nutzungsziele neben der Erzeugung elektrischer Energie:
 - o Verbesserung des Hochwasserschutzes
 - o Schifffahrtswege ermöglichen
 - o Eindämmung der Sohle-Erosion
- **Mitteldruckkraftwerk:** Fallhöhe $H \approx 25 \dots 100 (\dots 200) \text{ m}$
 - Meist mit niedrigen Talsperren als Speicherkraftwerk oder mit höheren Wehranlagen an Flusskraftwerken.
 - Mittlerer Wasserdurchsatz nur durch **Speicherbewirtschaftung** möglich (meist Monats- oder Wochenspeicher)
 - Weitere Nutzungsziele: Trinkwasserversorgung, Hochwasserschutz, Erholungsraum, ...
- **Hochdruckkraftwerk:** Fallhöhe $H > 100 (\dots 200) \text{ m}$
 - Für so große Fallhöhen werden diese Anlagen im Mittel- und Hochgebirge errichtet.
 - **Stauhaltung** über Talsperren, Staumauern, Staudämme:
Druckstollen zum meist im Tal befindlichen Kraftwerk.
 - Meist Jahresspeicher.



R3.2 Wasserkraftwerke

Beispiele für Wasserkraftwerke



$$P_e = 8000 \cdot \dot{V} \cdot H \quad [P_e] = \text{W}, [\dot{V}] = \text{m}^3/\text{s}, [H] = \text{m}$$

Niederdruck	Mitteldruck	Hochdruck	Hochdruck
Hoher Durchfluss	Hoher bis mittlerer Durchfluss	Niedriger Durchfluss	Niedriger Durchfluss
Laufkraftwerk <i>Donau</i>	Talsperre <i>Yangtsekiang</i>	Pumpspeicher- kraftwerk	Speicherkraftwerk
<i>Wallsee/Österreich</i>	<i>3 Schluchten/ China*)</i>	<i>Kaprun/Österreich</i>	<i>Bieudron/Schweiz</i>
$H = 9.1 \text{ m}$	$H = 180 \text{ m}$	$H = 780 \text{ m}$	$H = 1883 \text{ m}^{**})$
$\dot{V} = 2880 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 15370 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 32 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 86 \text{ m}^3/\text{s}$
$P_e = 210 \text{ MW}$	$P_e = 22500 \text{ MW}$	$P_e = 200 \text{ MW}$	$P_e = 1295 \text{ MW}$
6 Kaplan-Turbinen	32 Francis-Turbinen	4 Pelton-Turbinen	3 Pelton-Turbinen
6 Synchrongeneratoren je 35 MW	32 Synchrongeneratoren je 692 MW	4 Synchrongeneratoren 2x55 MW, 2x45 MW	3 Synchrongeneratoren je 432 MW

*) weltgrößtes Wasserkraftwerk bzgl. P_e wegen untypisch hoher Durchflussmenge

***) weltgrößte Fallhöhe (Staumauerhöhe 285 m, vergleiche: *Eiffel-Turm* 324 m)

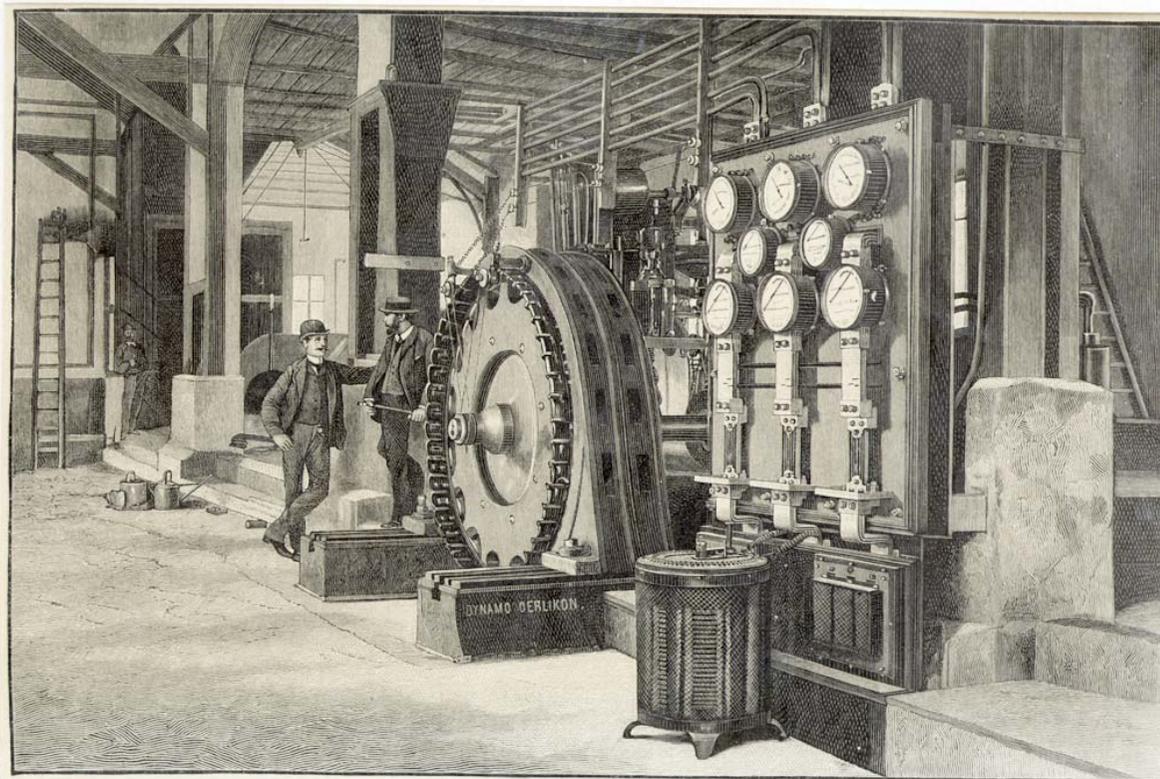


R3 Wasserkraft

R3.3 Historisches Beispiel

Ergänzung

- Erste Drehstrom-Energieübertragung weltweit: *Lauffen/Neckar – Frankfurt am Main* (1891)
- Erste Nutzung der Wasserkraft über weite Entfernung (175 km, 300 PS, 30 kV, 40 Hz)
- *Michael von Dolivo-Dobrowolsky (AEG, Berlin) & Charles Brown (Oerlikon, Zürich)*



Lauffwasserkraftwerk *Lauffen/Neckar* :

Synchron-Klauenpol-Generator,
210 kW, 95 V verkettet, 1400 A,
150/min, 40 Hz, 32-polig,
3-phasig, Wirkungsgrad 96.5%,

Hersteller:

Maschinenfabrik Oerlikon

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N =$$

$$= \sqrt{3} \cdot 95 \cdot 1400 = 230 \text{ kVA}$$

$$\cos \varphi_N = P_N / S_N = 210/230 = 0.91$$

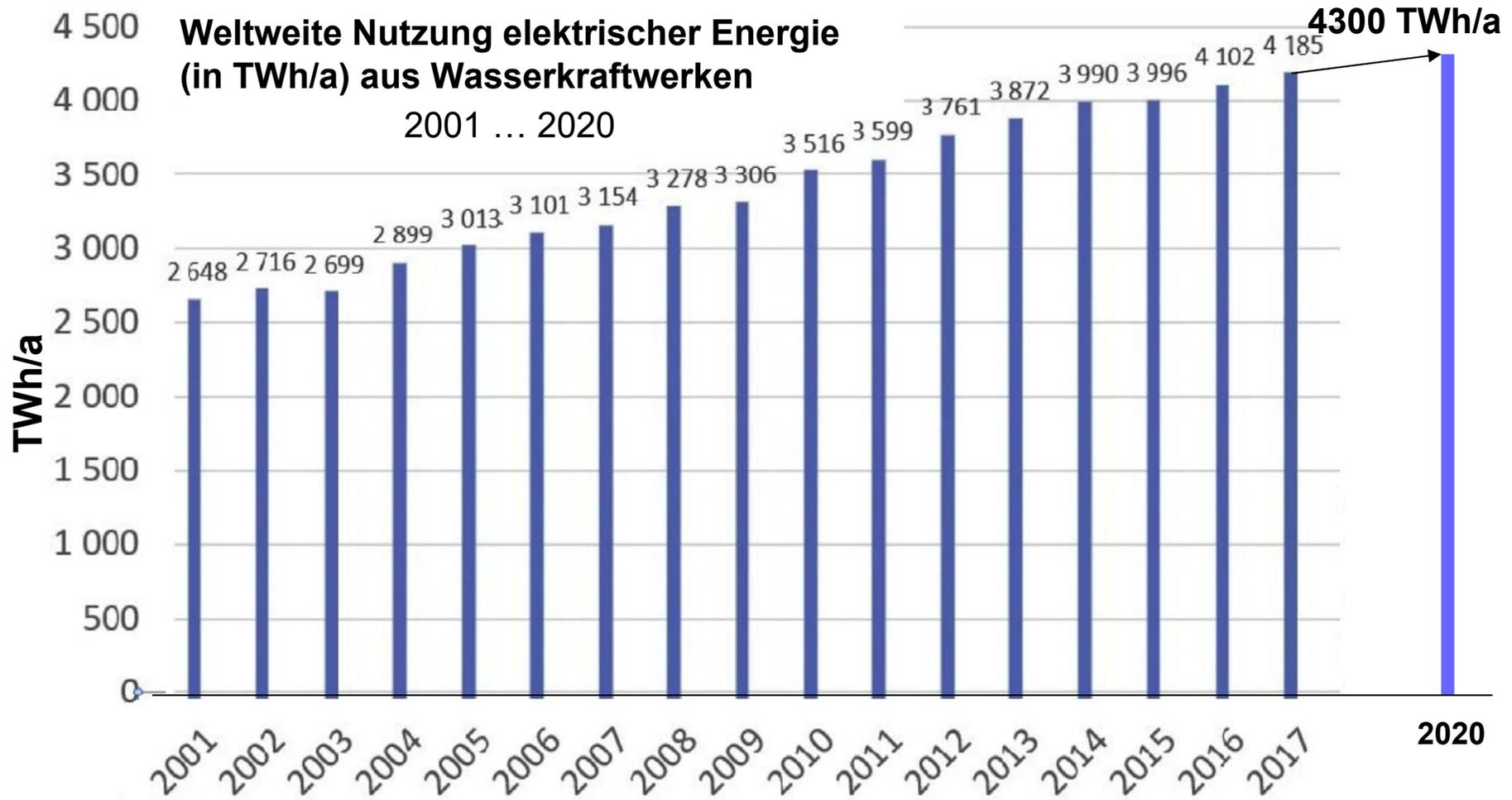
Quelle: Neidhöfer, G.:

Dolivo-Dobrowolsky, VDE-Verlag



R3.4 Wasserkraftnutzung

El. Energie aus Wasserkraft - Weltweit



Quelle: International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, 2018 & statista 2021

R3.4 Wasserkraftnutzung

Installierte Wasserkraft-Leistung (GW) in Deutschland

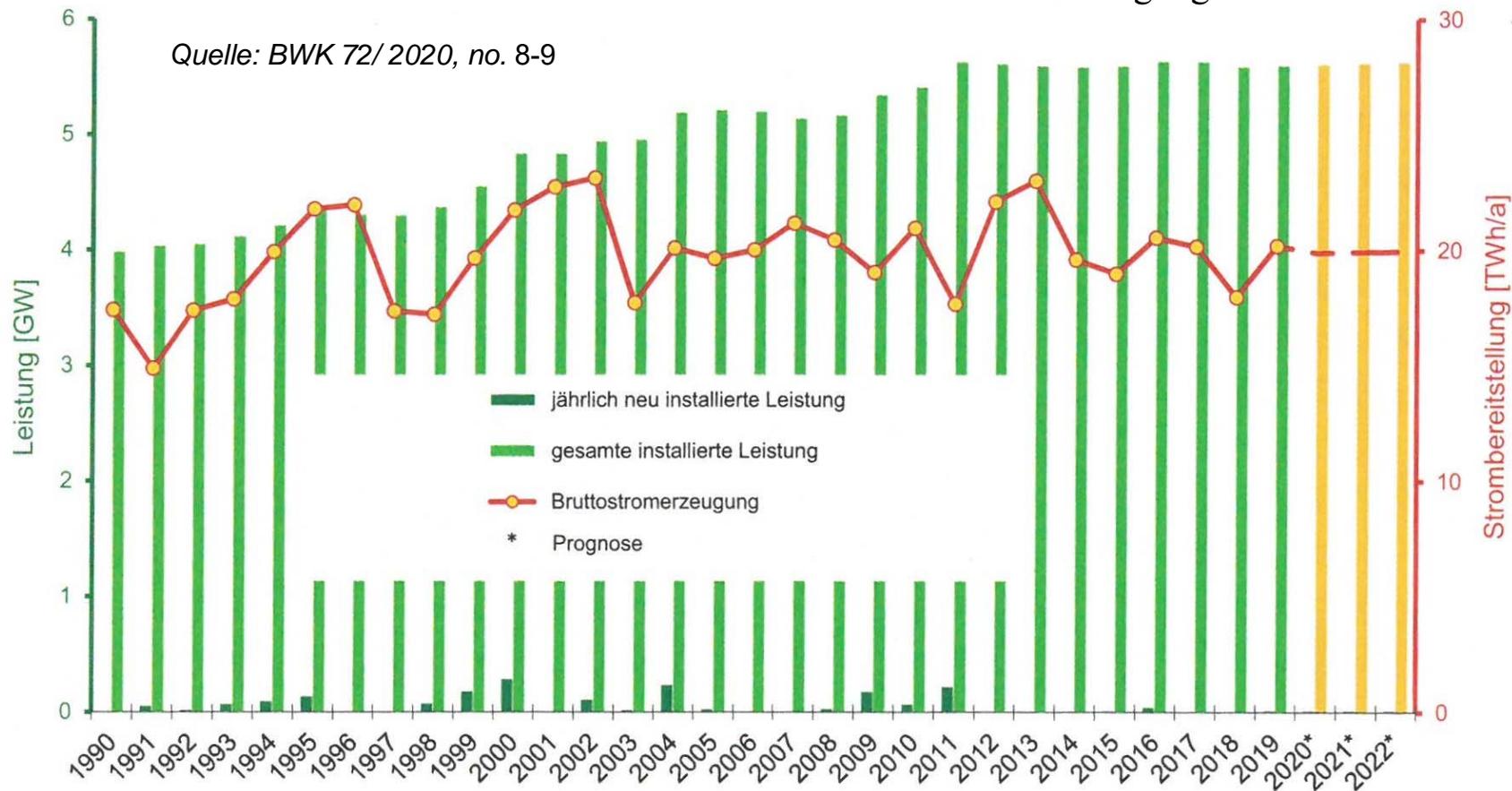
1990 ... 2019 (inkl. Pumpspeicherwerke mit natürlichem Zufluss)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

D: Energieertrag bei 3579 Volllaststunden p.a.:
5599 MW · 3579 h = 20 TWh/a
20 / 4300 = ca. 0.5% der weltweiten Wasserkraft-Nutzung

D: 2019: 5599 MW installiert,
mittlere Erzeugung: 20 TWh/a
Welt: Erzeugung 2020: 4300 TWh/a



R3.4 Wasserkraftnutzung

Wasserkraft in *Deutschland* nach Regionen

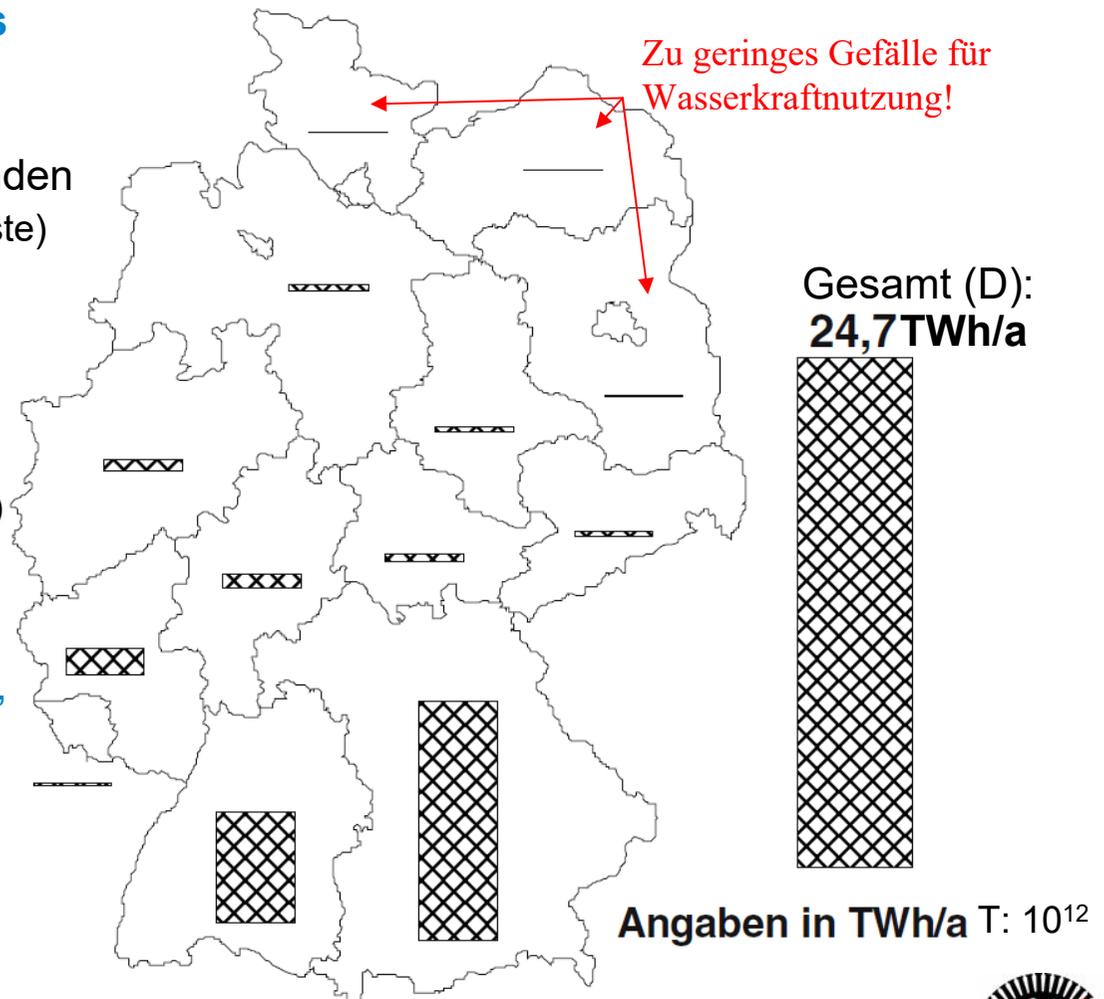
- Elektrische Energieerzeugung aus Wasserkraft in D:

Technisches Erzeugungspotential:
ca. 24.7 TWh/a bei 4420 Volllaststunden
(abzüglich 3...5 % Netzübertragungsverluste)

- In *Deutschland*:

ca. 580 Laufwasserkraftwerke
ca. 55 Speicherkraftwerke
33 Pumpspeicherkraftwerke
(ohne Kleinwasserkraftwerke < ca. 100 kW)

- Während *weltweit* die Wasserkraftnutzung ausgebaut wird, stagniert der Ausbau in *Deutschland*, da ein Großteil der Möglichkeiten ausgeschöpft ist !



Quelle: M. Kaltschmitt, *Erneuerbare Energien*, 2006

R Ressourcen

R3. Wasserkraft



Zusammenfassung

- Wasserkraftwerke als **Lauf- und Speicherkraftwerke** mit Dämmen / Staumauern
- Großanlagen mit erheblichem **Eingriff in das Landschaftsbild**
- **CO₂-freie Erzeugung** elektrischer Energie
- **Langfristige Nutzung** der installierten Anlagen (Stauanlagen > 100 Jahre ...)
- Großinvestitionen mit **langer Amortisationszeit**, daher privat schwierig zu finanzieren
- Als **Pumpspeicherwerke** hervorragend für die Integration der volatil arbeitenden Wind- und Photovoltaik-Kraftwerke geeignet
- In **Europa** sind bereits viele Wasserkraftstandorte in Verwendung:
Verbleibendes Nutzungspotential **ist begrenzt !**



R Ressourcen

R4. Windkraft



1. **Energieträger: Reserven und Ressourcen**
2. **Sonnenenergie**
3. **Wasserkraft**
4. **Windkraft**
5. **Meeresenergie**
6. **Erdöl**
7. **Erdgas**
8. **Steinkohle**
9. **Braunkohle**
10. **Kernbrennstoffe**
11. **Erdwärme**
12. **Biomasse**
13. **Energieströme**



R4 Windkraft

Übersicht

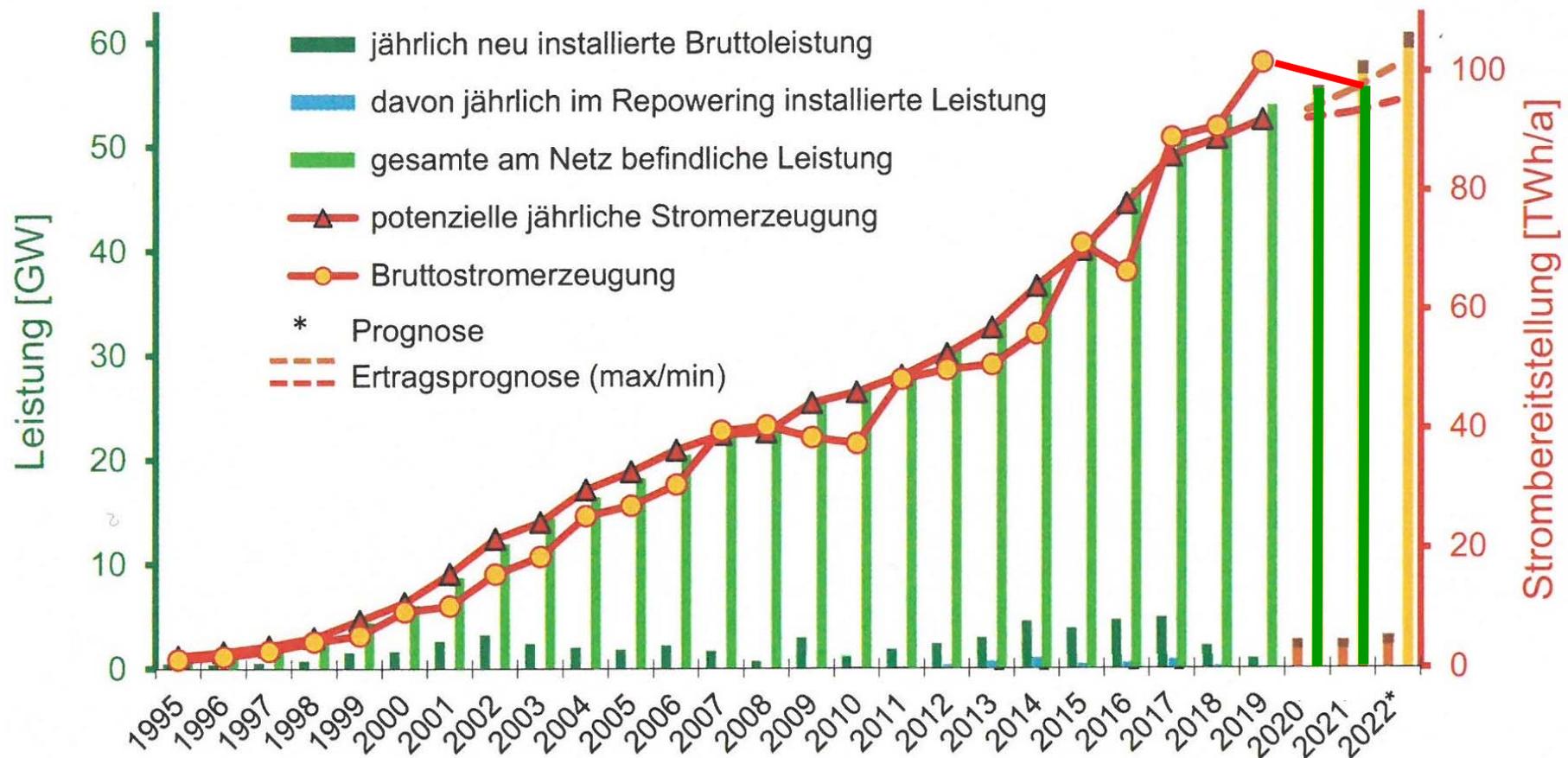


1. Motivation: Windenergie in *Deutschland*
2. Primärenergie Wind:
 - Was ist Wind?
 - Potentiale und Nutzung (*Deutschland*)
 - Vergleich On-shore-/ Off-shore-Anlagen
3. Windenergieanlagen



R4.1 Windenergie-Anlagen

Onshore-Anlagen/-zubau *Deutschland*



Quelle: BWK 72/ 2020, no. 8-9 & BWE e. V. 2022



R4.2 Windenergie-Anlagen Offshore-Anlagen/-zubau *Deutschland*

N-Europa: Installierte Offshore-Leistung (GW)

(1.1.2020) UK: 9.95

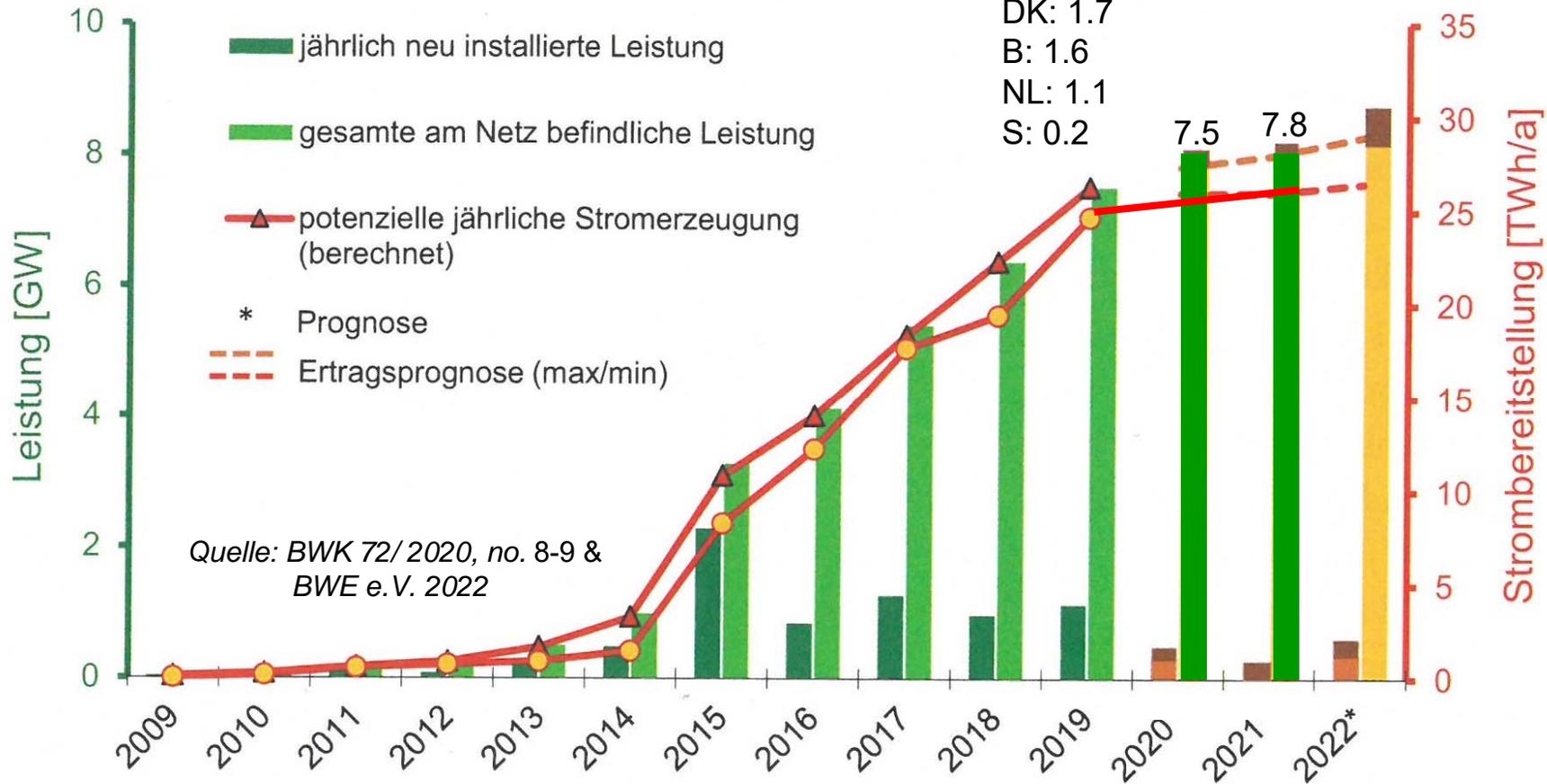
D: 7.5

DK: 1.7

B: 1.6

NL: 1.1

S: 0.2



R4.1 Anteil der Windenergienutzung

Windenergie-Nutzung in *Deutschland*



Zusammenfassung:

- Rasanter Anstieg der installierten Anlagenleistung in den letzten 20 Jahren
- Windenergienutzung, *Deutschland*:
 - Installierte Anlagen ($P_N = \text{ca. } 0.5 \dots 8 \text{ MW}$):
Installierte Turbinen-Leistung / eingespeiste el. Energie
 - a) on-shore 2021: 56.1 GW / 96.3 TWh
 - b) off-shore 2021: 7.8 GW / 26.1 TWh
- 1717 Volllaststunden „on-shore“ ($= 96.3 \cdot 10^3 / 56.1$) ... ca. 2000 Volllaststunden
3346 Volllaststunden „off-shore“ ($= 26.1 \cdot 10^3 / 7.8$) ... ca. 4000 Volllaststunden



R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Was ist Wind?



Globale Windsysteme:

- 2.5% der auftreffenden Solarstrahlungsenergie für **Atmosphärenbewegung & Meerströmung** (= $1.38 \cdot 10^{23}$ J/a bzw. mittlere Leistung: $4.3 \cdot 10^{15}$ W)
- **Bewegte Luftmassen:**
Angetrieben von **solarer Einstrahlung** auf die Erde (Lufterwärmung \Rightarrow \Rightarrow Dichteabnahme \Rightarrow Auftrieb) \Rightarrow Globale Windsysteme („Windgürtel“) und Kalmenzonen
- **Hauptursache für Wind:**
Räumliche Luftdruckunterschiede in der Atmosphäre:
Luftmoleküle bewegen sich aus Lufthochdruckgebiet in das Lufttiefdruckgebiet, bis der Luftdruck ausgeglichen ist.
- Je größer der **Luftdruckunterschied**, umso größer ist
 - a) der Luftmassenstrom in das Gebiet mit dem niedrigeren Luftdruck,
 - b) die Windgeschwindigkeit!



R4.2 Primärenergie aus Windkraft

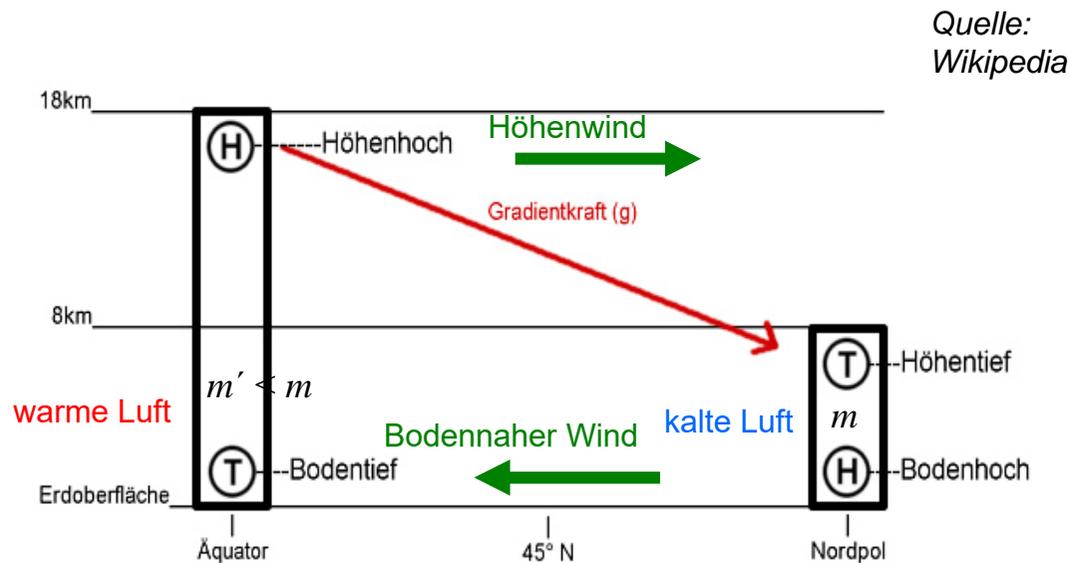
Beispiel: Jetstream

Ergänzung



Beispiel:

Jetstream: „Höhenwind“ \Rightarrow Gradientenkraft: Vom Äquator zum N-Pol!



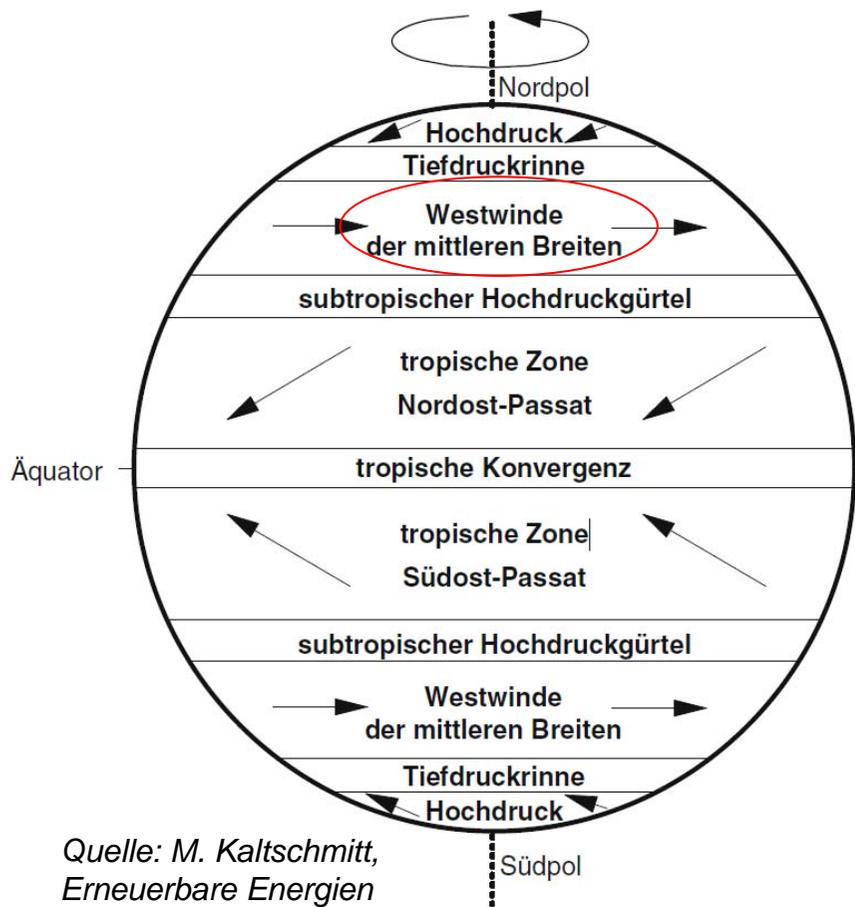
R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Globale Windsysteme (Windgürtel)

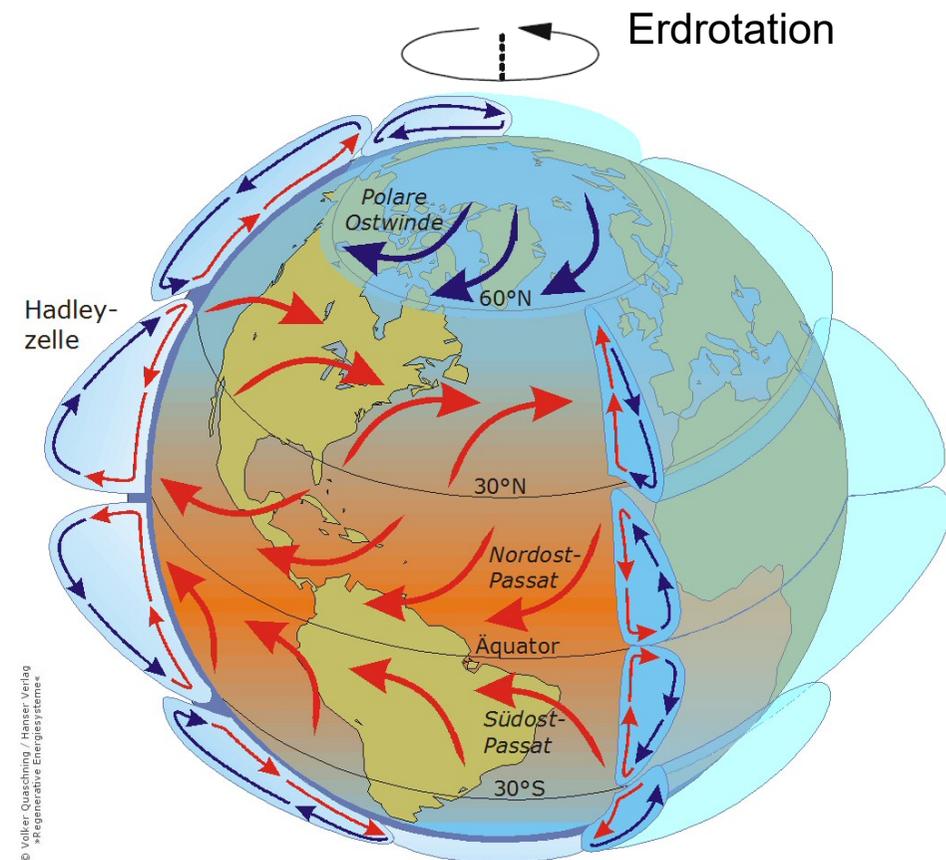
Ergänzung



- Einfluss der Erdrotation lenkt Windrichtung ab (*Coriolis-Effekt*)



Quelle: M. Kaltschmitt,
Erneuerbare Energien



Quelle: V. Quaschnig,
Regen. Energiesysteme



R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Lokale Windsysteme, Windgeschwindigkeiten



Lokale Luftzirkulation:

- In **Bodennähe** überlagern lokale Effekte die globalen Strömungseffekte durch die unterschiedliche Erwärmung von z. B. Land- und Seeoberflächen:
 - Auf- und Abwinde
 - Land- und Seewinde in Küstennähe (tags: See → Land, nachts: Land → See)
 - Berg- und Talwinde an Berghängen („Thermik“)

▪ **Windgeschwindigkeit v :** in km/h

Windstille	$v < 2$ km/h
schwacher Wind	$v \leq 28$ km/h
starker Wind	$v \leq 56$ km/h
Sturm	$v \leq 83$ km/h
Orkan	$v > 117$ km/h

Energietechnische Nutzung



R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Beispiel: Föhn

Ergänzung

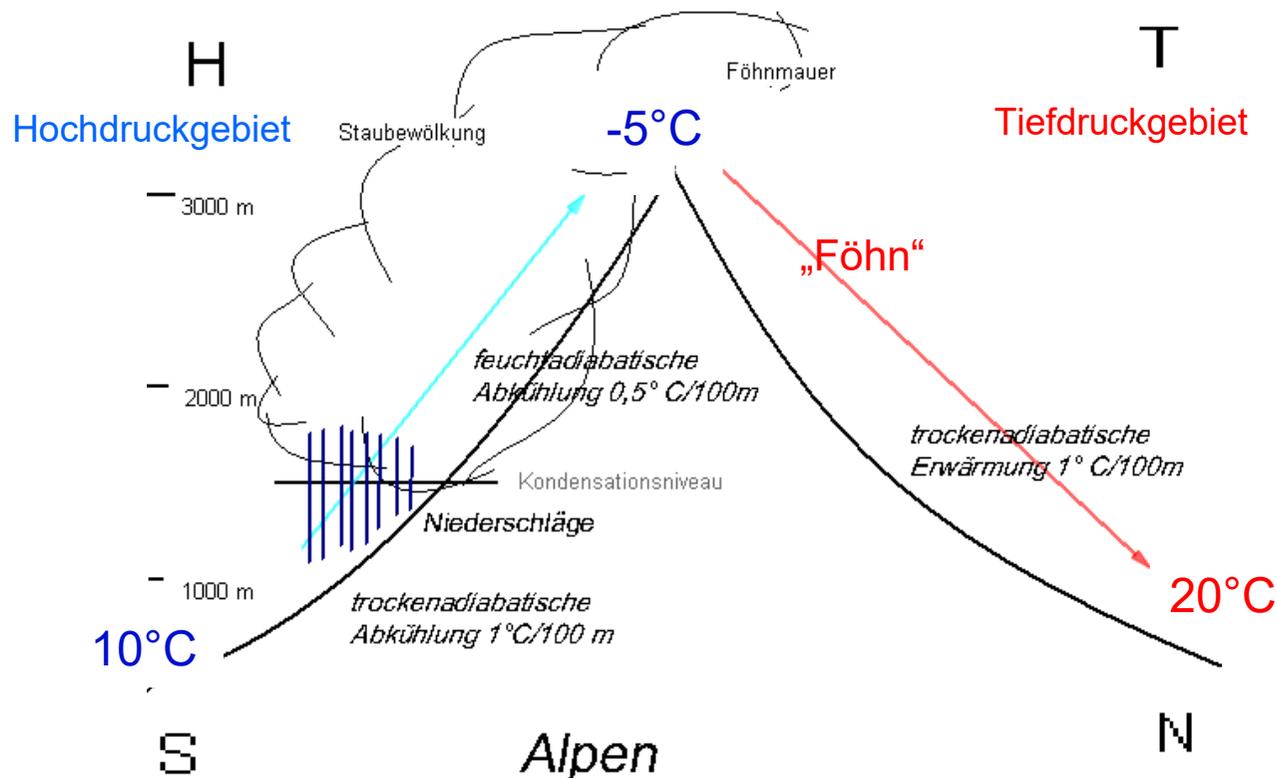


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Beispiel:

Warmer Fallwind „Föhn“:

Die kalte Luft (10°C) wird in warmen Fallwind (20°C) umgewandelt!



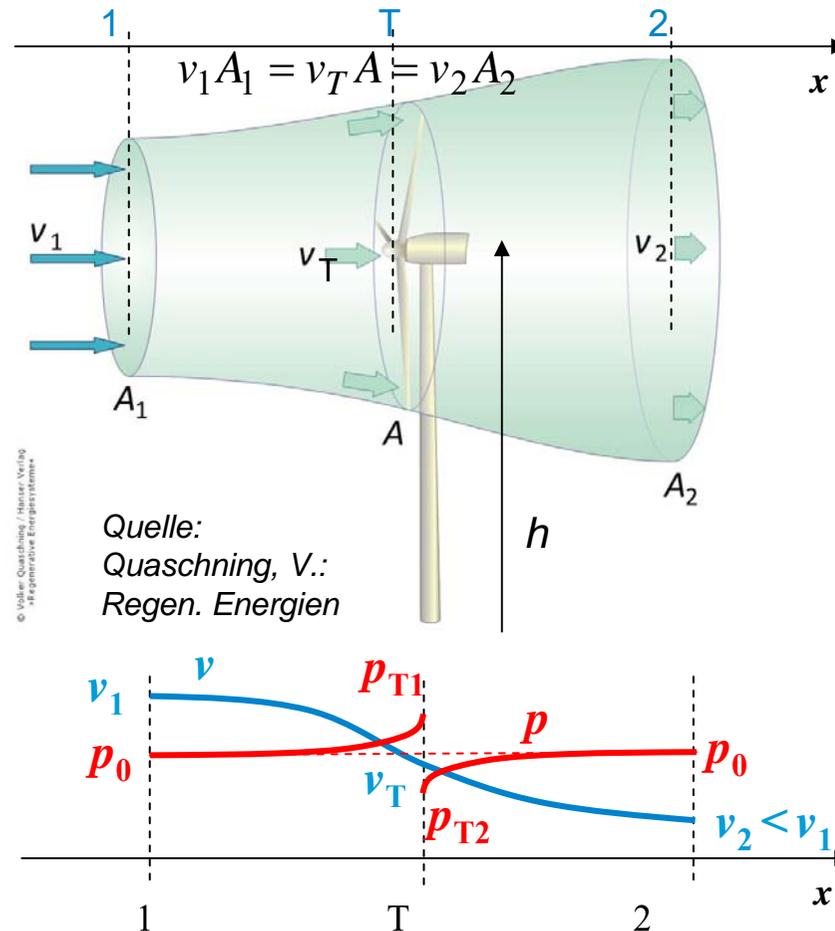
Quelle: Wikipedia



R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Nutzung der kinetischen Windenergie (1)

Mittlerer Strömungsverlauf einer
frei angeströmten Windturbine



Turbulente Strömung, die nicht komprimiert wird: $\gamma = \text{konst.}$

R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Nutzung der kinetischen Windenergie (2)

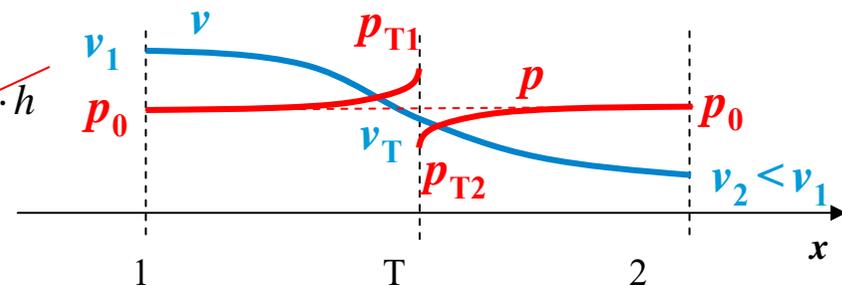
- Turbulente Luftströmung, Luft wird nicht komprimiert: $\gamma = \text{konst.}$
- *Bernoulli*-Gleichung für einen mittlere Stromfaden:

$$1, T: p_{T1} + \cancel{\gamma \cdot v_T^2 / 2} + \cancel{\gamma \cdot g \cdot h} = p_0 + \gamma \cdot v_1^2 / 2 + \cancel{\gamma \cdot g \cdot h}$$

$$p_{T1} - p_0 = \gamma \cdot (v_1^2 - v_T^2) / 2 > 0$$

$$2, T: p_{T2} - p_0 = \gamma \cdot (v_2^2 - v_T^2) / 2 < 0$$

$$p_{T1} - p_{T2} = \gamma \cdot (v_1^2 - v_2^2) / 2 = F / A > 0 \Rightarrow F = A \cdot \gamma \cdot (v_1^2 - v_2^2) / 2 \quad (1)$$



- Bewegungsimpulsverringerung durch Abbremsung der Luft:

$$F = d(m \cdot v) / dt = \dot{m} \cdot v_1 - \dot{m} \cdot v_2, \quad \dot{m} = v_T \cdot A \cdot \gamma \Rightarrow F = v_T \cdot A \cdot \gamma \cdot (v_1 - v_2) \quad (2)$$

- Luftmassengeschwindigkeit durch die Windturbine: v_T

$$(1) = (2): F = A \cdot \gamma \cdot \underbrace{(v_1^2 - v_2^2)}_{(v_1 - v_2) \cdot (v_1 + v_2)} / 2 = v_T \cdot A \cdot \gamma \cdot (v_1 - v_2) \quad \boxed{v_T = (v_1 + v_2) / 2}$$

- Auf die Turbine übertragene Leistung („Leistungsformel“):

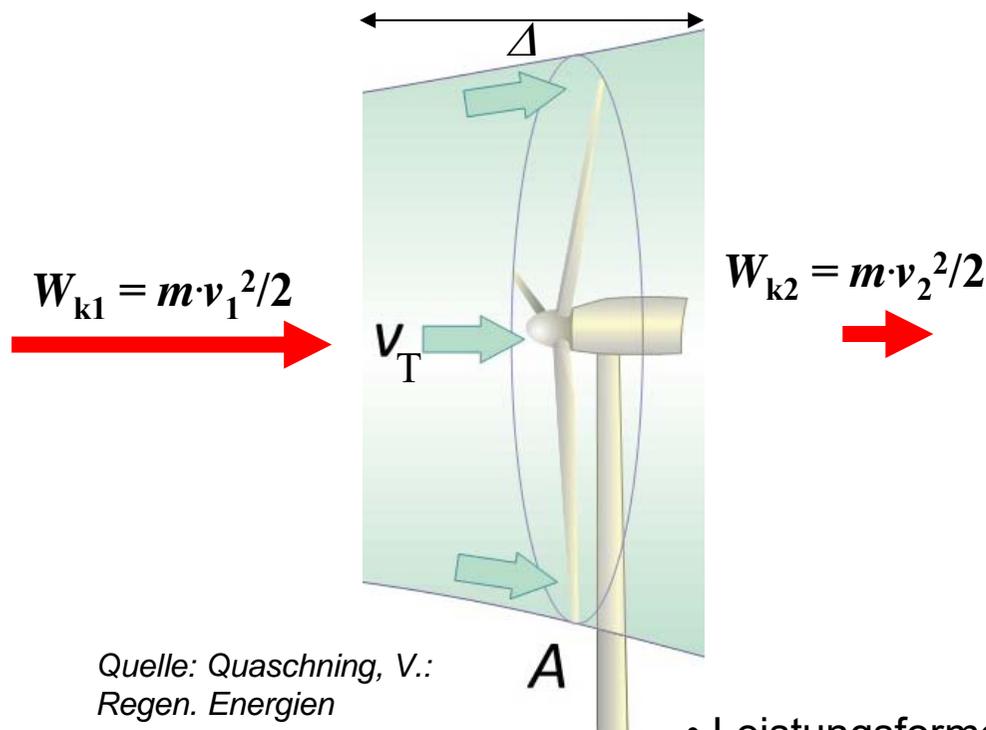
$$P_T = F \cdot v_T = \left[A \cdot \gamma \cdot (v_1^2 - v_2^2) / 2 \right] \cdot [(v_1 + v_2) / 2] = \frac{A \cdot \gamma \cdot v_1^3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right)$$

R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Ergänzung



Alternative Herleitung der Leistungsformel



$$v_T = (v_1 + v_2) / 2 = \Delta / t$$

$$\dot{m} = \frac{m}{t} = \gamma \cdot A \cdot v_T = \gamma \cdot A \cdot \frac{\Delta}{t}$$

$$\frac{W_{k1}}{t} = \frac{1}{t} \cdot \frac{m \cdot v_1^2}{2} = \frac{\dot{m} \cdot v_1^2}{2}$$

$$\frac{W_{k1}}{t} = \frac{1}{t} \cdot \frac{\Delta \cdot A \cdot \gamma \cdot v_1^2}{2} = \frac{v_T \cdot A \cdot \gamma \cdot v_1^2}{2}$$

$$P_T = \frac{W_{k1}}{t} - \frac{W_{k2}}{t} = \frac{v_T \cdot A \cdot \gamma \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{2}$$

• Leistungsformel:

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \frac{A \cdot \gamma \cdot v_1^3}{2} = \bar{c}_p \cdot P_0$$



R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Betz'sche Formel (1)

- Auf die Turbine übertragene Leistung:
$$P_T = F \cdot v_T = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \frac{A \cdot \gamma \cdot v_1^3}{2} = \bar{c}_p \cdot P_0$$

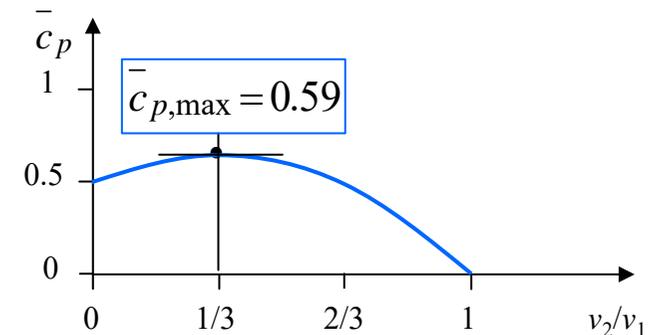
- Kinetische Windenergie W_k der ungestört mit v_1 strömenden Luft durch die Turbinenfläche A :

$$W_k = \frac{m_1 \cdot v_1^2}{2}, \dot{m}_1 = \gamma \cdot A \cdot v_1$$

- Zugehörige Windleistung P_0 :

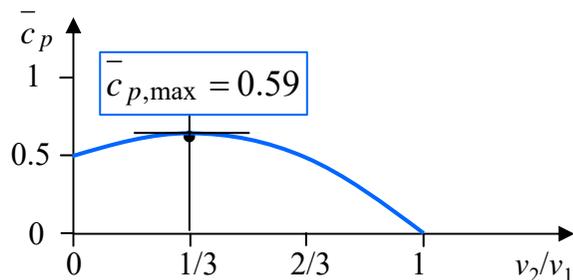
$$P_0 = \frac{W_k}{t} = \frac{m_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot t} = \frac{l \cdot A \cdot \gamma \cdot v_1^2}{2 \cdot t} = \frac{A \cdot \gamma \cdot v_1^2}{2} \cdot \frac{l}{\underbrace{t}_{v_1}} = \frac{A \cdot \gamma \cdot v_1^3}{2}$$

- Theoretischer Leistungsbeiwert:
$$\bar{c}_p = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right)$$



R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Betz'sche Formel (2)



$$\bar{c}_p = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right)$$

- Bei einem Verhältnis $\xi = v_2 / v_1 = 1/3$ wird P_T maximal: $\frac{d\bar{c}_p}{d\xi} = \frac{d}{d\xi} \frac{1}{2} \cdot (1 - \xi^2) \cdot (1 + \xi) = 0 \Rightarrow \xi = \frac{1}{3}$

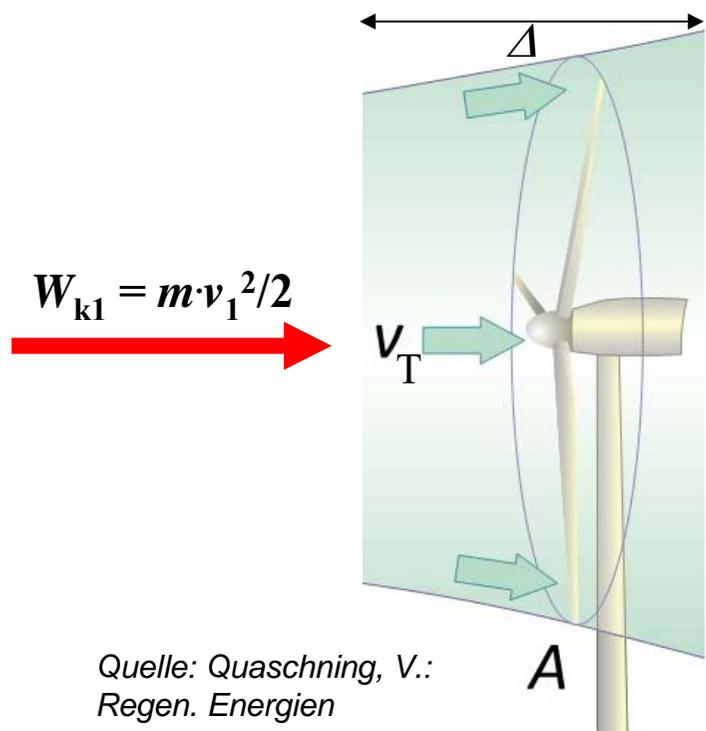
$$\bar{c}_{p,\max} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{3^2}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{3}\right) = \frac{16}{27} = 0.59$$

- Maximal auf die Turbine übertragene Windleistung (**Betz'sche Formel**): $P_{T,\max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{A \cdot \rho \cdot v_1^3}{2}$
- **Stärkere Luftabbremmung** verringert v_T und damit P_T !
- Bei $v_2 = 0$ ist nur $\bar{c}_p = \frac{1}{2}$ und der Abström-Querschnitt müsste unendlich groß sein: $A_2 \rightarrow \infty$

R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Optimale Nutzung der kinetischen Windenergie

- Die **potentielle Energie** W_p des strömenden Winds bleibt **unverändert** ($h = \text{konst.}$).
- Die **kinetische Energie** W_k des strömenden Winds kann (mit **IDEALER Turbine**: Wirkungsgrad 100%) **NUR** zu max. 89 % dem Wind entzogen werden !
- Einfluss **realer Turbinen**: Auftriebs- vs. Widerstandsläufer: siehe Kapitel P!



$$\frac{W_{k1} - W_{k2}}{W_{k1}} \Big|_{opt} = 1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)_{opt}^2 = 1 - \left(\frac{1}{3} \right)^2 = \frac{8}{9} = 0.89$$

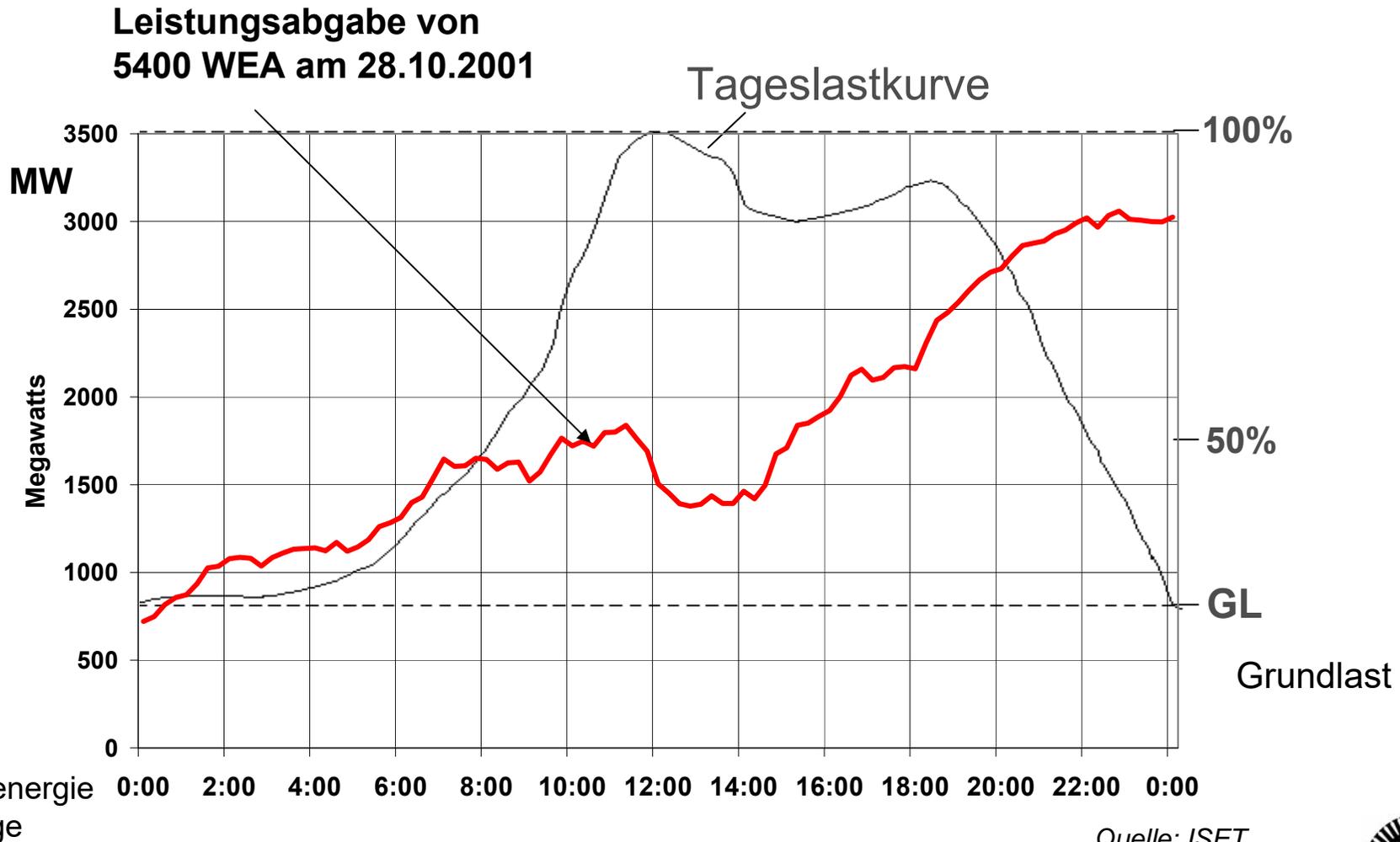
$W_{k1} = m \cdot v_1^2 / 2$

$W_{k2} = m \cdot v_2^2 / 2$

Quelle: Quaschnig, V.:
Regen. Energien

R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Windenergie: Zeitlich volatile Verfügbarkeit



R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Volatile Verfügbarkeit regen. Energiequellen



- 16. – 25. 1. 2017: 19 h: el. Netzeinspeisung:
nur 7.9 ... 13.7 GW aus regen. Quellen „Dunkelflaute“,
Netzbedarf: 72.8 ... 76.0 GW
Residuallast 60 ... 70 GW aus Kohle-KWs u. Kern-KWs
- 17. – 23. 2. 2018: 17 h ... 19 h: -10 °C ... -20°C
el. Netzeinspeisung:
11 % aus regen. Quellen,
Residuallast: 89 % aus Kohle-KWs u. Kern-KWs
- **Wie wird das sein, wenn Kern-KWs und Kohle-KWs abgeschaltet sind?**
 - Reservereicher Ausbau an regen. Energiequellen?
 - Ausbau von el. Großspeichern welchen Typs?
 - Zu welchen Stromkosten?



R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Wind- und Solarenergie: Zuverlässige Verfügbarkeit?

- Je 1 MW installierte Leistung aus Windenergieanlagen muss wegen möglichen plötzlichen Fehlens 1 MW **schnell verfügbarer Reserveleistung** aus konventionellen Kraftwerken vorgehalten werden.
- Bestehende thermische Kraftwerke müssen zunehmend für **Regelungsaufgaben** eingesetzt werden und arbeiten damit **nicht mehr wirtschaftlich optimal** (Teillast, erhöhte Abnutzung).
- **Abhilfe:** Wesentlich mehr Großspeicher sind erforderlich.



Quelle: Internet



Pumpspeicherwerk Geesthacht bei Hamburg

Jedoch: In Deutschland kaum neue Pumpspeicherwerke mehr möglich !

R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer bestimmten Windgeschwindigkeitskomponente

- „Zentraler Grenzwertsatz“ der Wahrscheinlichkeitsrechnung:

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung $f_G(x)$ einer Zufallsvariablen x ,

a) die positiv oder negativ sein kann und

b) durch Überlagerung einer großen Zahl von unabhängigen Einflüssen entsteht, ist annähernd „normalverteilt“.

- **Gauß'sche Normalverteilung:** $f_G(x) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}}$ $\int_{-\infty}^{\infty} f_G(x) \cdot dx = 1$

μ : Erwartungswert („Mittelwert“) $E_G(x)$

σ^2 : Varianz, $\sigma > 0$

$$E_G(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f_G(x) \cdot dx = \mu$$

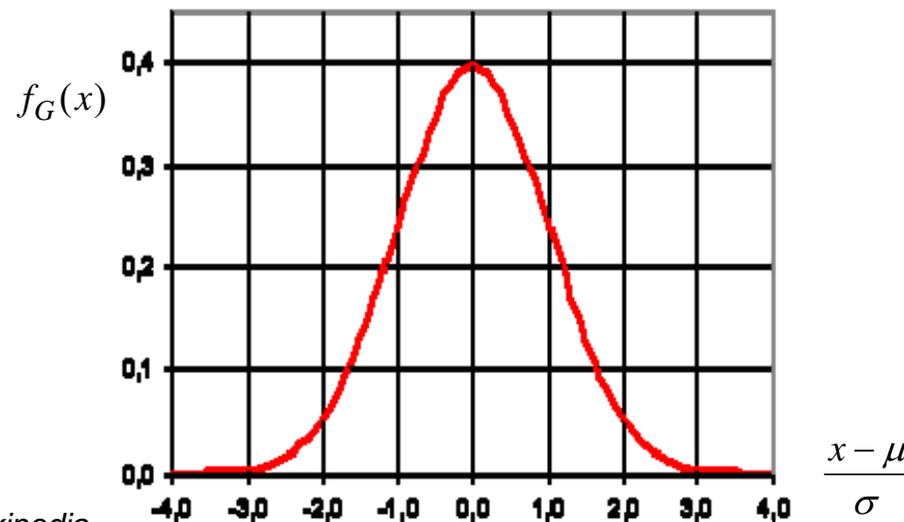
$$Var_G(x) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 \cdot f_G(x) \cdot dx = \sigma^2$$

Beispiel:

Windgeschwindigkeitskomponente $x = v_x$

Mittelwert $\mu = v_{x,av}$

Quelle: Wikipedia



R4.2 Primärenergie aus Windkraft

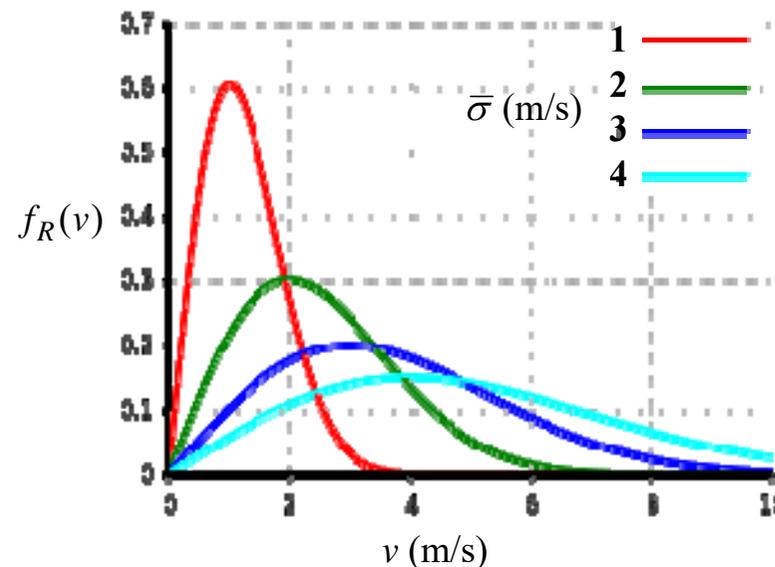
Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer bestimmten Windgeschwindigkeit

- Zufallsvariablen, die **nur positiv sein** können (z. B. **Betrag der Windgeschwindigkeit v** , wobei seine Komponenten v_x , v_y über dem Erdboden jeweils normalverteilt sind), sind *Rayleigh*-verteilt.

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

- Rayleigh-Verteilung:** $f_R(v) = \frac{v}{\bar{\sigma}^2} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{v}{\bar{\sigma}}\right)^2}$ $\int_0^{\infty} f_R(v) \cdot dv = 1$

Erwartungswert: $E_R(v) = \int_0^{\infty} v \cdot f_R(v) \cdot dv = \bar{\sigma} \cdot \sqrt{\pi/2}$ $\bar{\sigma} > 0$ (m/s) : Formparameter prop. zum Mittelwert



Quelle: Wikipedia

R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Weibull-Verteilung (1)

- **Weibull-Verteilung:** $f_W(v) = \frac{k}{a} \cdot \left(\frac{v}{a}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{a}\right)^k} \quad k > 0, a > 0 \quad \int_0^{\infty} f_W(v) \cdot dv = 1$

Erwartungswert: $E_W(v) = \int_0^{\infty} v \cdot f_W(v) \cdot dv = a \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$

- Gamma-Funktion $\Gamma(x)$: $x > 0$: a) x ganze Zahl: $\Gamma(x+1) = x!$ b) x nicht ganz: $\Gamma(x+1) = \int_0^{\infty} t^x \cdot e^{-t} \cdot dt$

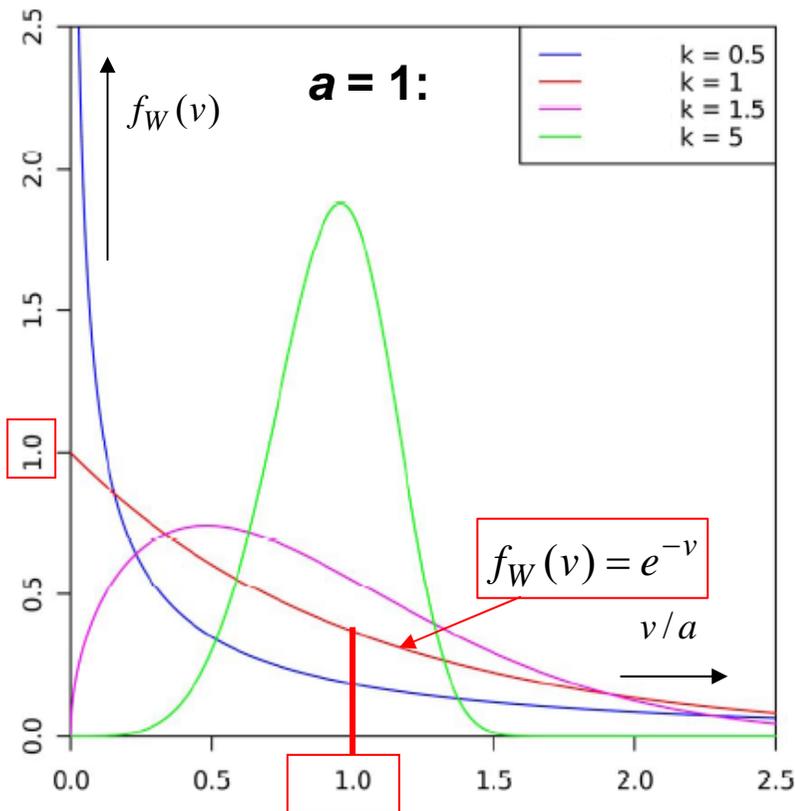
- Die *Rayleigh*-Verteilung ist der **Sonderfall der Weibull-Verteilung** für: $k = 2, a = \sqrt{2} \cdot \bar{\sigma}$

- Die *Rayleigh*-Verteilung kann über **einen Parameter** $\bar{\sigma}$ (m/s) eine experimentell ermittelte Wind-Häufigkeitsverteilung nur an einem Messwert korrekt anpassen.

- Die *Weibull*-Verteilung kann mit **2 Parametern** $k > 0$ (dim.los), $a > 0$ (m/s) zwei Messwerte korrekt anpassen: z. B.
 - (i) Mittelwert v_{av}
 - (ii) v -Wert bei maximaler Häufigkeit

R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Weibull-Verteilung (2)



Quelle: Wikipedia

- Näherungsformel für den Erwartungswert:

$$E_W(v) \approx a \cdot \left(0.568 + \frac{0.434}{k} \right)^{\frac{1}{k}}$$

- **Beispiel:** $a = 1, k = 1: f_W(v) = e^{-v}$

$$E_W(v) = a \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) = 1 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{1}\right) = 1 \cdot 1! = 1$$

Mit Näherungsformel:

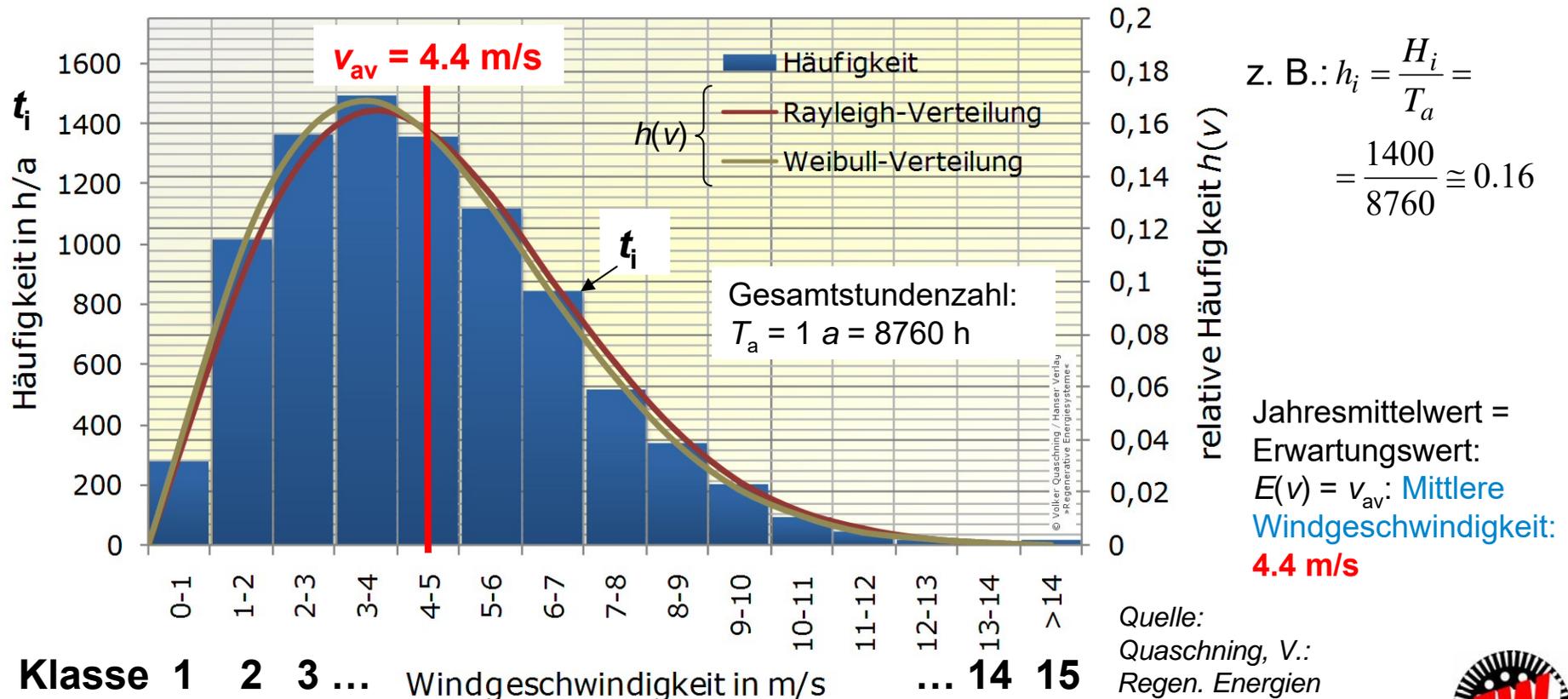
$$E_W(v) \approx a \cdot \left(0.568 + \frac{0.434}{k} \right)^{\frac{1}{k}} = 1 \cdot \left(0.568 + \frac{0.434}{1} \right)^1 = 1.002$$

R4.2 Primärenergie aus Windkraft

- a) Absolute Häufigkeitsverteilung $H_i(v_i)$ in Stunden p.a.
- b) Rel. Häufigkeit $h_i(v_i)$ in p.u. (Windgeschwindigkeit v)



- Gemessene absolute Häufigkeitsverteilung $H_i(v)$ (in Stunden/ahr: $H_i = t_i, i = 1, \dots, 15$) des **Betrags der Windgeschwindigkeit v** an der deutschen Nordseeküste (2007) in 10 m Höhe
- Mit der 2-parametrischen *Weibull*-Verteilung (k, a) wird eine **bessere Annäherung** an das Messergebnis erreicht als mit der 1-parametrischen *Rayleigh*-Verteilung: $\bar{\sigma} = 3.51 \text{ m/s} \rightarrow v_{av} = \bar{\sigma} \cdot \sqrt{\pi/2} = 4.4 \text{ m/s}$

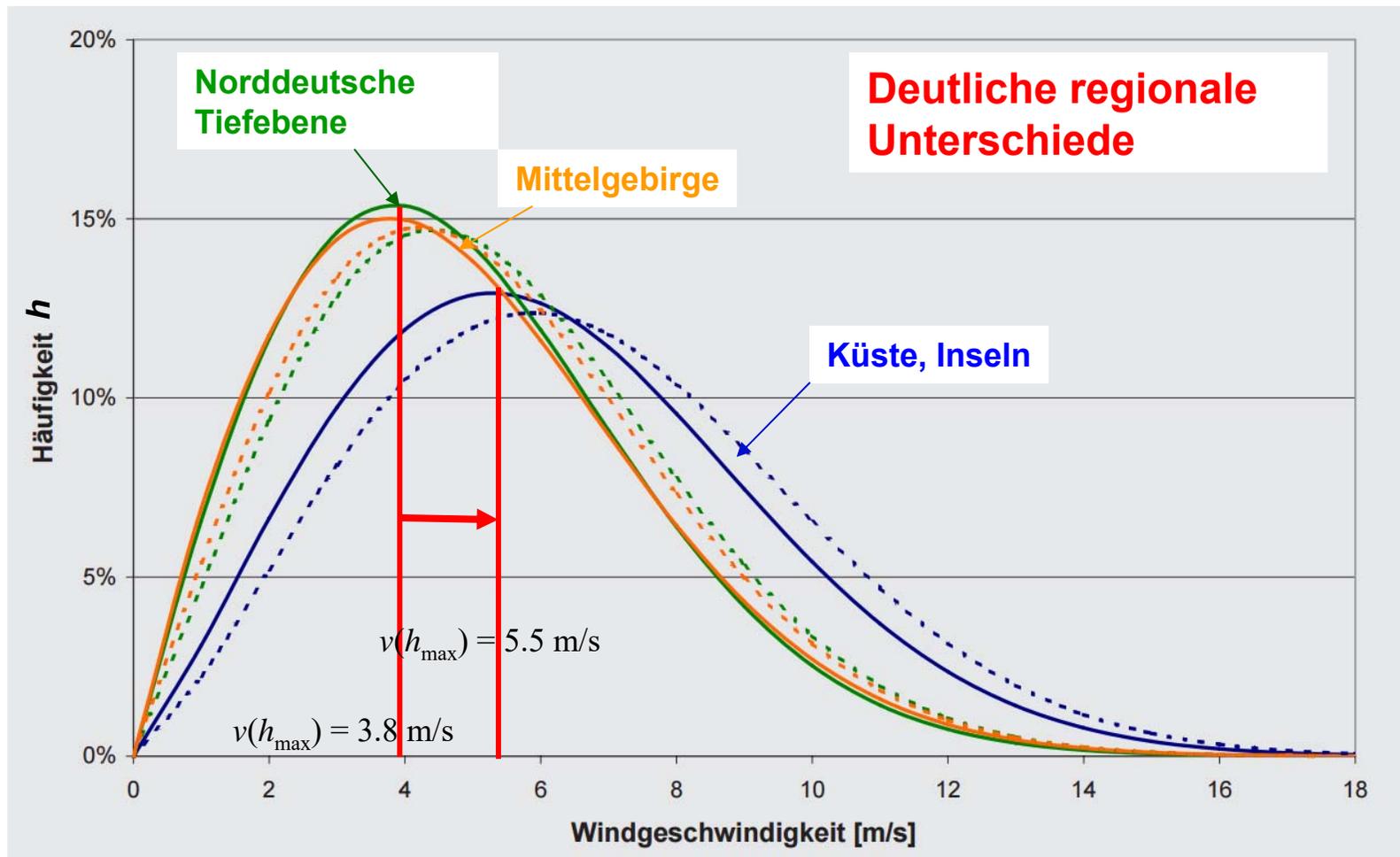


Klasse 1 2 3 ... Windgeschwindigkeit in m/s **... 14 15**



R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Rel. Häufigkeitsverteilung h der Windgeschwindigkeit v



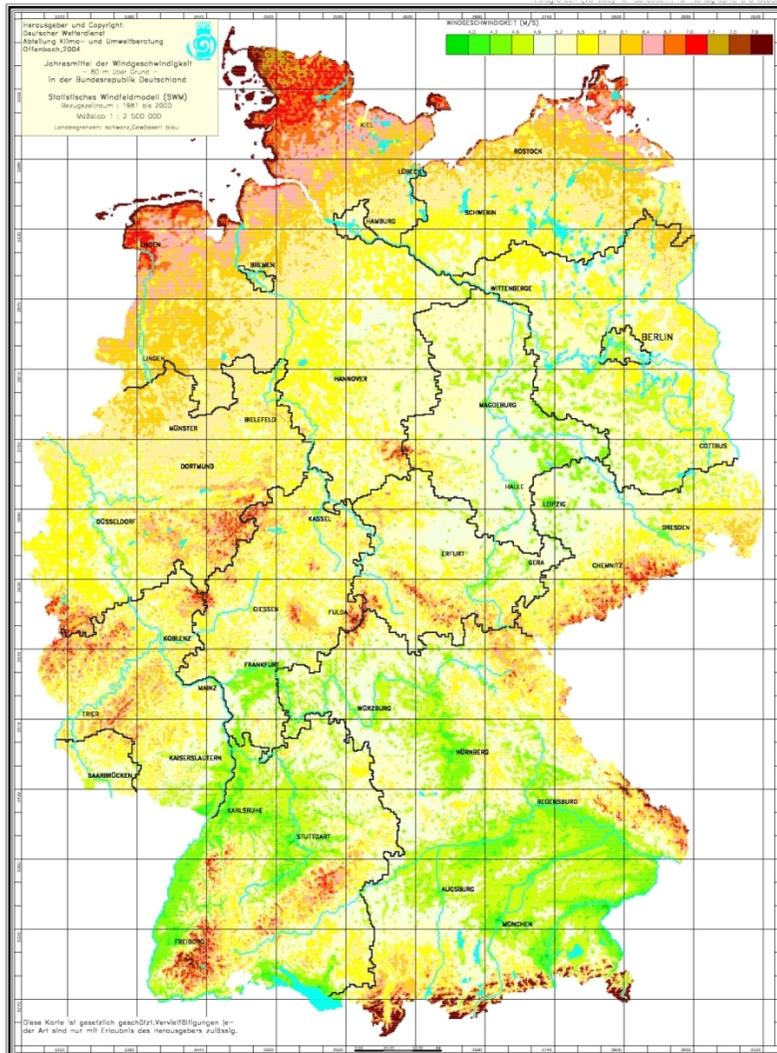
— Langjähriges Mittel 2007

Quelle: Windenergiereport Deutschland, 2008



R4.2 Primärenergie aus Windkraft

Windkarte Deutschland: (On-shore: Regionenverteilung) Mittlere Windgeschwindigkeit v_{av} 1981...2000, 80 m Höhe



Quelle: Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2004

Hohe Windgeschwindigkeiten: $v_{av} = 7 \dots 8$ m/s:

- Norddeutschland (Seenähe)
- Mittelgebirge
- Alpenregion

Süddeutsche Gebiete eher windarm!

■ **Zweistufige** Standortbewertung nach mittlerer Windgeschwindigkeit v_{av} :

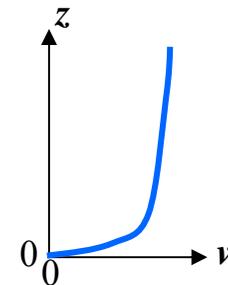
1. Bewertung nach Region

2. Lokale Rauigkeits-Klasse der Geländeoberfläche:

Turbulente v -Verteilung:

Am Erdboden ist $v = 0$ und nimmt mit der Höhe z über dem Boden etwa logarithmisch zu!

(Bei hoher Rauigkeit geringere v -Zunahme!)



4 m/s

v_{av}

8 m/s



R4.3 Windenergieanlagen Nutzungspotenziale in *Deutschland*

Off-shore: Küstennahes („seichtes“) Gewässer:

- Deutlich größere Windhäufigkeit und größere Windgeschwindigkeiten als on-shore!
- Geringere Oberflächenrauigkeit

⇒ Etwa **doppelt so hohe** Leistungsdichte P/A (W/m^2) wie on-shore

	On-shore (Landstandorte)	Off-shore (küstennahe) Seestandorte
Mögliche installierbare Leistung	189 GW (2021 56.1 GW) Flächeneinsatz: 2 % der dtsh. Bundesfläche	54 GW (2021 7.8 GW) gemäß Raumordnungsplan für die küstennahen Gebiete
Mögliche Volllaststunden/a	2071 (23.6 % eines Jahres)	4778 (54.5 % eines Jahres)
Möglicher Jahresertrag	390 TWh/a (ca. 70 % des deutschen Bruttostromverbrauchs 2021)	258 TWh/a (ca. 45 % des deutschen Bruttostromverbrauchs 2021)

Quellen:

Bundesverband WindEnergie, 2011

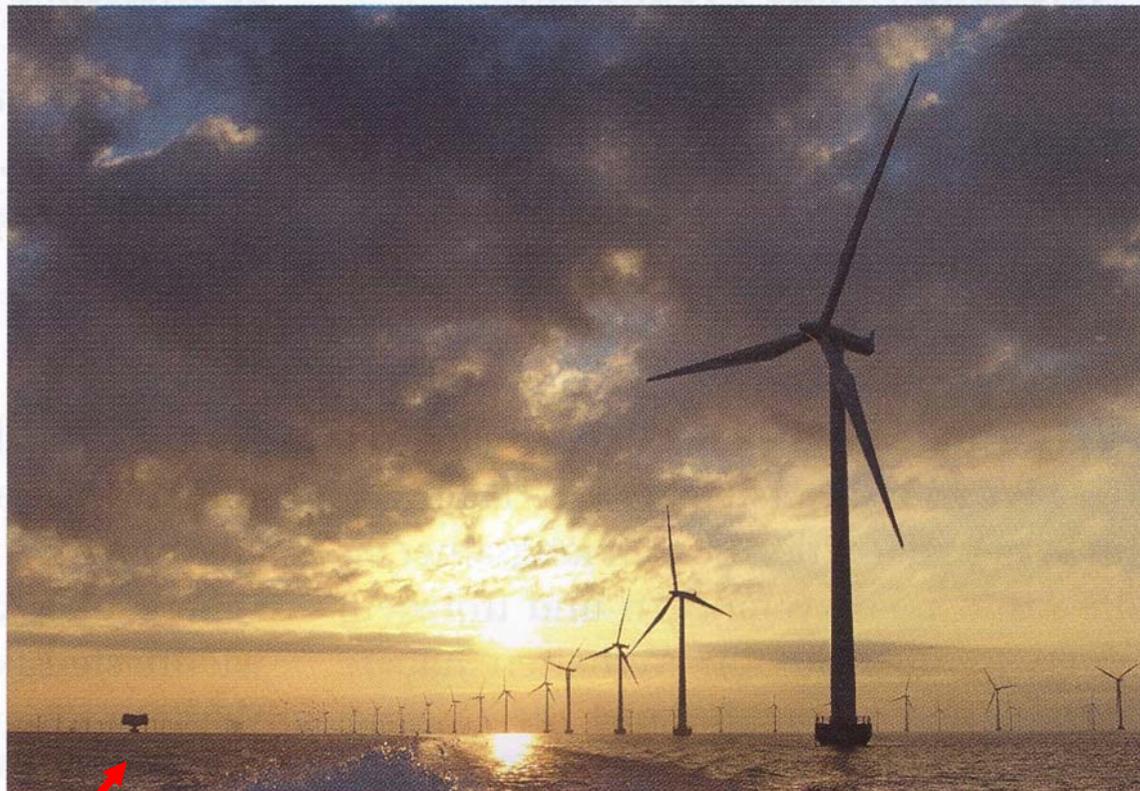
Fraunhofer IWES, 2014

R4.3 Windenergieanlagen

Offshore-Windpark zur Erzeugung von el. Energie: Windenergieanlagen mit Monopile-Masten



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



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

Feste Mast-Gründungen im Meeresboden:

- a) 20 ... 40 m Seetiefe:
Stahlrohr-Masten
(Monopile)
- b) 40 ... 60 m Seetiefe:
Gittermaststrukturen
(Jackets)

Schwimmende Mast-Plattformen i), ii), iii) (verankert im Meeresboden):

- 90 ... 120 m Seetiefe:
 - i) Schwimmkörper mit tiefem Schwerpunkt (spar-buoys)
 - ii) Halbtauch-Schwimmkörper
 - iii) Tension-Leg-Plattformen

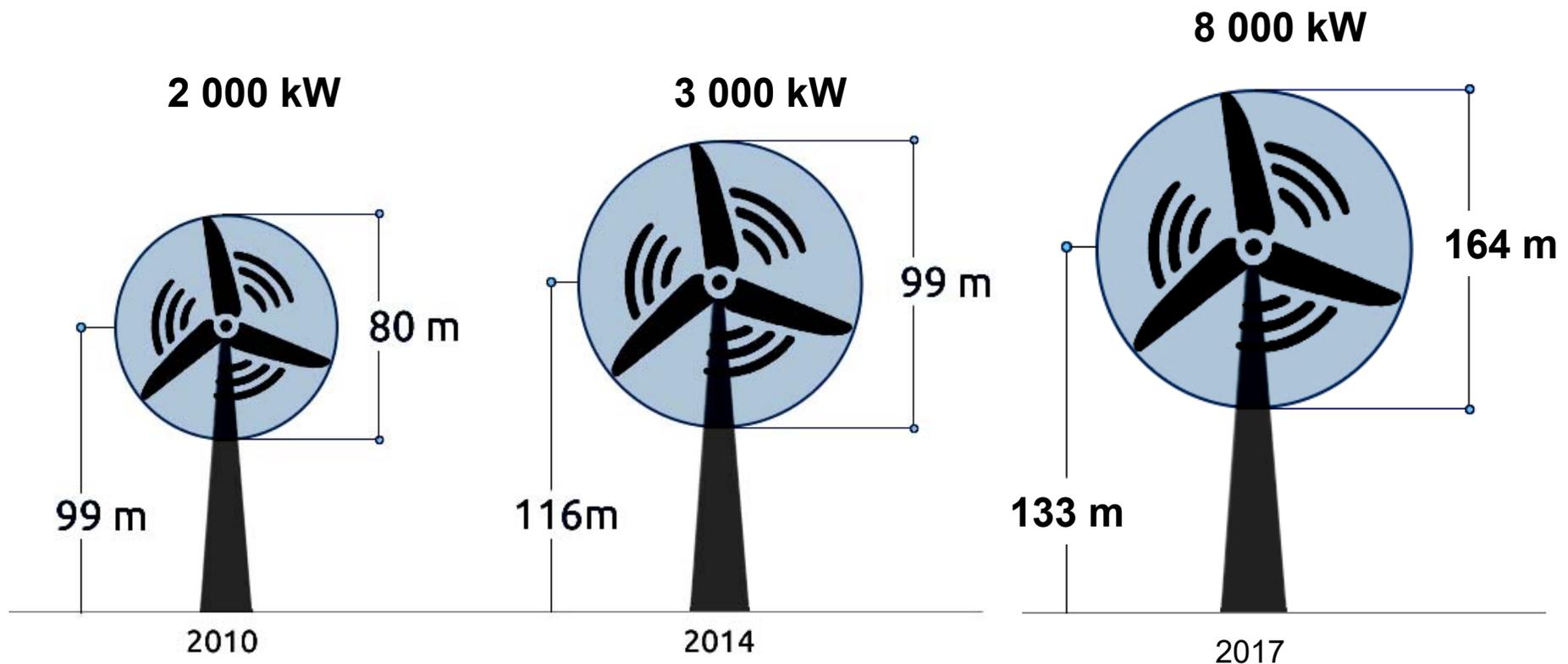
Bild: Peter von Hindte

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



R4.3 Windenergieanlagen Steigende Windanlagengröße beim Neubau

Steigende Anlagengröße



Quelle: Bundesverband WindEnergie, 2016

R4.3 Windenergieanlagen

12 MW Windturbine mit direkt gekoppeltem Synchron-Ringgenerator *Haliade-X (General Electric)*

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

12 MW capacity

220-meter rotor

107-meter long blades

260 meters high

67 GWh gross AEP

63% capacity factor

38,000 m² swept area

Wind Class IEC: IB

Generates **double the energy** as previous GE Haliade model

Generates almost **45% more energy** than most powerful wind turbine available on the market today

Will generate enough clean power for up to **16,000** European households per turbine, and up to **1 million** European households in a 750 MW configuration windfarm

HALIADÉ-X 12 MW

GE Renewable Energy is developing **Haliade-X 12 MW**, the biggest offshore wind turbine in the world, with **220-meter rotor**, **107-meter blade**, leading capacity factor (**63%**), and **digital capabilities**, that will help our customers find success in an increasingly competitive environment.

1063 ft
324 m

1046 ft
319 m

853 ft
260 m

Eiffel Tower Haliade-X 12 MW Chrysler Building

Quelle: GE

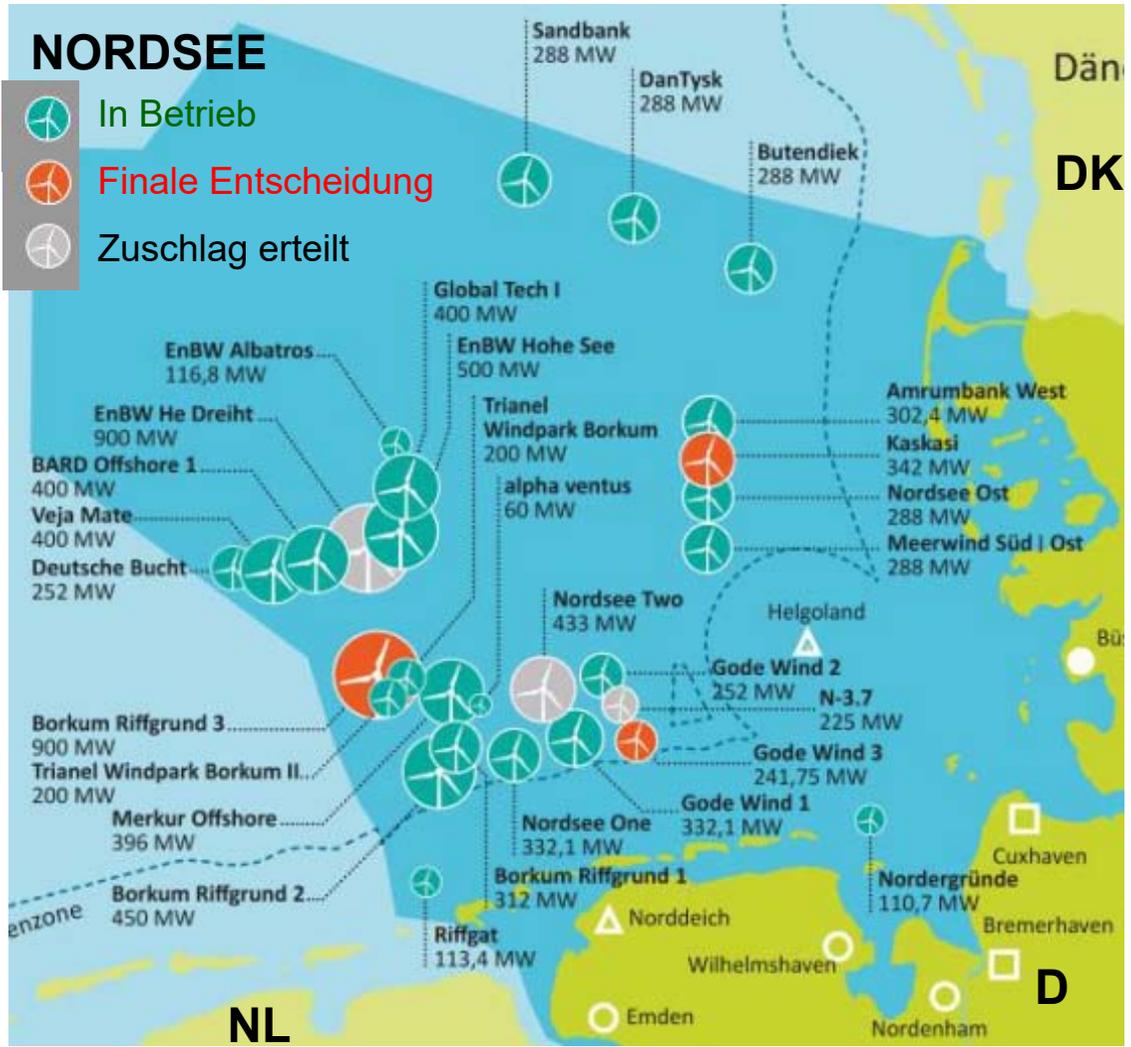
Prototyp in Betrieb bei Rotterdam seit Nov. 2019



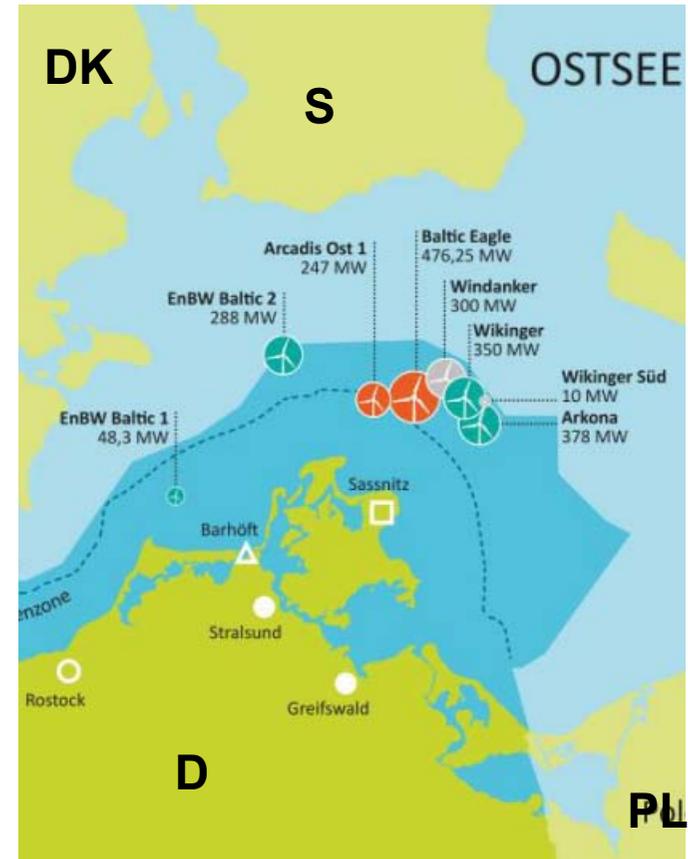
R4.3 Windenergieanlagen

Deutsche off-shore-Windenergieanlagen

Ergänzung



Quelle: Bundesverband WindEnergie, 2022



R4.3 Windenergieanlagen

Stromgestehungskosten aus Windkraftanlagen Deutschland



- **Stromgestehungskosten:**
Kosten, die für die Wandlung von anderer Energieform in elektrische Energie nötig sind.
- Summe aus
 - a) Kapitalkosten (inklusive Finanzierungskosten von Fremdkapital) für Investmittel,
 - b) fixen und variablen Betriebskosten,
 - c) Brennstoffkosten,
 - d) angestrebter Kapitalverzinsung über den Betriebszeitraum.

Windkraftanlage	On-shore	Off-shore
Typische Stromgestehungskosten 2015 ... 2017 <i>Quelle: VDI nachrichten 2017-02-24</i>	5.2 ... 9.1 ct/kWh	14.2 ct/kWh teurer, weil: ca. 30 m Seetiefe ca. 200 m Gesamthöhe ca. 68 km vor der Küste



R4.3 Windenergieanlagen

Investkosten für regen. Energieerzeugungsanlagen Deutschland



Investitionskosten je installierter Nennleistung:

Ohne Netzanbindungskosten

a) Off-shore-Windenergie-Anlage:

Ca. 3.7 Mio. Euro/MW (ca. 4700 Volllaststunden/a)

b) On-shore-Windenergie-Anlagen:

Ca. 1.8 Mio. Euro/MW (ca. 2000 Volllaststunden/a)

c) (On-shore)-Photovoltaik-Anlage:

Ca. 1.0 Mio. Euro/MWp (peak) (ca. 900 Volllaststunden/a)

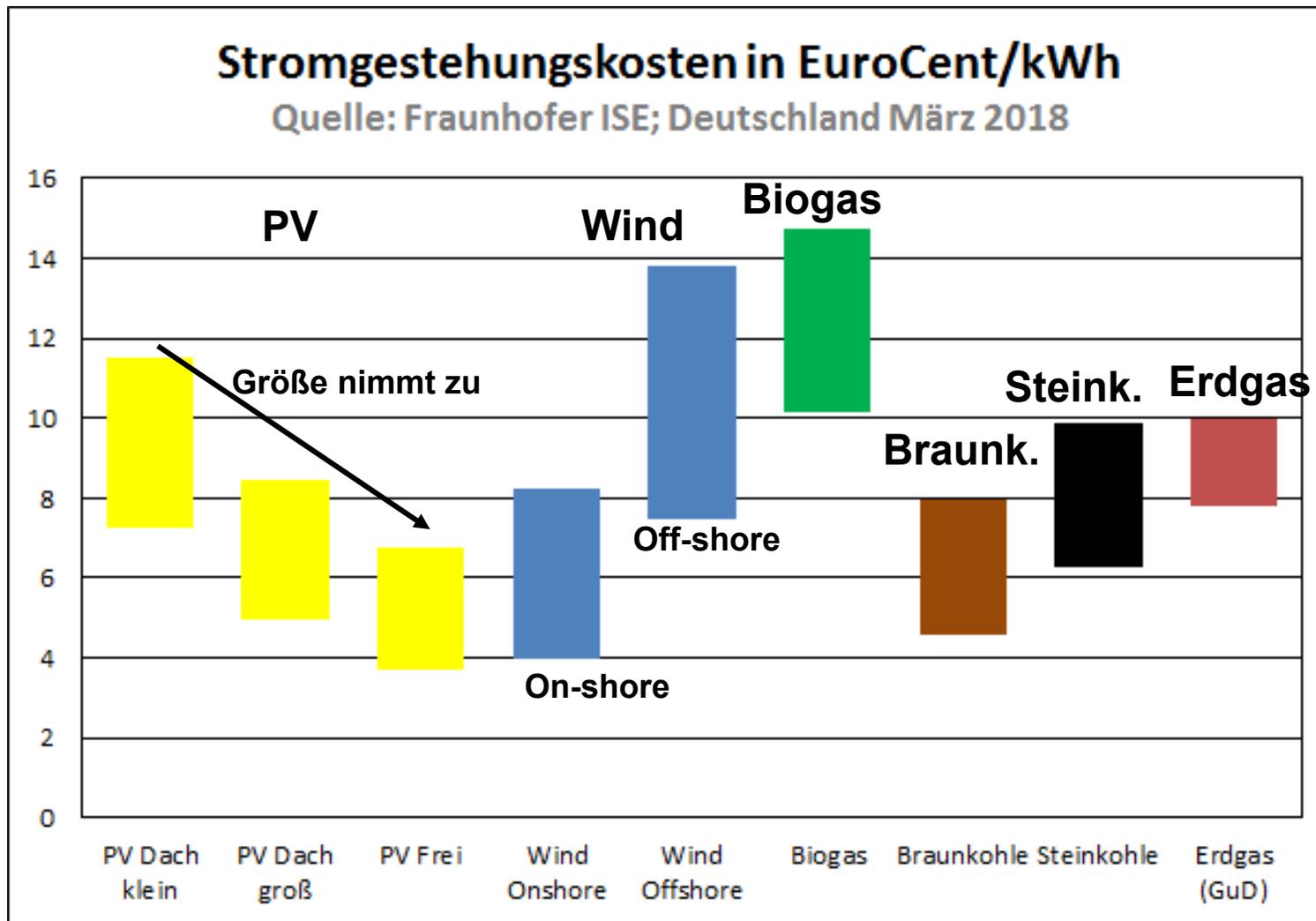
Quelle: Koenemann, D.: BWK special 72 (2020), nr.06-07, p. 6-9



R4.3 Windenergieanlagen

Stromgestehungskosten im Vergleich

Deutschland



R Ressourcen

R4. Windkraft



Zusammenfassung

- Windenergieanlagen nutzen die **kinetische Energie des Winds**
- Stark **volatiler Energieertrag**,
deshalb Reservehaltung abrufbarer Kraftwerkseinheiten unbedingt erforderlich
- Gegenüber Wasserkraftanlagen deutlich **niedrigere Investitionskosten** und kurze
Errichtungszeit, aber deutlich **kürzere Lebensdauer** (ca. 20 Jahre statt 50 ... 100 Jahre)
- Windenergieanlagen werden weltweit **zahlreich installiert**
- Für **strukturschwache Regionen** (z.B.: in Indien) dadurch rasch erleichterter Zugang
zur Nutzung el. Energie
- **Off-shore** doppelt so **hohe Volllaststundenzahl** wie On-shore (in D)
- **Off-shore-Anlagen** deutlich **teurer** sowohl bei Errichtung als auch bei Betriebskosten
- Weltgrößte Leistung je Windkraftanlage 2020: 12 MW



R Ressourcen

R5. Meeresenergie



1. Energieträger: Reserven und Ressourcen
2. Sonnenenergie
3. Wasserkraft
4. Windkraft
5. Meeresenergie
6. Erdöl
7. Erdgas
8. Steinkohle
9. Braunkohle
10. Kernbrennstoffe
11. Erdwärme
12. Biomasse
13. Energieströme



R5 Meeresenergie

Übersicht



1. Tidenhub-Nutzung (Gezeitenkraftwerk)
Entstehung der Gezeiten (siehe Kapitel G „Grundlagen“)
2. Meeresströmung (meist: Tidenstrom-Nutzung)
3. Meereswellen



R5.1 Tidenhubnutzung

Gezeitenkraftwerk – Prinzip (1)



- **Gezeitenkraftwerk:**

Wasserkraftwerk, das potentielle Energie aus dem Tidenhub des Meeres in elektrischen Strom wandelt

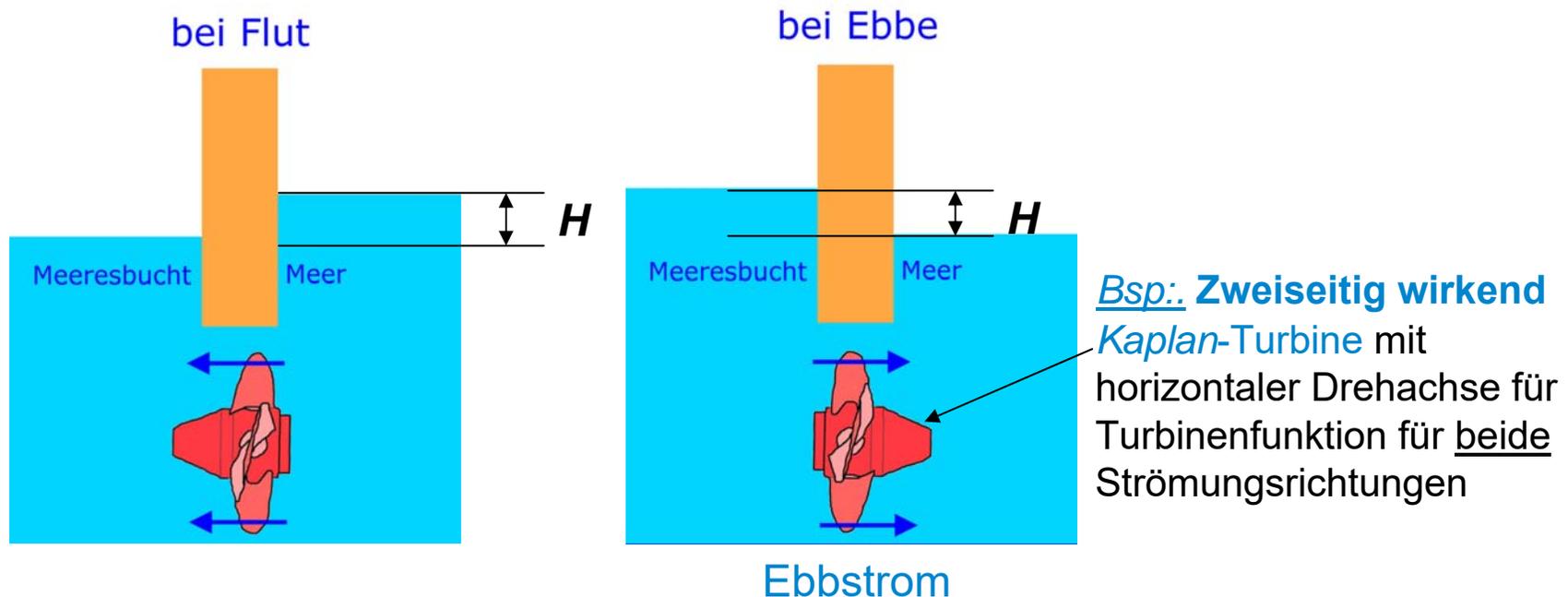
- Gezeitenkraftwerke entnehmen ihre Energie der Erddrehung relativ zur Drehung des Mondes um die Erde (& der Erde um die Sonne)!
- Sie bremsen die Strömungsbewegung der Meere durch Gezeiten dabei (im Verhältnis zur „Erd-Gezeitenbremse“) minimal ab = **Nutzenergie!**



R5.1 Tidenhubnutzung

Gezeitenkraftwerk – Prinzip (2)

- Stau-Höhe H der auf- und ablaufenden Strömung → Nutzung der im gestauten Wasser enthaltenen **potentiellen Energie** durch Turbinen.
- Je nach Turbinentyp **ein- und zweiseitig** wirkende Gezeitenkraftwerke



Quelle: de.wikipedia.org [online]

R5.1 Tidenhubnutzung

Ausführung von Gezeitenkraftwerken



- **Tidenhub auf hoher See gering:** Nur ca. 0.7 m (siehe Kap. G: Grundlagen)
- **Aufstauung der Flutberge** in durch Küstenlinie bedingte Meerengen und Buchten mit günstiger Lage (z. B. Buchtöffnung nach Westen) ⇒
⇒ DEUTLICH höherer Tidenhub 10 ... 20 m
- Durch diese Randbedingungen:
Standorte für Gezeitenkraftwerke geographisch deutlich **eingeschränkt!**
Für mindestens Tidenhub 5 m: Nur ca. 100 Buchten weltweit geeignet!
- „Pulsierender“ Betrieb der Kraftwerke: Ebbe-Flut-Zeitabstand ca. 6 h:
 - a) Zweiseitig wirkend: Betrieb mit Vollast alle 6 Stunden
 - b) Einseitig wirkend: Betrieb mit Vollast alle 12 Stunden



R5.1 Tidenhubnutzung

Ausgeführte Gezeitenkraftwerke (1)

- Beispiel:

Zweiseitig wirkend:

Abschätzung der Volllaststundenzahl:

Ca. 2h Volllast-Betrieb je Tidenwechsel,

4 Tidenwechsel (Ebbe-Flut-Ebbe-Flut) je 24 h:

Betriebszeit: $2 \text{ h} \times 4/\text{d} \times 365 \text{ d} = 2929 \text{ Volllaststunden}$

- Beispiele:

a) *Rance / Frankreich*: 240 MW, 611 GWh/a \Rightarrow 2545 Volllaststunden, zweiseitig

b) *Annapolis / Kanada*: 17.8 MW, 50 GWh/a \Rightarrow 2808 Volllaststunden, einseitig

c) *Shiwa / S-Korea*: 254 MW, 552.7 GWh/a \Rightarrow 2176 Volllaststunden, einseitig

R5.1 Tidenhubnutzung

Ausgeführte Gezeitenkraftwerke (2)

Land	Anlage	Inbetriebnahme	Fallhöhe in m <i>H</i> (Tidenhub)	Installierte Leistung in MW
Südkorea	Shiwa-ho	2011	5,8	254
Frankreich	Rance	1967	5,6	240
Kanada	Annapolis	1983	5,5	20 (17.8)
China	Ganzhtan	1970	1,3	5
China	Jiangxia	1980	2,5	3,2
Russland	Kislaya	1968	1,4	2

Quelle: V. Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme*

R5.1 Tidenhubnutzung

Ausgeführte Gezeitenkraftwerke (3)



Weltgrößtes Gezeitenkraftwerk:

- *Sihwa-ho, Südkorea* (40 km südwestlich von *Seoul* am *Gelben Meer*):
- 10 Kaplan-Rohr-Turbinen (25.4 MW): 22 Meter unterhalb des Wasserspiegels
- $P_N = 254$ MW
- Einseitig wirkend = Nutzung des bei Ebbe abfließenden Meerwassers (**Ebbstrom**)
aus der Bucht ins Meer
- Tidenhub $H = 5.8$ m



R5.1 Tidenhubnutzung

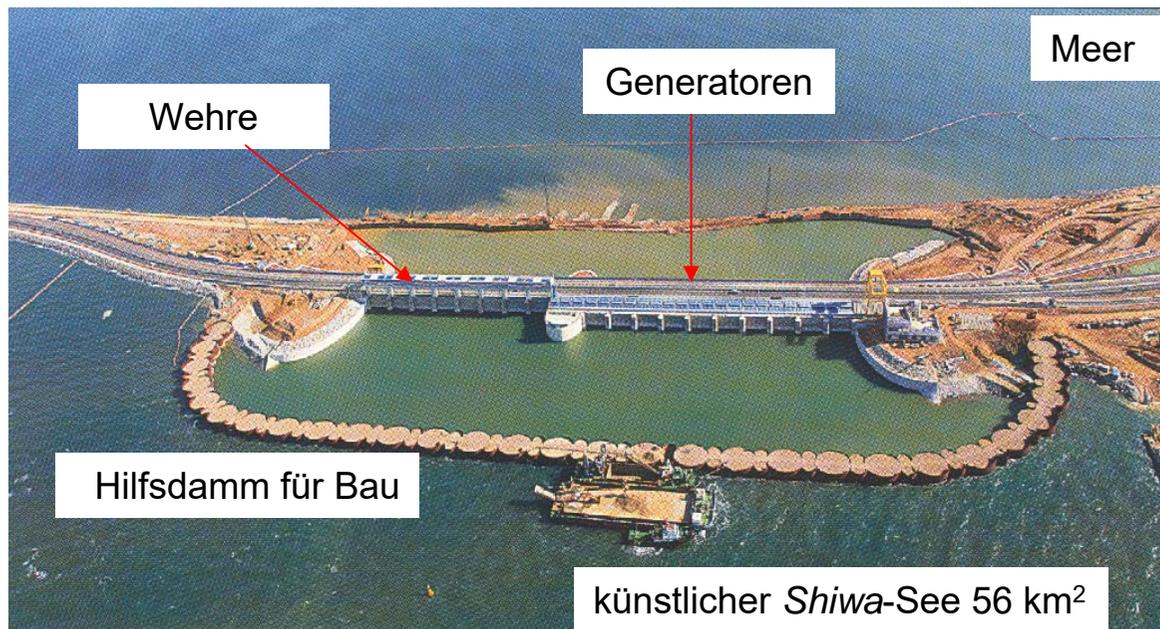
Ergänzung

Beispiel: Gezeitenkraftwerk Shiwa-ho, S-Korea



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Shiwa-ho Gezeitenkraftwerk, S-Korea, 10 x 25.4 MVA (Foto aus Bauphase 2011)



Frontansicht (Binnensee-Seite) von 3 Rohrturbinen-Generatoreinheiten

Während der Flut: Wasserfluss vom Meer zum See durch die rückwärts drehenden Turbinen

Während der Ebbe: Wasser fließt durch die Wehre und die Turbinen ins Meer = **Strom**erzeugung

Quelle: Andritz Hydro, Austria



R5.1 Tidenhubnutzung

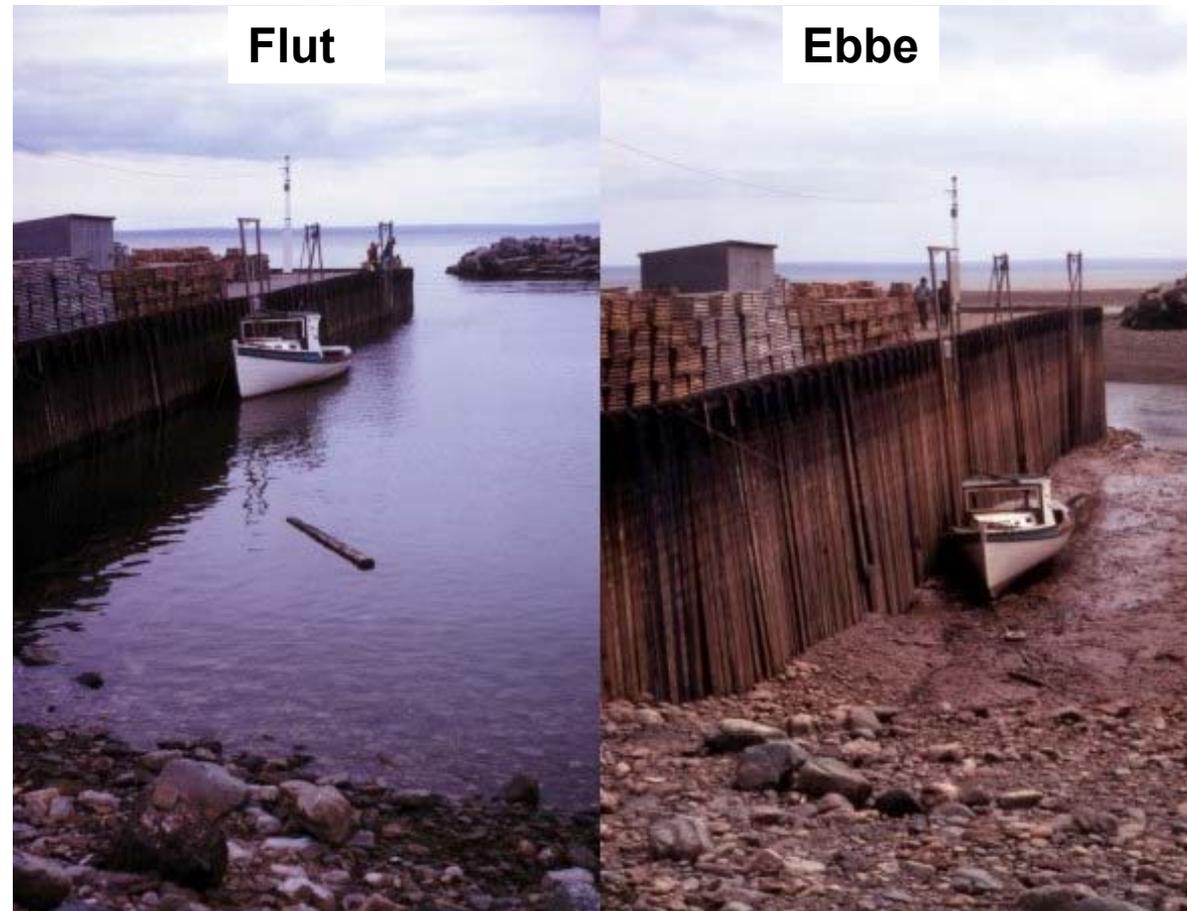
Beispiel: Gezeitenkraftwerk Annapolis, Kanada



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- **Bay of Fundy** (Kanada, Halbinsel Nova Scotia)
- Tidenhub in der Bucht bis max. 21 m
- Gezeitenkraftwerk **Annapolis**:
 $P_N = 17.8$ MW Leistung,
Stauung des Wasser:
Nennhub $H = 5.5$ m,
- Ebbstromablauf $378 \text{ m}^3/\text{s}$
über eine *Kaplan*-Turbine:
7.6 m Laufraddurchmesser
- **Einseitig wirkendes** Kraftwerk
- Wirkungsgrad: 87.3%

$$\begin{aligned} P_N &= \eta_{KW} \cdot \gamma_{H_2O} \cdot g \cdot \dot{V} \cdot H = \\ &= 0.873 \cdot 1000 \cdot 9.81 \cdot 378 \cdot 5.5 = \\ &= 17.8 \text{ MW} \end{aligned}$$



Quelle: de.wikipedia.org [online]



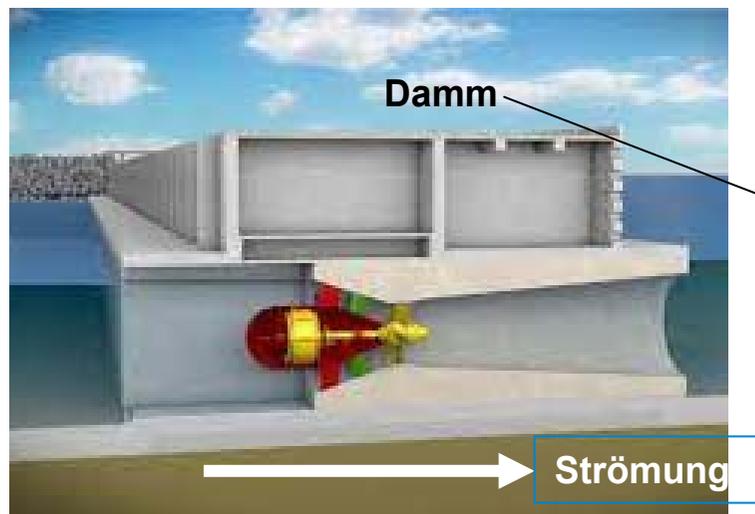
R5.1 Tidenhubnutzung

Gezeitenkraftwerke – Projekt in Planung (2022)

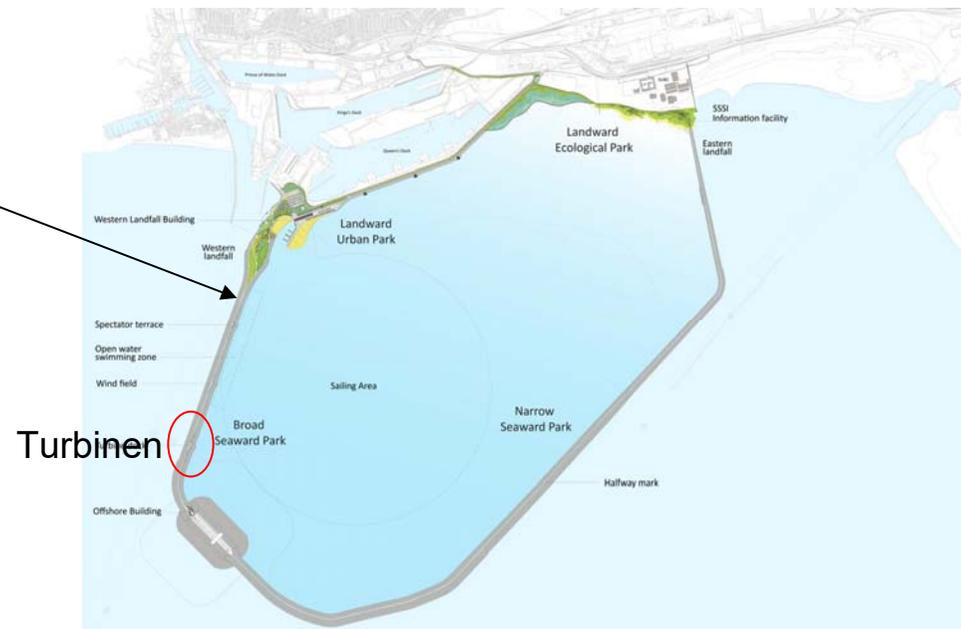
- Gezeitenkraftwerk (Nutzung potentieller Energie): *Swansea Bay / England:*

- 9.5 km Dammlänge zum Abtrennen der Bucht vom Meer
- 16 Kaplan-Rohrturbinen (je 20 MW)
- $P_N = 320$ MW
- Projektplanung weitgehend fortgeschritten
- Realisierung ev. durch private Investoren

Quelle: walesonline.co.uk 2020



Geplante *Kaplan-Rohrturbine*



Quelle: *Andritz Hydro, Austria*

R5.2 Meeresströmung

Nutzung der Gezeitenströmung in Meerengen (1)

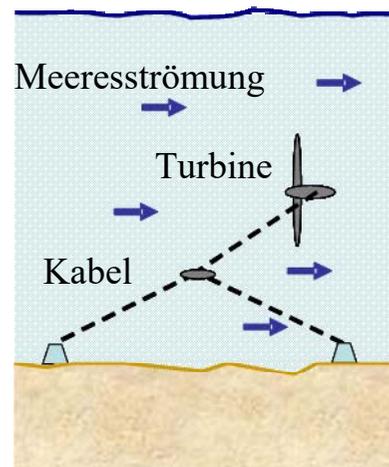


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- **Meeresströmungskraftwerk:**

- Wasserkraftwerk, das aus der natürlichen Meeresströmung Elektrizität erzeugt.
- Es wird kein Stauwerk errichtet, sondern die Turbine steht frei in der Strömung.
- Tidenhub führt in Meerengen zu **erhöhter Gezeiten-Wasserströmung**
- **Nutzung der Gezeiten-Wasserströmung** (kinet. Energie) durch Unterwasser-Turbinen
- Nur ausgewählte Standorte (Meerengen) für diese Energienutzung weltweit verfügbar

Am Meeresboden
kabelvertäute
Propellerturbine



Quelle: Wikipedia



R5.2 Meeresströmung

Nutzung der Gezeitenströmung in Meerengen (2)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Beispiele:
 - a) Ärmelkanal
 - b) Meerenge zwischen *England* und *Irland*
 - c) Küstengebiet vor *Korea*
- Es wird die **kinetische Energie der Meeresströmung** teilweise genutzt.
- Energienutzung **analog zur Windenergienutzung**, aber wegen ca. 800-fach höherer Wasserdichte gegenüber Luftdichte **deutlich kleinere Turbinenabmessungen!**



Quelle: *Energieleben* Redaktion 2015,
Bild: *Atlantis resources* (Turbinenhersteller)



R5.2 Meeresströmung

Meeresströmung - Turbinenabmessungen

- Maximal auf die Turbine übertragene Strömungsleistung (**Betz'sche Formel**):

$$P_{T,\max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{A \cdot \gamma \cdot v^3}{2}$$

		Meeresströmung:	Windströmung:
Strömungsgeschwindigkeit	v	4 m/s	12 m/s
Fluidichte	γ	Wasser 1000 kg/m ³	Luft 0°C: 1.29 kg/m ³
Erforderliche Turbinenfläche (bei gleicher Leistung P_T)	A	3.5%	100%

- **Beispiel:** $P_T = 1 \text{ MW}$

Wind: $\gamma_L = 1.29 \text{ kg/m}^3, v = 12 \text{ m/s} \Rightarrow A = 1514 \text{ m}^2 = D^2 \pi / 4, D = 45 \text{ m}$

Meeresströmung: $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ kg/m}^3, v = 4 \text{ m/s} \Rightarrow A = 53 \text{ m}^2 = D^2 \pi / 4, D = 8.2 \text{ m}$

- Die Meeresströmungsturbinen sind bei ähnlicher Bauart **deutlich kleiner** als die Windturbinen gleicher Leistung!

R5.2 Meeresströmung

Gezeitenstromkraftwerk

- Prototypanlage „*Seaflow*“ vor der britischen Westküste
- Nutzung des Gezeitenstroms
- Technische Daten:

$$P_N = 300 \text{ kW} \quad n_N = 15 \text{ min}^{-1}$$

$$D_{\text{Rotor}} = 2.5 \text{ m}$$

$$P_{T,\text{max}} \left(v = 5.9 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = \frac{16}{27} \cdot \frac{A \cdot \gamma \cdot v^3}{2} =$$
$$= \frac{16}{27} \cdot \frac{2.5^2 \pi}{4} \cdot \frac{1000 \cdot 5.9^3}{2} =$$
$$= 300 \text{ kW}$$



Quelle: V. Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme*

- Rotorblätter **um 180° verstellbar**, um die entgegengesetzten Meeresströmungen von Ebbe und Flut zu nutzen
- **Turbinenwartung:**
Rotor wird hydraulisch am Turm bis über den Wasserspiegel hoch gefahren

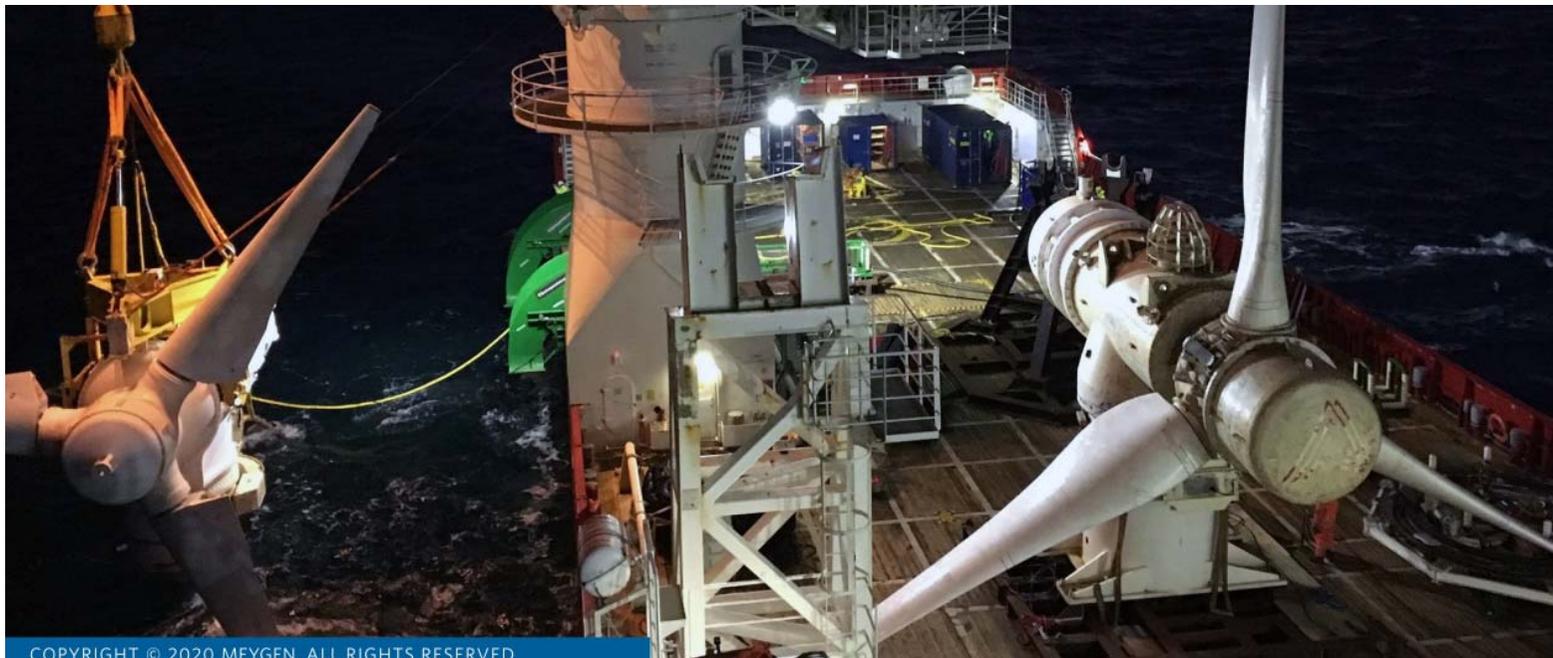
R5.2 Meeresströmung

Gezeitenstromkraftwerk – *Projekt MeyGen*

- Gezeitenströmungskraftwerk nutzt kinetische Strömungsenergie:
MeyGen-Projekt, Pentland Firth, Schottland

- Kein Damm, sondern Unterwasser-Turbinen:
Direkte Nutzung der **Gezeitenströmung**
- Seit 2017: 4 Unterwasserturbinen je 1.5 MW: $4 \times 1.5 = 6$ MW in Betrieb
- ca. 2800 Volllaststunden
- Weiterer Ausbau in Planung: 269 Turbinen = $1.5 \times 269 = 398$ MW

Quelle: *Thetys.pnnl.gov 2021*



COPYRIGHT © 2020 MEYGEN. ALL RIGHTS RESERVED.

R5.3 Meereswellen

Wellenenergie - Grundlagen

Herleitung

- Kinetische Energie eines Teilchens (Masse m):

Wellenkamm: $W_{k,K} = m \cdot (v_{ph} - v)^2 / 2$

Wellental: $W_{k,T} = m \cdot (v_{ph} + v)^2 / 2$

- Potentielle Energie eines Teilchens (Masse m):

Wellenkamm: $W_{p,K} = m \cdot g \cdot 2h$

Wellental: $W_{p,T} = 0$

$$\Delta W_k = W_{k,T} - W_{k,K} = 2 \cdot m \cdot v_{ph} \cdot v = \Delta W_p = m \cdot g \cdot 2h$$

$$v = g \cdot h / v_{ph}$$

$$\omega = \frac{v}{h} = \frac{g}{v_{ph}}$$

- Kreisbahn-Winkelgeschwindigkeit $2\pi \cdot f = \omega$: $v = \omega \cdot h$

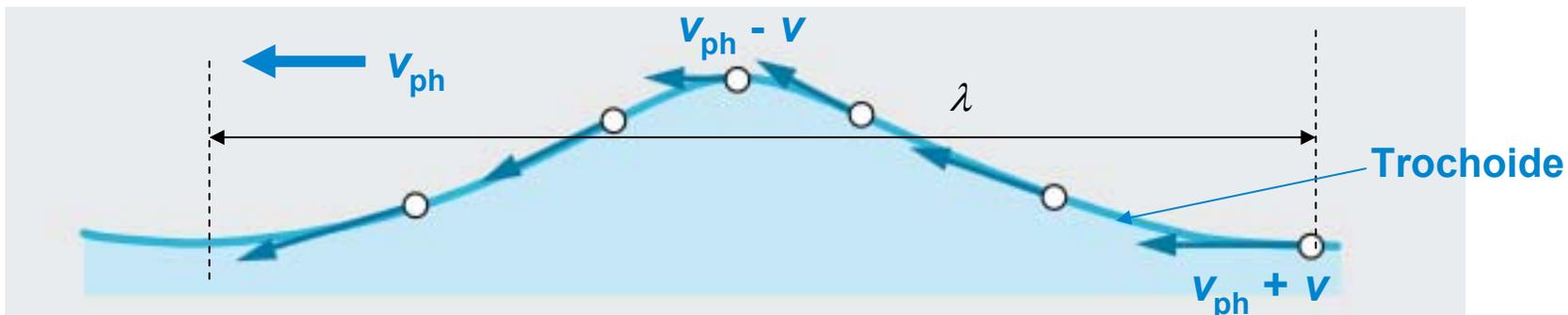
- Wellenlänge λ : $v_{ph} = \lambda \cdot \omega / (2\pi) \Rightarrow \lambda = 2\pi \cdot v_{ph}^2 / g$ Dispersion: $\lambda = f(v_{ph})$

- Phasengeschwindigkeit:

$$v_{ph} = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi}}$$

„Normale“ Wellendispersion:

Lange Wellen ($\lambda \uparrow$) laufen schneller ($v_{ph} \uparrow$) als kurze!



Quelle: Gerthsen, Physik



R5.3 Meereswellen

Wellenenergie - Grundlagen

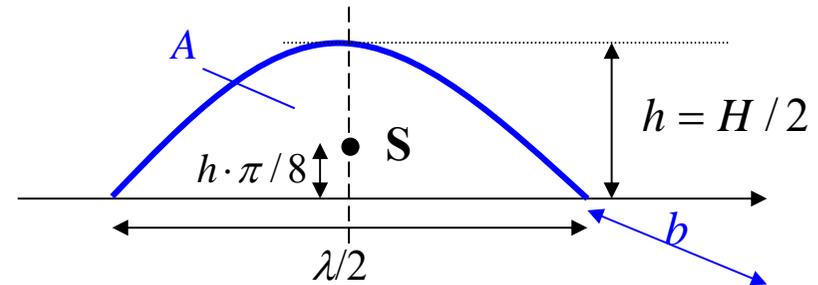
Herleitung

- **Wellenleistung P:** Energiemenge, die je Wellenperiode umgesetzt werden kann.

- Trochoide durch Sinusfunktion angenähert:
Masse im Schwerpunkt S konzentriert wirkend

- Wellenfrontbreite b , Wellenbergfläche: $A = \frac{2}{\pi} \cdot h \cdot \frac{\lambda}{2}$

- Wellenbergmasse: $m = \gamma \cdot b \cdot A$



- **Potentielle Energie des Wellenbergs** gegenüber dem Wellental:

$$W_p = m \cdot g \cdot 2 \cdot (h \cdot \pi / 8)$$

- **Wellenleistung P:** Heben der Masse m in der Zeit der Wellenperiode: $T = 2\pi / \omega$

$$P = W_p / T = \gamma \cdot b \cdot \frac{2}{\pi} \cdot h \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot g \cdot h \cdot \frac{\pi}{4} / T = \gamma \cdot b \cdot \frac{2}{\pi} \cdot h \cdot g \cdot \frac{T^2}{4\pi} \cdot g \cdot h \cdot \frac{\pi}{4} / T = \gamma \cdot b \cdot \frac{h^2 \cdot g^2 \cdot T}{8\pi}$$

$$\lambda = v_{ph} \cdot T = \frac{g \cdot h}{v} \cdot T = \frac{g \cdot h}{\omega \cdot h} \cdot T = g \cdot \frac{T^2}{2\pi}$$

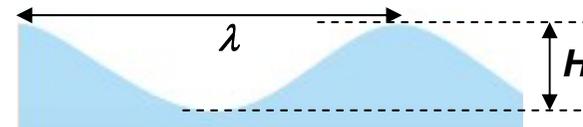
- **Wellenleistung je Wellenfrontlänge P/b:** Mit „Wellenhöhe“ $H = 2h$:

$$\frac{P}{b} = \gamma \cdot \frac{H^2 \cdot g^2 \cdot T}{32 \cdot \pi}$$



R5.3 Meereswellen

Beispiel: Wellenleistung



Wellenlänge $\lambda = 10$ m, Wellenhöhe $H = 1$ m:

Wellengeschwindigkeit: $v_{ph} = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi}} = \sqrt{\frac{9.81 \cdot 10}{2\pi}} = 3.95 \text{ m/s} = 14.2 \text{ km/h}$

Wellenperiode: $\omega = \frac{g}{v_{ph}} \Rightarrow \frac{1}{f} = T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{g} \cdot v_{ph} = \frac{2\pi}{9.81} \cdot 3.95 = 2.53 \text{ s}$

Wellenleistung: $\frac{P}{b} = \gamma \cdot \frac{H^2 \cdot g^2 \cdot T}{32 \cdot \pi} = 1000 \cdot \frac{1^2 \cdot 9.81^2 \cdot 2.53}{32 \cdot \pi} = 2.42 \text{ kW/m}$

Bei $b = 40$ m: $P = 40 \cdot 2.42 = 97 \text{ kW}$

Bei einem Gesamtwirkungsgrad $\eta_{KW} = 45\%$: El. erzeugte Leistung:

$$P_N = \eta_{KW} \cdot P = 0.45 \cdot 97 = 43.4 \text{ kW}$$

Langwellige Wellen liefern bei gleicher Wellenhöhe mehr Energie als kurzwellige Wellen, da sie schneller laufen (= öfter eintreffen). $\frac{P}{b} \sim \sqrt{\lambda}$

R5.3 Meereswellen

Wellenenergie – Nutzungsprinzip „Schwimmer“

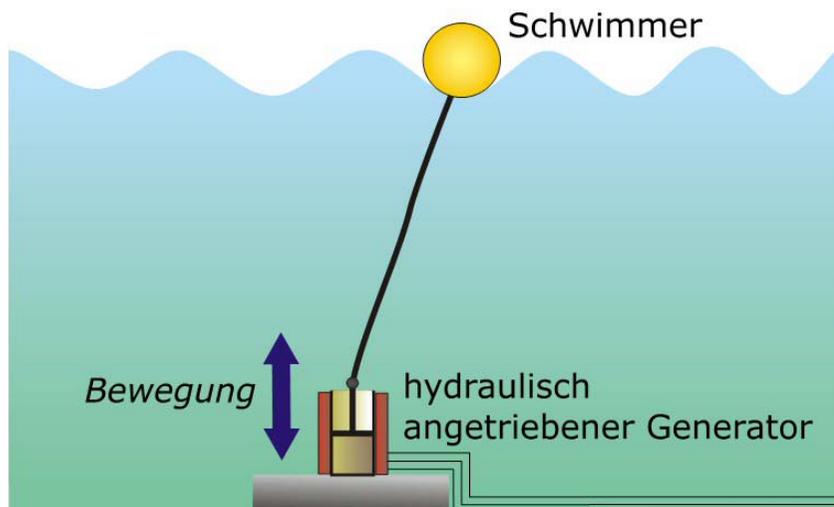


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

▪ „Schwimmer“-System:

- Direkte Nutzung der potentiellen Energie der Wellenberge ($\eta = P_{el} / P_{in} \approx 25 \dots 40\%$)
- „Schwimmer“ folgt durch Auftriebskraft der Wellenbewegung

Projekt *Pelamis* (Portugal)



Quelle: V. Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme*

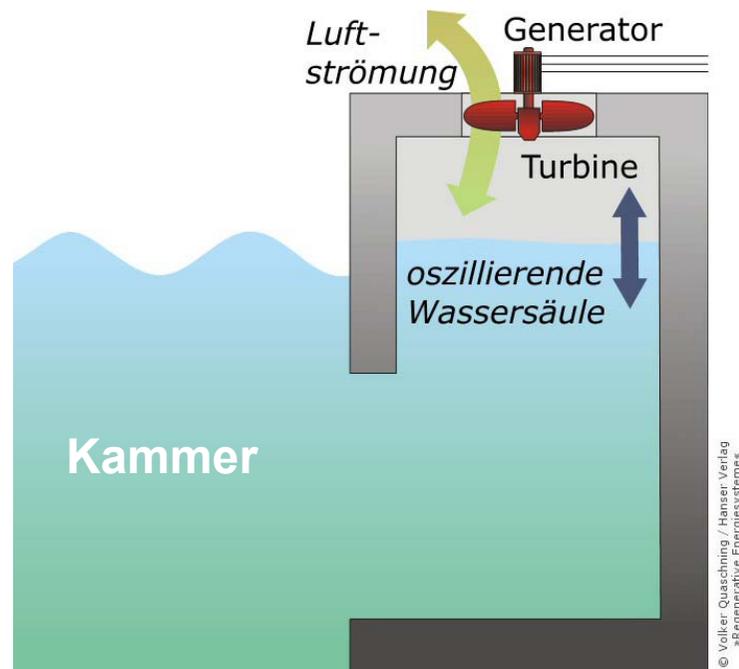


R5.3 Meereswellen

Wellenenergie: Nutzungsprinzip Kammersystem (OWC oscillating water column)

Kammersystem: z.B.: *Mutriku/Spanien*: 16 Wells-Turbinen, gesamt 300 kW;
Oahu/Hawaii: 1.25 MW-Prototyp 12 Mio. US-\$.

- Lufteinschluss in Kammer, veränderliche Wellenhöhe \Rightarrow Luft-Kompression/-Expansion
- Luft strömt mit wechselnder Strömungsrichtung über eine *Wells-Turbine*
- „**Wells-Turbine**“: Wird in beide Strömungsrichtungen mit derselben Drehrichtung durch Luftströmung angetrieben



Quelle: V. Quaschnig,
Regenerative Energiesysteme

R5.3 Meereswellen Wells-Turbine – Prinzip (1)

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

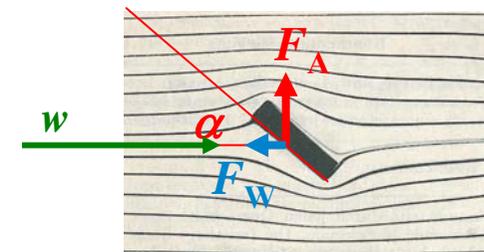
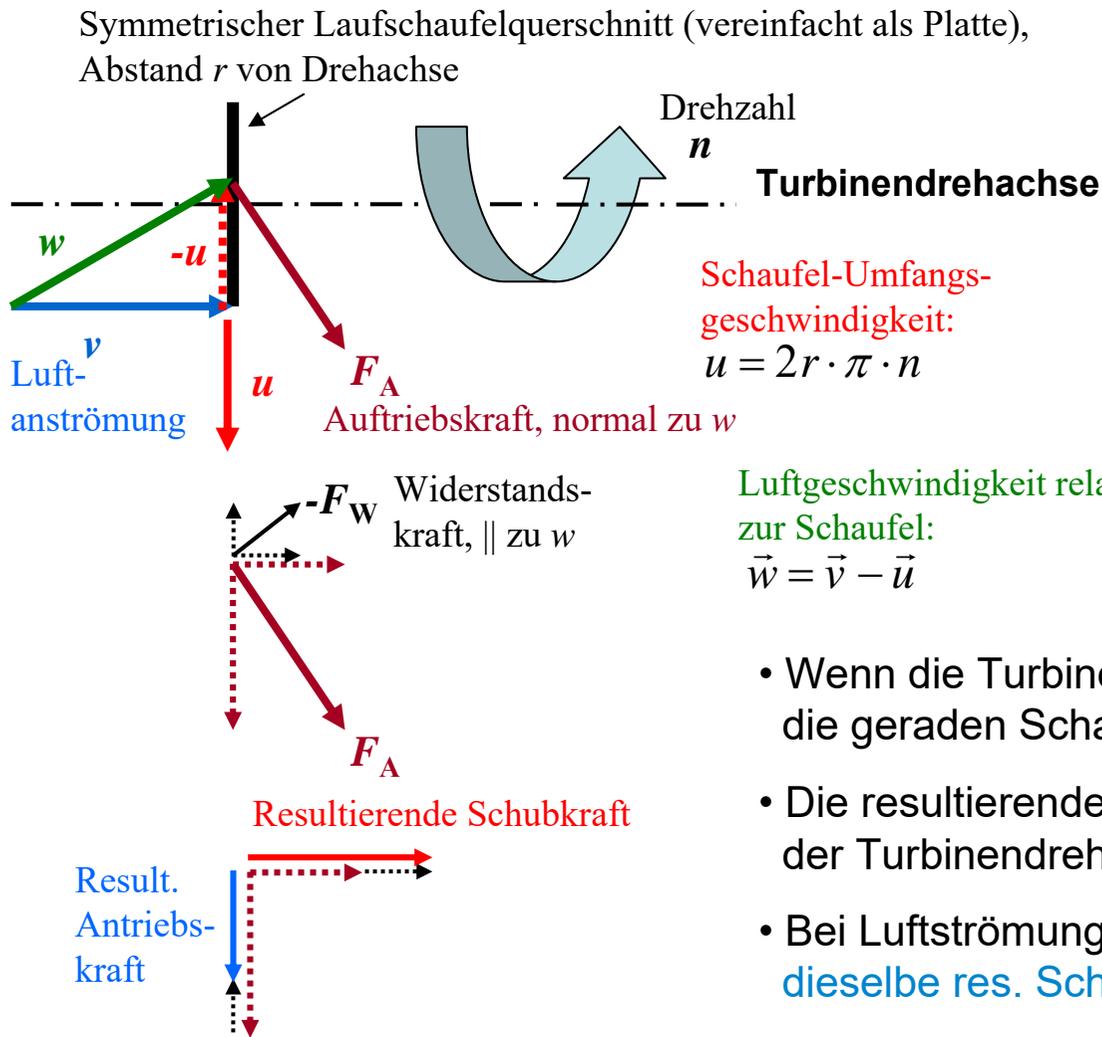
- **Wells-Turbine:**
(1988, *Alan Wells, Belfast*):
Arbeitet ohne Ventilklappen mit EINER Drehrichtung $n > 0$
für **beide** Durchströmungsrichtungen v und $-v$
- **Unbewegliche** Schaufeln mit symmetrischem Flügelprofil;
Flügelfläche senkrecht zur Strömungsrichtung
- Deshalb: **Wirkungsgrad (0.4 ... 0.7) kleiner** als bei Turbinen
für EINE Strömungsrichtung $n > 0$ und $v > 0$ mit asymmetrischen Flügeln.
- KEIN Selbstanlauf:
Zum Anlaufen muss der Generator motorisch arbeiten („Anwerfen“ der Turbine)!



R5.3 Meereswellen

Wells-Turbine – Prinzip (2)

Ergänzung



Auftriebs- und Strömungswiderstandskraft einer schräg angeströmten Platte

Quelle: Schreiner, J.: Physik, 1971

- Wenn die Turbine „angeworfen“ wird, werden die geraden Schaufeln mit w schräg angeströmt!
- Die resultierende Schubkraft wirkt in Richtung der Turbinendrehrichtung = **Antrieb der Turbine!**
- Bei Luftströmungsumkehr $-v$ ergibt sich **dieselbe res. Schubkraft** für die Drehzahl n !



R5.3 Meereswellen

Beispiele für KW-Prototypen zur Wellenenergie



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

1) Kammersystem OWC:

1a) *Fa. Ocean Energy, Ireland:*

Oahu/Hawaii, USA, mit Wellenhöhen bis $H = 20$ m: Langzeittest einer Prototypanlage:

1250 kW, 826 t, Invest: 12 Mio. US-\$

Wells-Turbine (Fa. Siemens, Typ „HydroAir“): Wirkungsgrad max. 80%

1b) *Fa. Voith Siemens Hydro, D:*

Mutriku/Spanien: 16 x 18.5 kW *Wells-Turbinen* = 296 kW, Invest: 6.4 Mio. Euro;
Von 2011 ... 2019 kommerzieller Betrieb; aber unrentabel, daher beendet!

2) Schwimmersystem:

2a) *Fa. Sinn Power, München, D:*

Standort *Heraklion, Kreta/GR:* Langzeittest von vier kleinen Prototypanlagen.

2b) *Fa. Nemos, Duisburg, D:*

Standort *Ostende, Belgien:* Regelmäßige Wellenhöhen ca. $H = 1.5 \dots 2$ m:
Langzeittest einer Prototypanlage: 70 kW, Wirkungsgrad ca. 50%

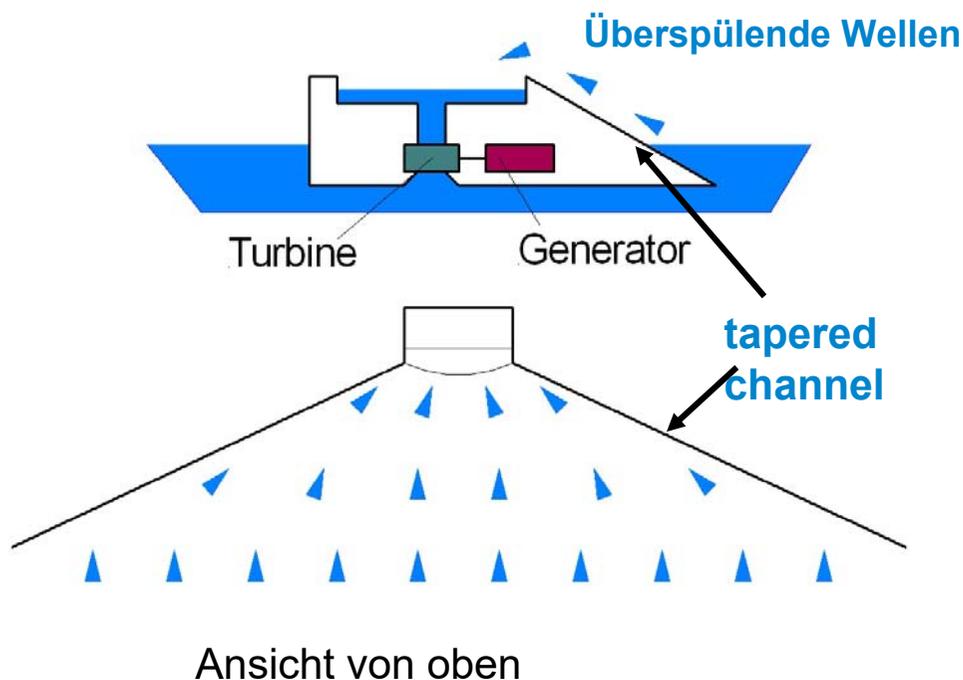
Quelle: vdi-nachrichten 20.3.2020



R5.3 Meereswellen Nutzungsprinzip - Überspülende Wellen

TapChan (tapered channel) = Überspülende Wellen

- Spitz zulaufender, ansteigender Kanal, der ein Oberbecken speist
- Nutzung des aus dem Oberbecken ablaufenden Wassers über Turbine
- EU-Projekt 2003 ... 2007, wg. geringen Erfolgs eingestellt



Projekt *WaveDragon*, Dänemark



Quelle: Wikipedia

R Ressourcen

R5. Meeresenergie

Zusammenfassung

- **Meeresenergie:**
 - Große Energiemengen, die aber auch für das Erdklima fundamental wichtig sind (z. B. warmer **Golfstrom** von der *Karibik* bis *Norwegen*)
 - Ca. 2.5% der Sonneneinstrahlung ($1.38 \cdot 10^{23}$ J/a) in **Wind, Wellen und Meeresströmung**
- **Gezeitenenergie** v. a. aus Mondbewegung um die Erde: $9.38 \cdot 10^{19}$ J/a
 - **Gezeitenkraftwerke** mit Stauwerken sind Stand der Technik (Gezeitenhöhe > 5 m erwünscht)
 - **Gezeitenströmungskraftwerke** als Pilotprojekte in Erprobung
 - ABER: Begrenzte Anzahl von geeigneten Standorten!
- **Meereswellenenergie:** Forschungsprojekte, kein großtechnischer Einsatz
 - Sturmgefährdung \Rightarrow häufig durch zu große Wellen zerstört
 - Für die weltweite Nutzung der el. Energie haben
 - a) Gezeitenkraftwerke nur eine **kleine** Bedeutung,
 - b) Meereswellen z. Zt. gar **keine** Bedeutung!

R Ressourcen

R6. Erdöl



1. **Energieträger: Reserven und Ressourcen**
2. **Sonnenenergie**
3. **Wasserkraft**
4. **Windkraft**
5. **Meeresenergie**
6. **Erdöl**
7. **Erdgas**
8. **Steinkohle**
9. **Braunkohle**
10. **Kernbrennstoffe**
11. **Erdwärme**
12. **Biomasse**
13. **Energieströme**



R6 Erdöl

Übersicht



1. Grundlagen (siehe auch Kapitel G: „Grundlagen“)
2. Entstehung fossiler Energieträger
3. Vorkommen weltweit und in *Deutschland*
4. Erdölförderung weltweit
5. Erdölverbrauch in *Deutschland*



R6 Erdöl

R6.1 Grundlagen

- **Erdöl** ist ein in der oberen Erdkruste eingelagertes, hauptsächlich aus **Kohlenwasserstoffen (C-H) (meist Alkane)** bestehendes Stoffgemisch.
- Es ist entstanden aus Ablagerungen von tierischer und pflanzlicher Biomasse in den Urmeeren, die durch Druck und Temperatur umgewandelt wurden.
- Die Erdölmoleküle des geförderten **Rohöls** sind unterschiedlich lange (folglich unterschiedlich schwere) **Kohlen-Wasserstoff-Ketten (C-H-Ketten)**.
- **Erdöl: Weltweit wichtigster Primärenergieträger:**
 - Ca. 30 % des Weltenergiebedarfs,
 - Größter „Verbraucher“: Straßenverkehr: ca. 44%, (2020)

R6 Erdöl

R6.1 Grundlagen

- In **Raffinerien** wird durch **fraktionierte Destillation** das Rohöl in die Teile mit leichteren und schwereren Molekülen zerlegt (= kürzere u. längere C-H-Ketten):

Aus **100% Rohöl** nach Abzug von Umwandlungsverlusten entstehen:

Flüssiggase (Propan, Butan)	ca. 3%
Rohbenzin (Naphta, Cycloalkane)	ca. 9%
Benzin (<i>Otto</i> -Kraftstoff)	ca. 24%
Kerosin (Flugbenzin)	ca. 4%
Heizöl leicht (Diesel-Kraftstoff)	ca. 20%
Heizöl schwer	ca. 11%
Bitumen, Schmierstoffe, ...	ca. 5%

**Zunehmende Molekülmasse
bzw. C-H-Kettenlänge**



R6.1 Erdöl - Grundlagen

Brennwert H_s



- **Brennwert eines Brennstoffs H_s : („oberer Heizwert“)**
Gibt die chemisch gebundene Energie (Reaktionsenthalpie H) an,
die bei der
A) Verbrennung und
B) anschließender Abkühlung der Verbrennungsgase auf 25 °C **sowie**
C) **durch deren Kondensation** freigesetzt wird.
- Brennwert berücksichtigt auch
 - a) notwendige Energie zum Aufheizen der Verbrennungsluft,
 - b) die Abgasenergie,
 - c) **Kondensationsenthalpie ΔH_k** der bei der Abkühlung kondensierenden Flüssigkeiten
(z. B.: bei wasserstoffhaltigen Brennstoffen: Wasserbildung).



R6.1 Erdöl - Grundlagen

Heizwert H_i

- **Heizwert H_i :** („unterer Heizwert“)

Gibt die bei der

A) Verbrennung und

B) anschließenden Abkühlung auf die Ausgangstemperatur des brennbaren Gemisches frei werdende Energie an, wobei z. B. das Verbrennungswasser noch gasförmig vorliegt.

- Heizwert H_i wasserstoffreicher Brennstoffen

ist **um den Betrag der Kondensationsenthalpie ΔH_k**

des vorliegenden Wasserdampfs **geringer** als Brennwert:

$$H_i = H_s - \Delta H_k$$

R6.1 Erdöl - Grundlagen

Verbrennungswärme von Heizöl



Typischer Brennwert H_s von Heizöl: **ca. 44 MJ/kg**

Heizwert H_i von Heizöl: **ca. 42 MJ/kg**

Öl: Dichte: ca. 0.85 kg/l: $H_i =$ ca. 9.9 kWh/l

Maßeinheit: **Oil equivalent OE**: 1 kg OE = 41 868 kJ



R6.1 Erdöl - Grundlagen

Anwendungsbeispiel: Brennwertkessel



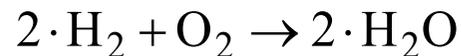
▪ **Verbrennungsprozess von Kohlenwasserstoffen**

(z. B. Erdgas, Erdöl, tw. auch Biomasse wie Holz):

Es entsteht bei der Verbrennung neben CO_2 durch die Verbindung von

a) Sauerstoff O_2 aus der Verbrennungsluft und

b) Wasserstoff H_2 aus dem Brennstoff → **Wasserdampf H_2O .**



- Die **im Wasserdampf** und damit im Abgas **enthaltene Energie** geht bei herkömmlicher Technik über die heißen Abgase durch den Kamin verloren.

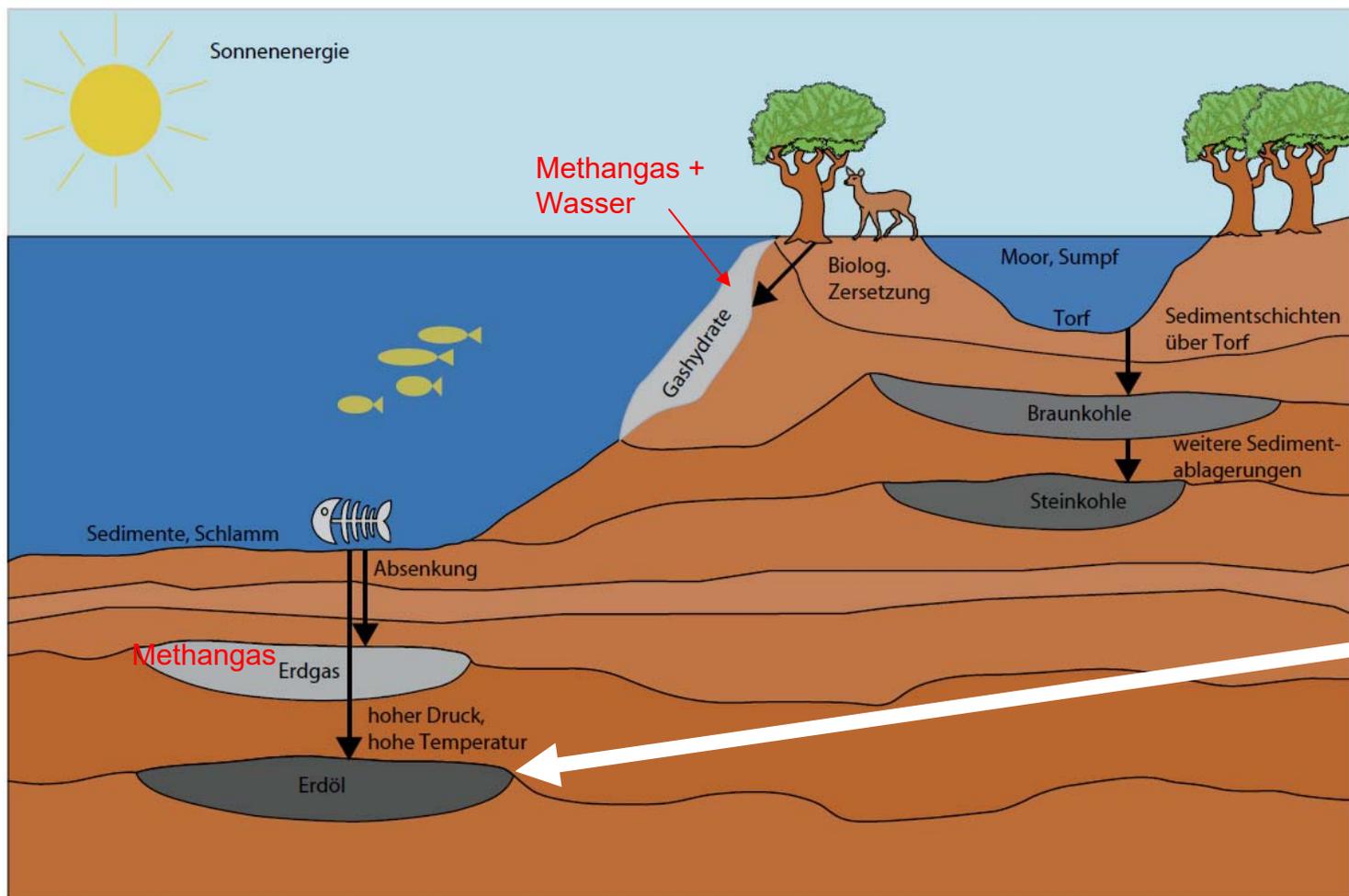
▪ **Brennwertkessel:**

- Der im Abgas enthaltene Wasserdampf wird über einen Wärmeübertrager kondensiert.
- Die im Abgas enthaltene Kondensationswärme ΔH_k wird weitgehend **zurück gewonnen.**



R6 Erdöl

R6.2 Entstehung fossiler Energieträger



Erdölmuttergesteine zumeist aus Unter-Devon bis Unter-Kreide: vor 400 ... 100 Millionen Jahren

Erdöl und Erdgas:
In kleinen Poren von Gesteinen in der Erdkruste gespeichert.

Quelle: M. Sterner, *Energiespeicher*

R6 Erdöl

R6.3 Vorkommen und Förderstaaten



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- **Konventionelles Erdöl:** Lagerstätten mit selbst fließfähigem Öl (Tiefen bis 7000 m)
 - a) Unter eigenem Druck sind bis zu 30 % der Vorräte gewinnbar
 - b) Bei künstlich erhöhtem Druck sind 50 % der Vorräte gewinnbar

- **Nicht konventionelles Erdöl:**

Schwerstöl:	Nicht von selbst fließfähiges („zähes“) Öl
Bitumen / Ölsand (Teersand):	Gemenge aus Sand, Öl, Wasser
Schieferöl („Fracking-Öl“):	Im Muttergestein eingeschlossenes Erdöl (Förderung durch Hydraulic Fracturing)
Ölschiefer:	Sedimentgestein, das ca. 20 ... 30 % Kerogen (eine Vorstufe von Erdöl) enthält

Quelle: *Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau*

- **OPEC: Organization of Petroleum Exporting Countries,**
(1960 gegründet) als Organisation erdölexportierender Länder
OPEC-Mitgliedstaaten: Ca. 40% der weltweiten Erdölförderung,
verfügen über **77% der weltweiten** Erdölreserven



R6.3 Potentiale und Nutzung

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Weltweite Erdöl-Reserven/Ressourcen 2020

in Gt = 10 ⁹ Tonnen	<u>Reserven</u>	<u>Ressourcen</u>	<u>Ressourcen</u>	
		Öl konventionell	Öl nicht konventionell	
N-Amerika	36	25.9	157.3	
S-Amerika	51	24.7	51.7	
Afrika	17	28	10.6	
Europa	1.7	4.7	5	
Naher Osten	113	30.5	6.1	
GUS	20	72.3	29.9	
Asien/Australien	6.3	24.5	30	
Summe	245	210.6	290.6	(Stand 2020)

Weltweite Förderung 2020: 4.16 Gt

Reichweite:

$$\text{a) Reserven: } \frac{245 \text{ Gt}}{4.16 \text{ Gt/a}} = 59 \text{ a}$$

$$\text{b) Ressourcen: } \frac{501.2 \text{ Gt}}{4.16 \text{ Gt/a}} = 120.5 \text{ a}$$

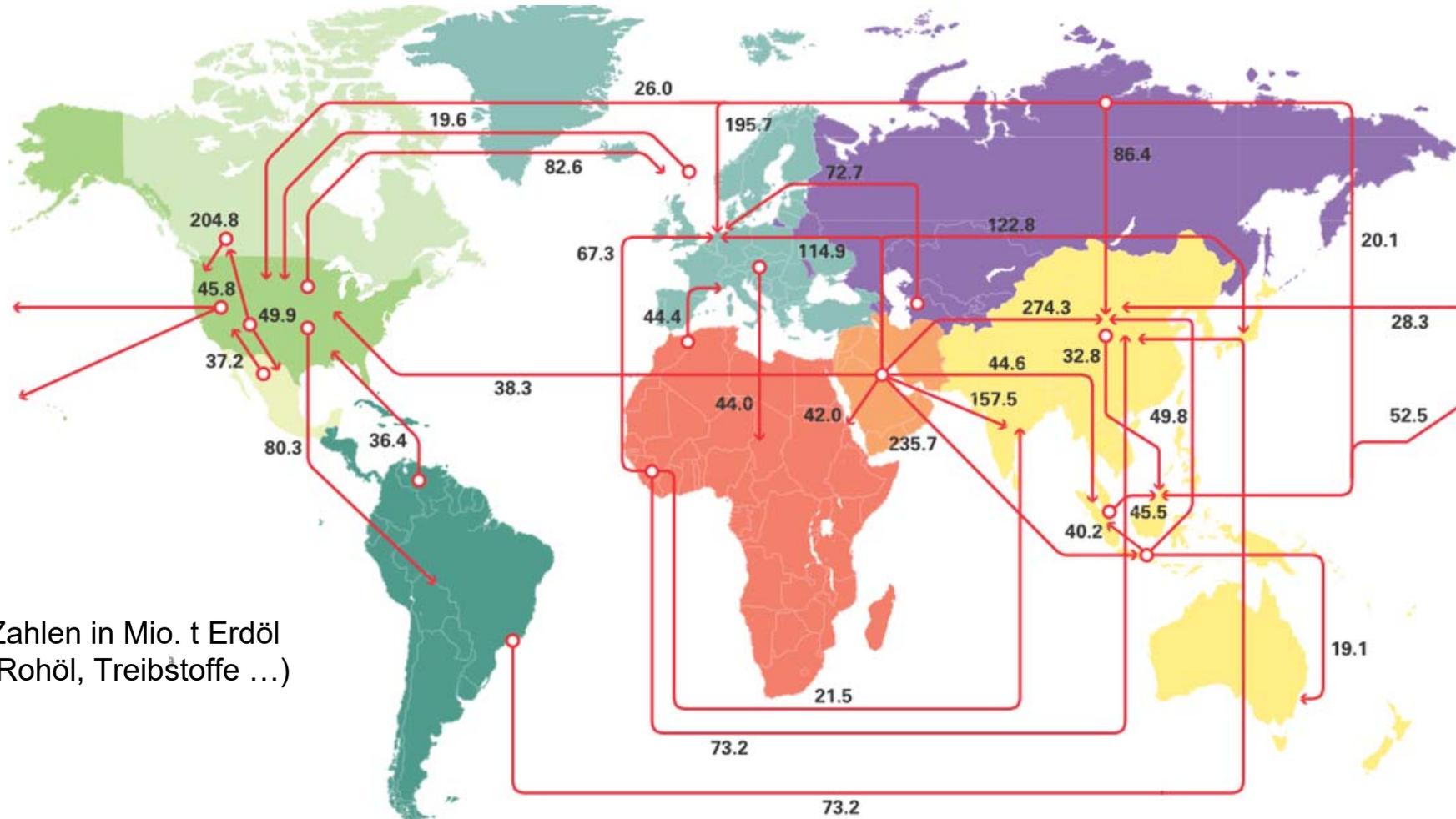
$$210.6 + 290.6 = 501.2$$

Quelle: BGR Energiestudie 2021



R6.3 Potentiale und Nutzung

Weltweite Erdöl-Transportströme, Mio. t, 2021



- Zahlen in Mio. t Erdöl (Rohöl, Treibstoffe ...)

Quelle: BP Statistical Review of World Energy 2021

R6.3 Erdöl - Vorkommen

Vorkommen in *Deutschland*, 2020



◆ Geographische Lage von Erdölfeldern im Raum:

- Hannover
- Emsland
- Weser-Ems-Gebiet
- Schleswig-Holstein
- Alpenvorland
- Oberrheintal (z. B. Hessisches Ried)

◆ **Inlandförderung:** 1.9 Mio. t/a
ca. 2% des Inland-Erdölverbrauchs!

◆ **Inlandsverbrauch:** 93.7 Mio. t/a

◆ **Reserven/Ressourcen:** 18 / 240 Mio. t

Quelle: BVEG: Bundesverband Erdgas, Erdöl, Geoenergie,
2018 (in: vdi nachrichten, 27.4. 2018 & 20.3.2020)
& BGR Energiestudie 2021

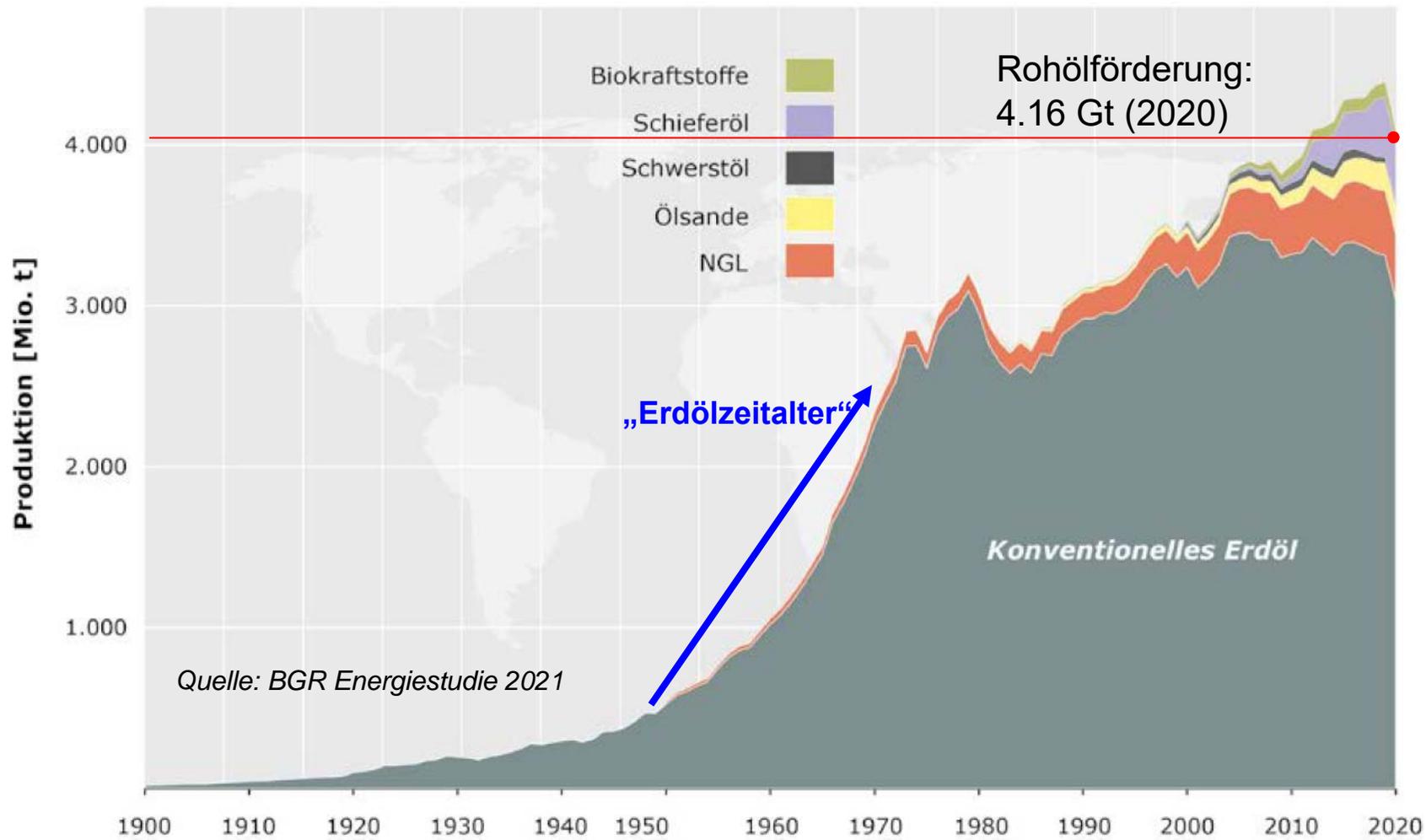
● Gasfeld

● Ölfeld

Quelle: Deutsches Erdölmuseum [online]

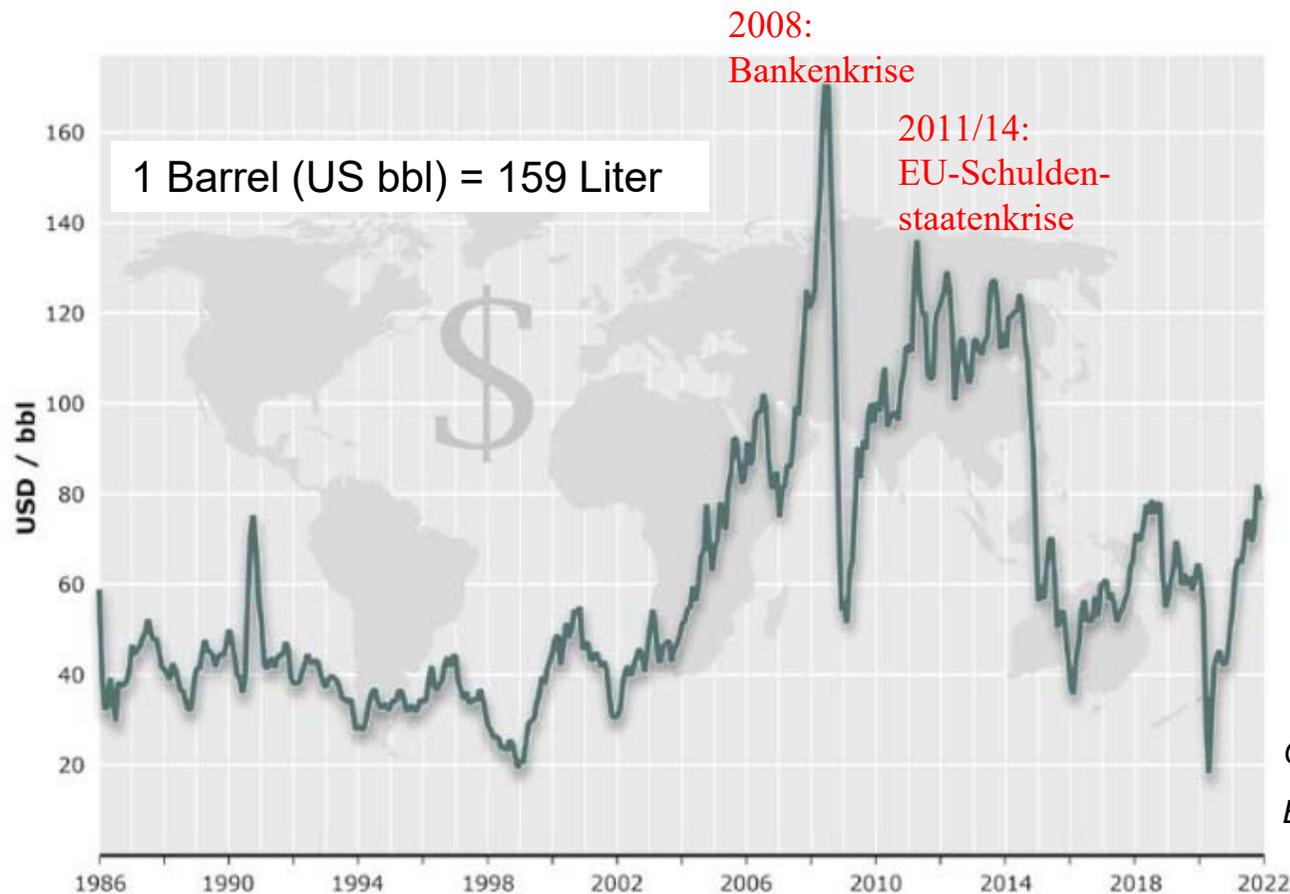
R6.4 Erdölförderung weltweit

Erdölförderung weltweit 1900 ... 2020



R6.4 Erdölförderung weltweit

Preis Rohöl inflationsbereinigt 1986 ... 2022



Quelle:
BGR Energiestudie 2021

WTI: West Texas Intermediate: „Süßes“ (= schwefelarmes) Rohöl aus USA

Brent: Rohöl u. a. aus dem Ölfeld *Brent* (Nordsee)

R6.4 Erdölförderung weltweit Risiken bei der Nutzung

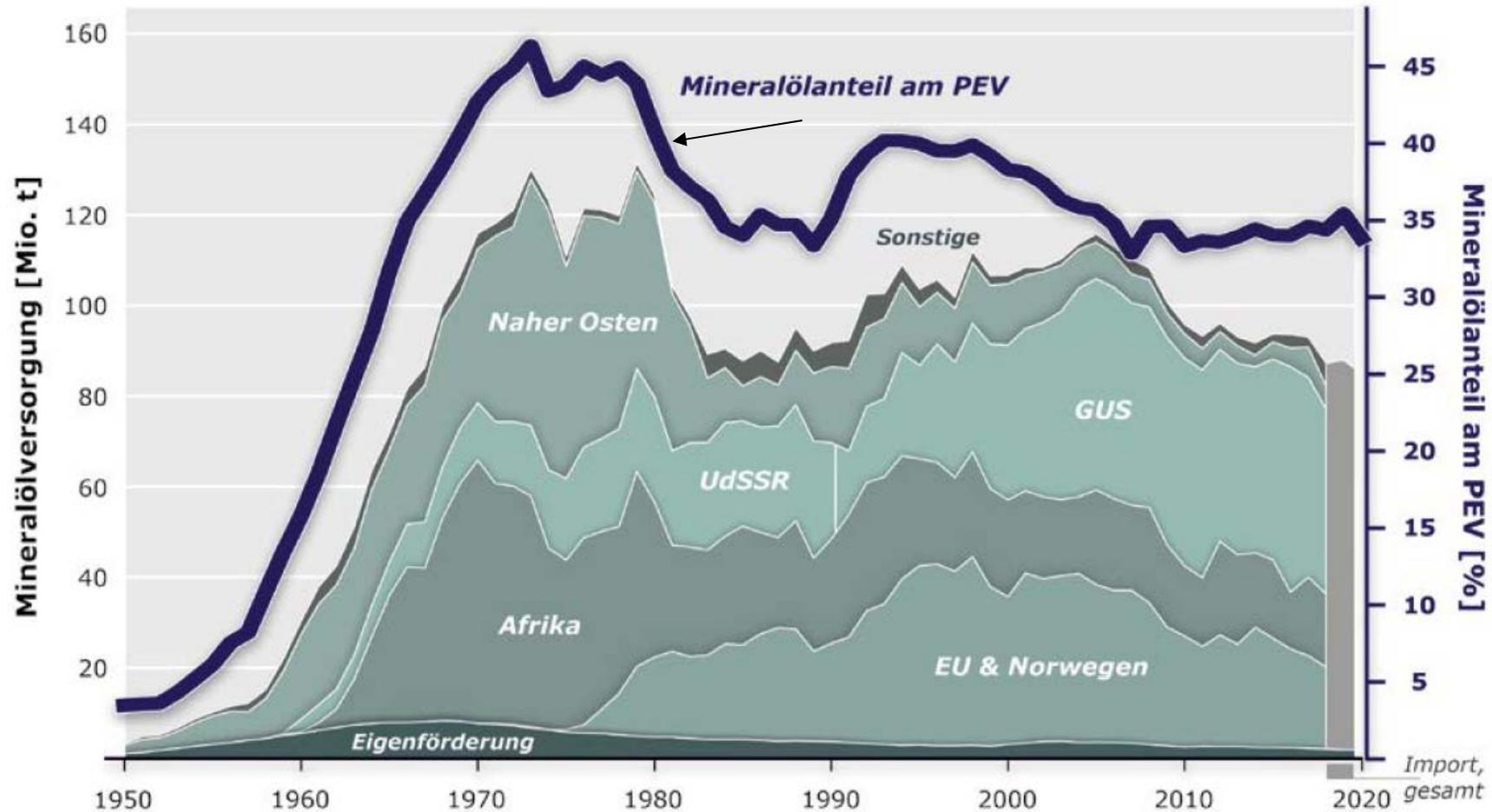
- Erdöl: Mittlere Dichte: $\gamma_{\text{öl}} = \frac{m}{V} = ca. 0.85 \text{ kg/l} < 1 \text{ kg/l} = \gamma_{\text{H}_2\text{O}}$
- Erdöl **leichter als Wasser**, schwimmt auf der Wasseroberfläche:
„Ölteppiche“ bei Havarien \Rightarrow „Ölpest“
z. B: 1989, Tankerunglück *Exxon Valdez*, Küste *Alaskas*
2010, Ölbohrplattform *Deepwater Horizon*, *Golf von Mexiko*
(eine der schwersten Umweltkatastrophen dieser Art)
- Wenige Tropfen Öl verunreinigen bereits merkbar 1 m³ Grundwasser!

ABER: Bei einem weltweiten Energiebedarf von 600 EJ/a (2020) ist der
Anteil des Erdöls am weltweiten Energieverbrauch HOCH: knapp 30%!

Fazit: Erdöl bleibt weltweit mittelfristig wichtigster Primärenergieträger!

R6.5 Erdölverbrauch in *Deutschland*

- Mineralölversorgung nach Herkunft;
- Anteil am Primärenergieverbrauch (PEV): 1950 ... 2020



Quelle: BGR Energiestudie 2021



R Ressourcen

R6. Erdöl

Zusammenfassung

- Erdöl ist **fossiler Energieträger**, dient als **wichtigster Energieträger (Welt/Deutschland)**
 - a) als Treibstoff fast aller Verkehrs- und Transportmittel,
 - b) zu Heizzwecken,
 - c) für chemische Industrie (Kunststoffherstellung, Chemieprodukte),
 - d) zur Erzeugung von Elektrizität.
- Bezeichnung „**Schwarzes Gold**“ ⇒ Große Bedeutung für die **weltweite Politik** (z. B. Kriege um Erdölgebiete)
- **Erdöl-Preiskrisen** ⇒ Auswirkung auf Weltwirtschaft
- Erdöl: Hoher Nutzungsgrad in D / weltweit: Ca. 34% / 30.2% des Primärenergieverbrauchs
- **ABER: Deutschland**: Mehr als doppelt so hoher pro-Kopf-Verbrauch wie „Welt“ (**2.3-fach**)
- „Fracking“ in D nicht genehmigungsfähig ⇒ deutsche Förderfirmen investieren zunehmend im Ausland, weil dort die Reglementierungen geringer sind
- **Begrenzte Weltreserven (ca. 55 Jahre)** ⇒ langfristig: Wechsel auf andere Energieträger nötig
- Zusätzlich: (Begrenzte) **Ressourcen**: **ABER** deutlich teurer!

R Ressourcen

R7. Erdgas



1. Energieträger: Reserven und Ressourcen
2. Sonnenenergie
3. Wasserkraft
4. Windkraft
5. Meeresenergie
6. Erdöl
7. Erdgas
8. Steinkohle
9. Braunkohle
10. Kernbrennstoffe
11. Erdwärme
12. Biomasse
13. Energieströme



R7 Erdgas

Übersicht



1. Grundlagen (siehe auch Kapitel G: „Grundlagen“)
2. Erdgasvorkommen
3. Nutzung
4. Erdgasförderung weltweit
5. Erdgasspeicher in *Deutschland*
6. Preisentwicklung für Erdgas



R7.1 Erdgas - Grundlagen

Was ist Erdgas?

- **Erdgas:**
 - Brennbares, natürlich entstandenes Gasmisch
 - Hauptsächlich hochentzündliches **Methan (CH₄)**
(CH₄ hat deutlich **höheres (28-faches) Treibhausgas-Potential als CO₂ !**)
 - Tritt in unterirdischen Lagerstätten häufig zusammen mit Erdöl auf
 - Ist auf ähnliche Weise wie Erdöl entstanden (fossiler Energieträger)
- **Siedepunkt:** Etwa der von Methan (-162 °C), also bei 20°C GAS-förmig
- Je nach Erdgastyp schwankt der Brennwert real (25 °C) zwischen
 $H_s = 30 \dots 50 \text{ MJ/kg}$ bzw. $25 \dots 35 \text{ MJ/m}^3$

R7.1 Erdgas - Grundlagen

Erdgas-Klassifizierung

- **„Trockenes“ Erdgas:** Mind. 80 ... 86 % CH₄

Zwei „trockene“ Erdgas-Arten:

a) H-Gas („high calorific gas“): Hoher Energiegehalt: Höherer Kohlenwasserstoffanteil

b) L-Gas („low calorific gas“): Niedriger Energiegehalt: Höherer Inertgasanteil

- **„Nasses“ Erdgas:** Enthält größere Anteile an „Flüssiggas“ (unter Druck):
Äthan (1 % ... 15 %), Propan (1 % ... 10 %), Butan, Äthen & Pentane

R7.1 Erdgas - Grundlagen

Erdgas-Klassifizierung: Beispiele

a) H-Erdgas aus GUS-Staaten:

98 % Methan,
1 % weitere Alkane (Äthan, Propan, Butan, Pentan),
1 % Inertgase

Brennwert $H_s = 40 \dots 50 \text{ MJ/kg}$, $\gamma = 0.7 \text{ kg/m}^3 (0^\circ\text{C})$

b) L-Erdgas (*Niederlande, N-Deutschland*):

85 % Methan,
4 % weitere Alkane,
11 % Inertgase

Brennwert $H_s = 30 \dots 36 \text{ MJ/kg}$, $\gamma = 0.84 \text{ kg/m}^3 (0^\circ\text{C})$

R7 Erdgas

R7.2 Erdgasvorkommen

1) „Konventionelles“ Erdgas:

- Stammt aus Lagerstätten in grobkörnigeren Gesteinen.
- Hat sich dort in „Erdgasfallen“ angesammelt

2) Nichtkonventionelles Erdgas:

a) Schiefergas (shale gas):

- In Tonsteinen enthaltenes Erdgas („unkonventionelles“ Erdgas)
- Wird durch „Fracking“ abgebaut (dagegen: Umweltbedenken!)

b) Tight gas: Erdgas, das aus dem Muttergestein in poröses Nachbargestein eingedrungen ist

c) Kohleflözgas: In Kohleablagerungen („Flözen“) gebundenes Erdgas

d) Aquifergas: In sehr tiefen Grundwasserschichten gelöstes Erdgas

e) Gashydrate:

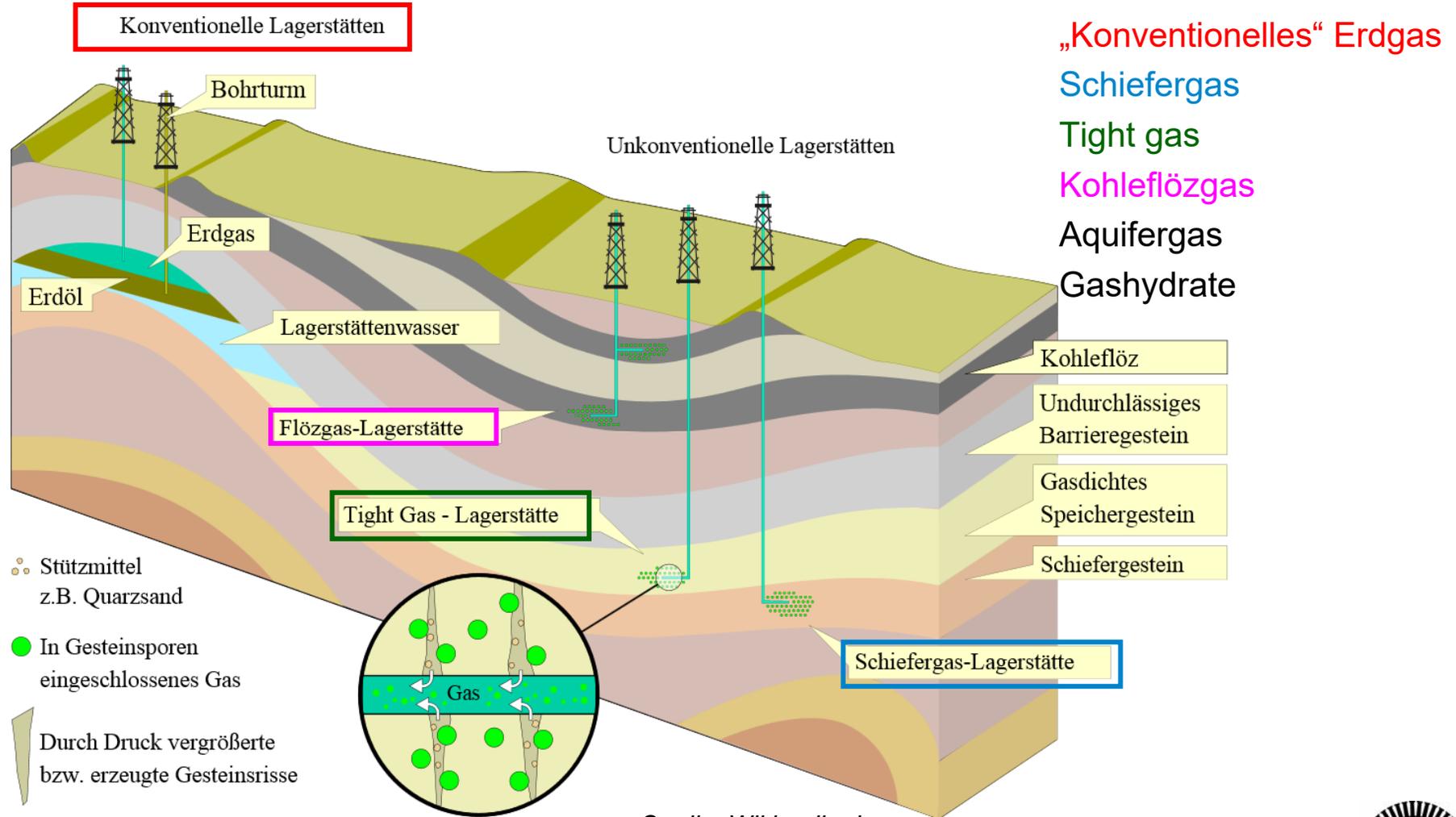
Bei hohem Druck und tiefen Temperaturen bildet Methan zusammen mit Wasser den eisähnlichen Feststoff Methanhydrat (als Gashydrat).

1 m³ Gashydrat bei hohem Druck (> 30 bar) ⇒ 164 m³ Methangas bei 1 bar

Vorkommen: Im Meeresboden ab ca. 300 m Tiefe und in Permafrostböden

R7.2 Erdgasvorkommen

Erdgaslagerstätten



Quelle: Wikipedia.de



R7 Erdgas

R7.3 Nutzung

Erdgas: Nutzung als fossiler Energieträger:

- Beheizung von Wohn- und Gewerberäumen,
- Wärmelieferant für thermische Prozesse in Gewerbe und Industrie
- Elektrische Stromerzeugung (Gasturbinen, Gas- u. Dampf-(GuD)-Kraftwerke)
- Treibstoff für Schiffe und Kraftfahrzeuge (Flüssiggas)
- Reaktionspartner in chemischen Prozessen:
 - Ammoniaksynthese im *Haber-Bosch-Verfahren* NH_3 (Stickstoffdüngemittel),
 - Eisenerzreduktion im Hochofenprozess:
Eisenerz Fe_3O_4 : O-Entzug über C \rightarrow CO_2 , es verbleibt Fe!
 - Herstellung von Wasserstoff (H_2), ...

R7 Erdgas

R7.3 Nutzung

▪ **Brennwertkessel:**

- Der im Abgas enthaltene Wasserdampf wird über einen Wärmeübertrager kondensiert.
- Die im Abgas enthaltene Kondensationswärme ΔH_k wird weitgehend zurück gewonnen.

▪ Beispiel:

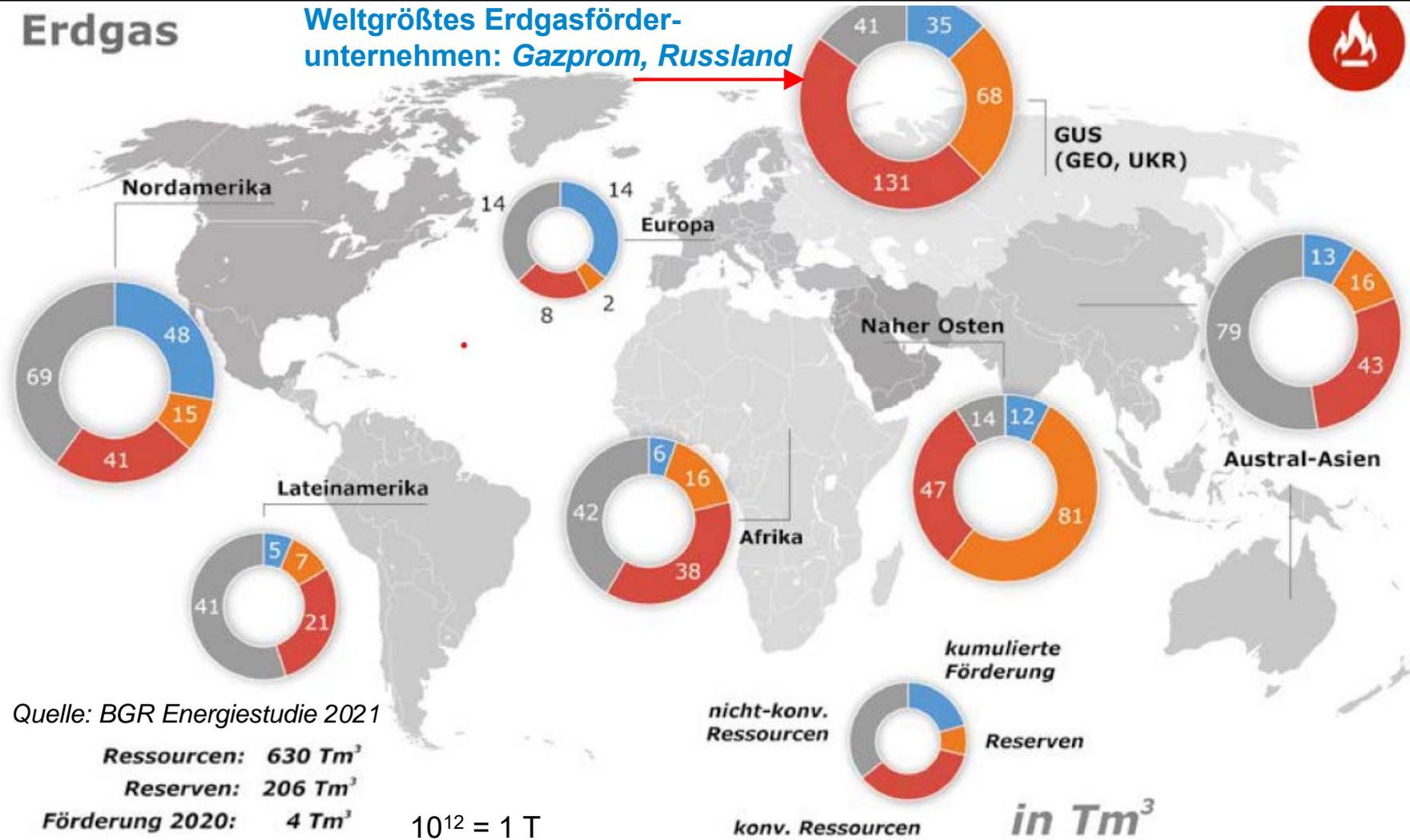
- Erdgasverbrennung, wobei die Kondensationswärme des Wassers mitgenutzt wird.
- Erdgas-Heizwert $H_i = \text{ca. } 0.9 \cdot H_s$,
da bei Methan (CH_4) auf ein C-Atom 4 H-Atome kommen!

R7.4 Erdgasförderung und Reserven weltweit

Erdgasreserven/-ressourcen weltweit 2020

Erdgas

Weltgrößtes Erdgasförder-
unternehmen: *Gazprom, Russland*



R7.4 Potentiale und Nutzung

Weltweite Erdgas-Reserven/Ressourcen 2020

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

in 10^{12} m^3	<u>Reserven</u>	<u>Ressourcen</u> konventionell	<u>Ressourcen</u> *) nicht konventionell	*) ohne Aquifergas u. Gashydrat
Summe	205	293	336	

Weltweite Förderung 2020: $4 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$

Reichweite:

a) Reserven:
$$\frac{205 \cdot 10^{12} \text{ m}^3}{4 \cdot 10^{12} \text{ m}^3} = 51.3 \text{ a}$$

b) Ressourcen:
$$\frac{629 \cdot 10^{12} \text{ m}^3}{4 \cdot 10^{12} \text{ m}^3} = 157.3 \text{ a}$$

293+3336=629

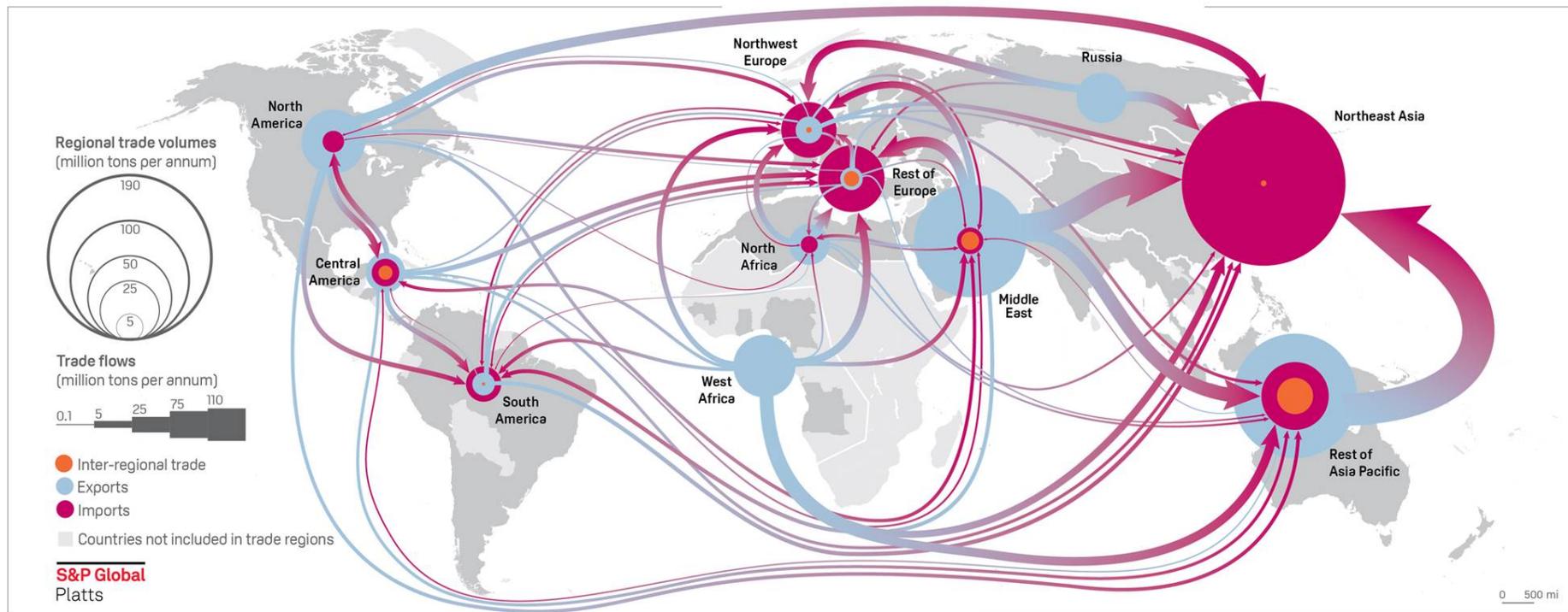
Quelle: BGR Energiestudie 2021



R7.4 Potentiale und Nutzung

Import und Export von Erdgas weltweit 2019

Handelsströme 2018/19:



Source: S&P Global Platts

Gesamtexport weltweit: $1.37 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ (2019) = 25% der Fördermenge

Quelle: S&P Global Platts & Statista 2021

R7.4 Potentiale und Nutzung

Erdgastransport *Europa – Mittlerer Osten*



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

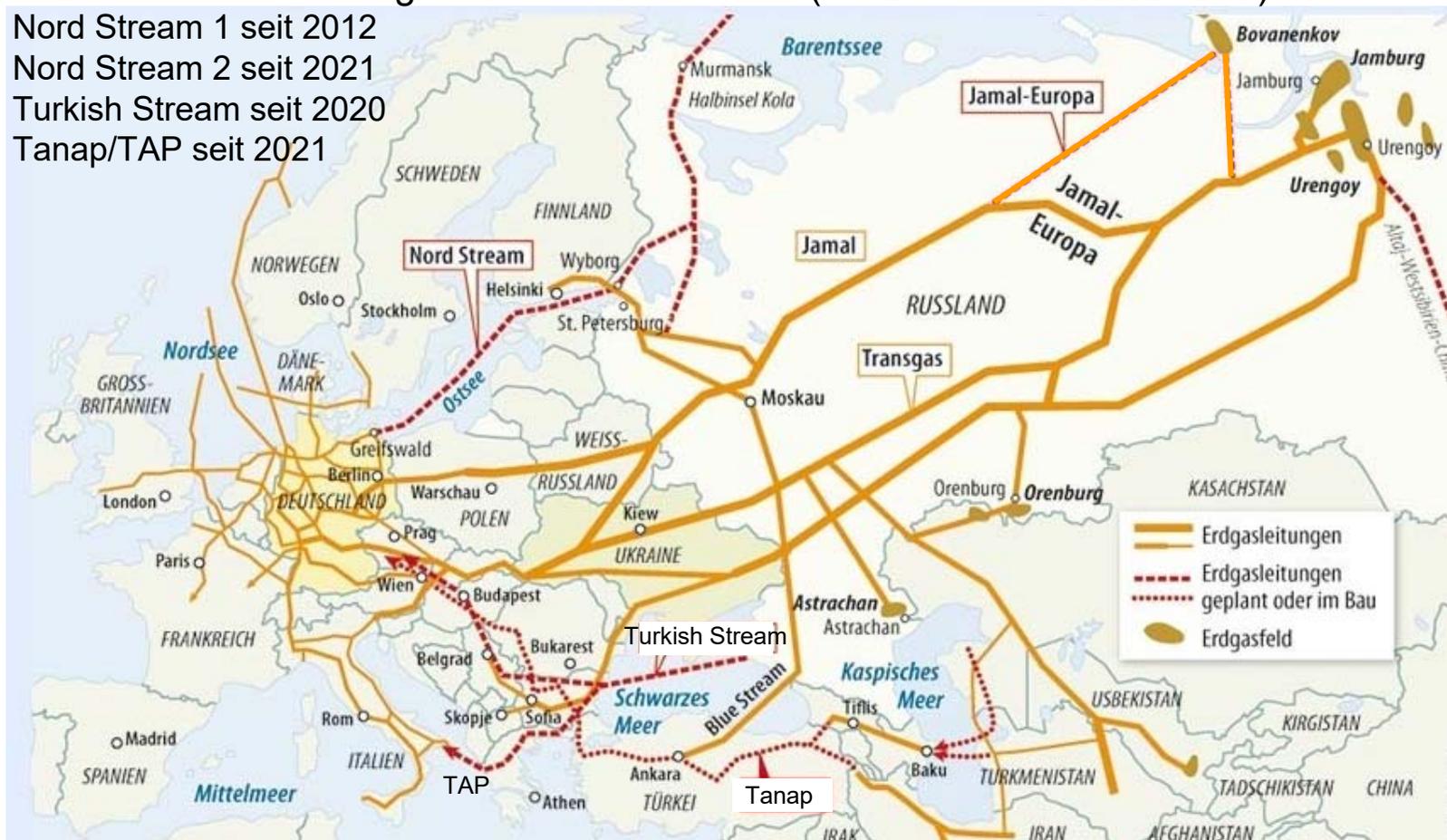
- Weltweite Erdgastransportleitungen > 1 Mio. km
- Über Stahlrohrleitungen unter hohem Druck (bis 84 bar in *Deutschland*)

Nord Stream 1 seit 2012

Nord Stream 2 seit 2021

Turkish Stream seit 2020

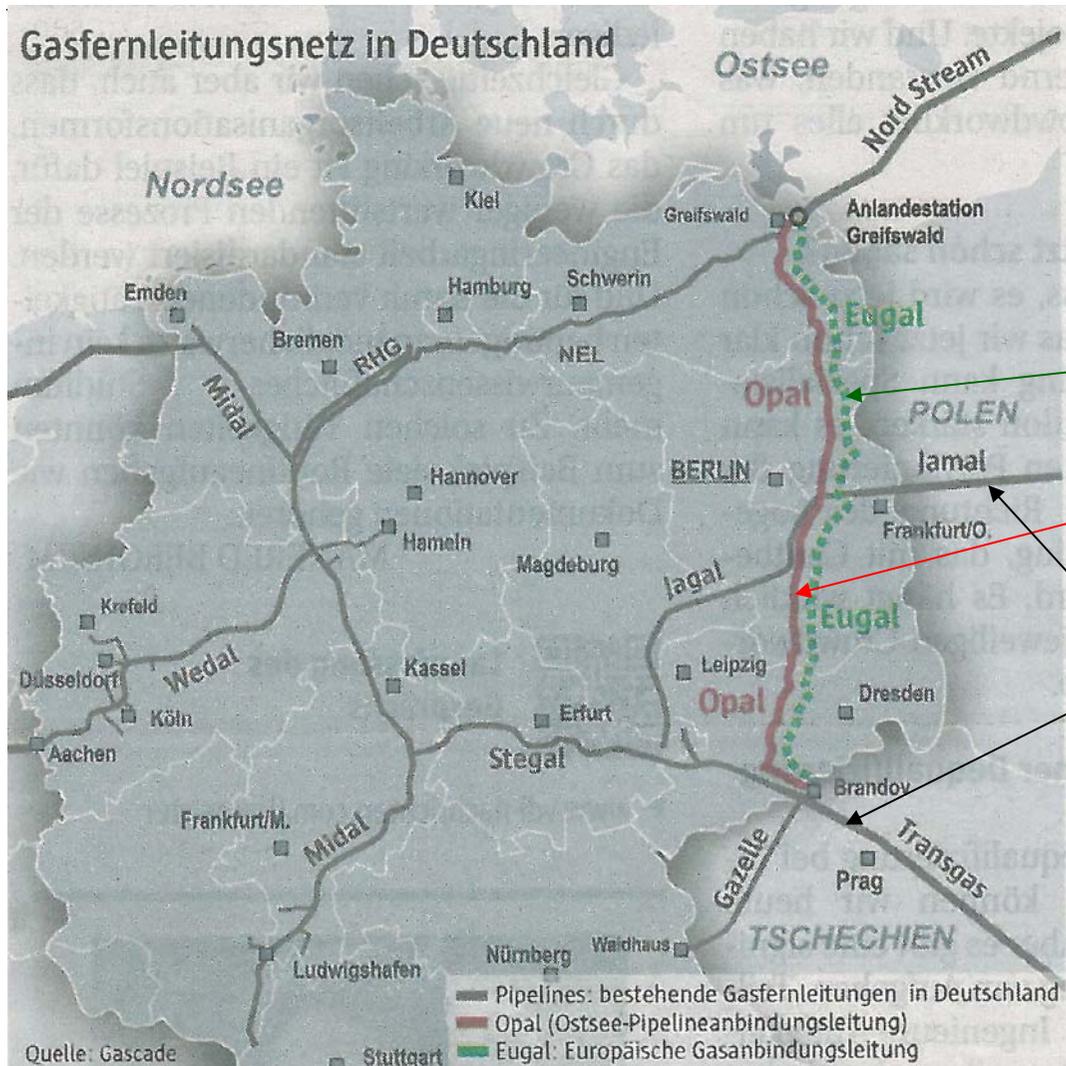
Tanap/TAP seit 2021



Quelle:
FAZ, 2011
aktualisiert 2022



R7.4 Potentiale und Nutzung Gasfernleitungsnetz *Deutschland*



- **Trassenkorridor** der europäischen Gasanbindungsleitung (EUGAL) von der Ostsee bis zur tschechischen Grenze

EUGAL (seit 2019)

OPAL (seit 2011)
(Ostsee-Pipeline-Anbindungsleitung)

Grau:
Weitere bestehende Gasfernleitungen:
Jamal, Transgas, Gazelle, Nord Stream, NEL, RHG, Stegal, Jagal, Midal, Wedal,

Quelle:
Gascade, aus VDI-nachrichten, 07/2016



R7.4 Potentiale und Nutzung

Beispiel zum Gasfernleitungsnetz *Deutschland*



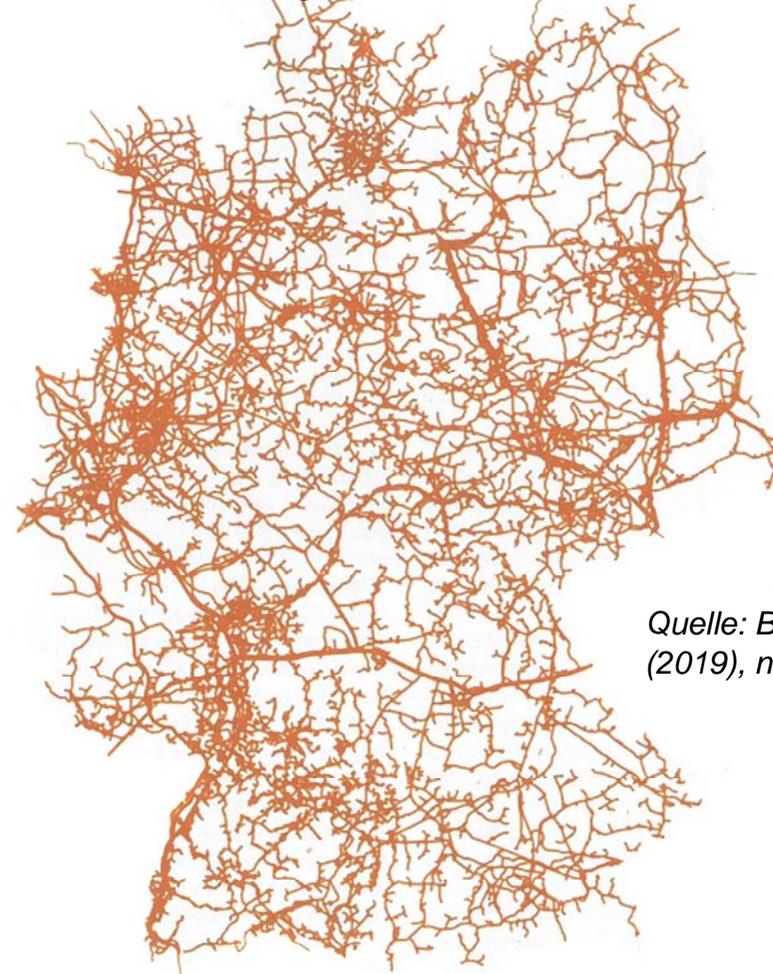
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Pipelinebau der *Midal-Süd Loop* 2013 (90 km zw. *Reckrod* bei *Fulda* u. *Wirtheim* bei *Gelnhausen*)



Quelle:
Gascade, aus *VDI-nachrichten*, 07/2016

- Gasfernleitungsnetz, Druckstufe > 4 bar



Quelle: *BWK 71*
(2019), no. 6



R7 Erdgas

R7.5 Erdgasspeicher in Deutschland 2020



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

● Kavernenspeicher

● Porenspeicher

Speicherkapazität 24.6 Mrd. m³

Deutschland:

Erdgasverbrauch 90.8 Mrd. m³

Speicherkapazität: 27% des p.a.-
Verbrauchs

⇒ **Ausbau der Speicher sinnvoll**

• Inland-Förderung: 5.7 Mrd. m³,
-7% zu Vorjahr 2019;
7% des Inlandverbrauchs.

• Reserven / Ressourcen:
22 / 1360 Mrd. m³ (10⁹ = 1 Mrd.)

Quelle: BVEG: Bundesverband Erdgas,
Erdöl, Geoenergie, 2018 (in: vdi nachrichten,
27. April 2018) & BGR Studie 2021



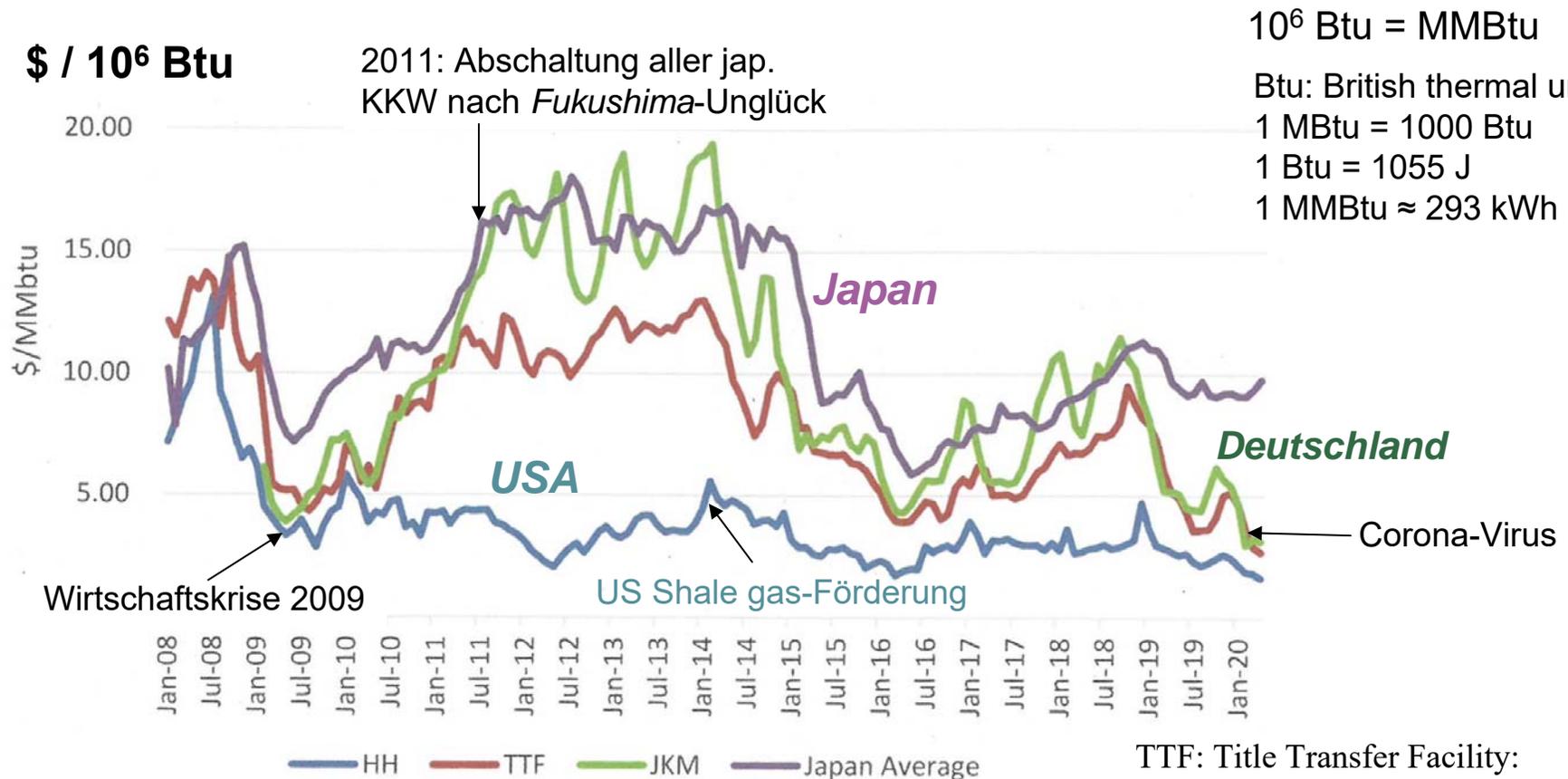
Quelle:
V. Quasching,
Regenerative
Energien



R7 Erdgas

R7.6 Preisentwicklung

Quelle: Oxford Institute for Energy Studies



10⁶ Btu = MMBtu

Btu: British thermal unit

1 MBtu = 1000 Btu

1 Btu = 1055 J

1 MMBtu ≈ 293 kWh

HH: „Henry hub“: Gas-Pipeline-Knoten in *Erath/La.*, USA: US-Gas-Preisbörse

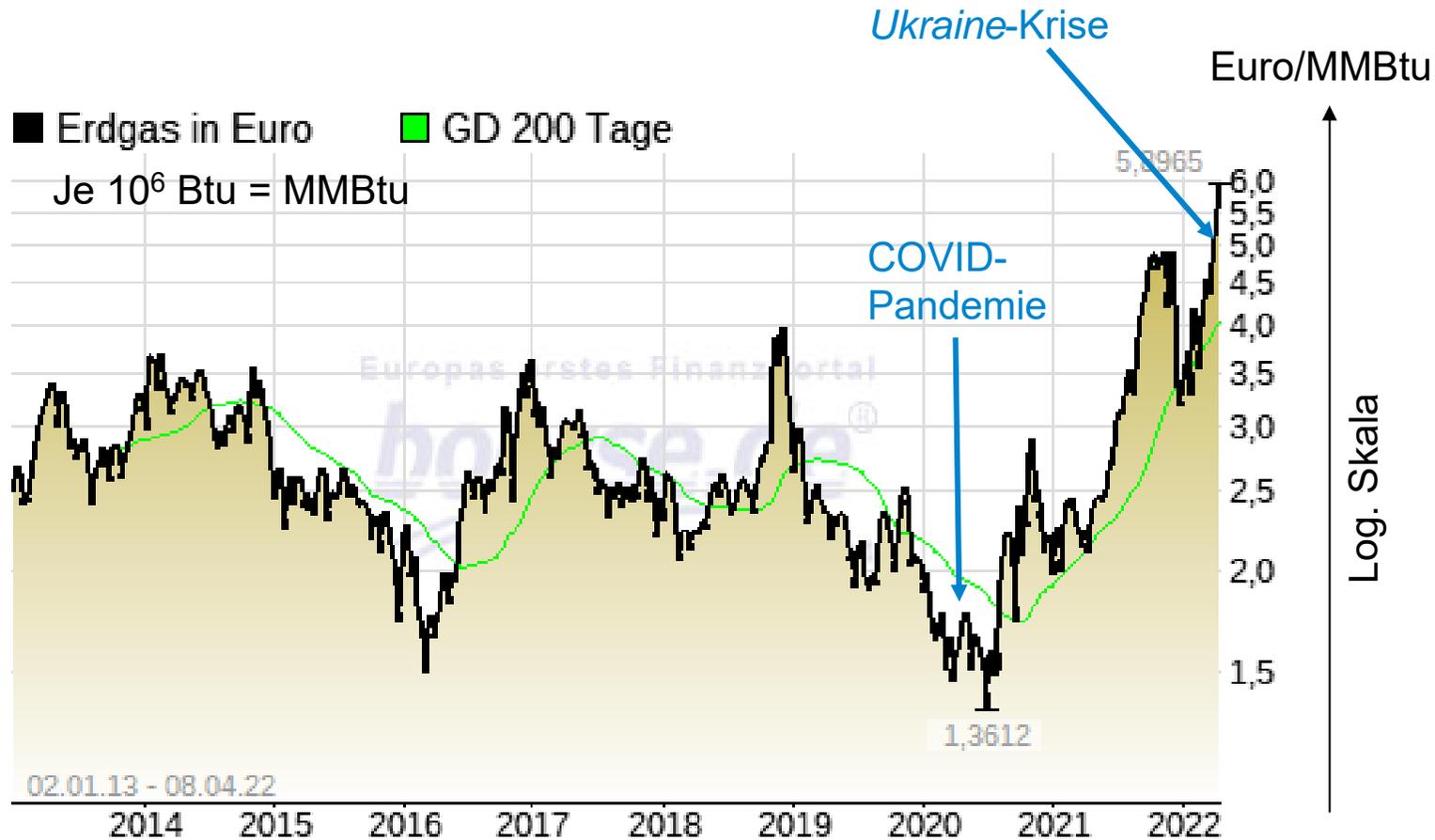
TTF: Title Transfer Facility:
niederländ. Handelspunkt

JKM: Japan Korea Marker:
Ostasiat. Spot-Market



R7 Erdgas

R7.6 Preisentwicklung



Quelle: boerse.de

R Ressourcen

R7. Erdgas



Zusammenfassung

- Welt: **Begrenzte Reserven-Reichweite** (für konventionelles Erdgas) von ca. 50 Jahren
- Nach Erdöl & Kohle ist **Erdgas mit ca. 22%** des weltweiten Primärenergieverbrauchs **drittwichtigster Primärenergieträger**
- Nach dem Erdöl (ca. 34%) ist **Erdgas mit ca. 27% (2020)** des deutschen Primärenergieverbrauchs **zweitwichtigster deutscher Primärenergieträger**
- Starke deutsche Abhängigkeit von **russischen Erdgaslieferungen**:
Knapp 40% Lieferanteil bis 2022 → Politische „**Rücksichtnahmen**“ wegen Abhängigkeit?
- **Ausbau der Erdgasspeicher** in D in Arbeit (ist: 24.6 Mrd. m³, Plan: plus 3.4 Mrd. m³)



R Ressourcen

R8. Steinkohle



1. Energieträger: Reserven und Ressourcen
2. Sonnenenergie
3. Wasserkraft
4. Windkraft
5. Meeresenergie
6. Erdöl
7. Erdgas
8. **Steinkohle**
9. Braunkohle
10. Kernbrennstoffe
11. Erdwärme
12. Biomasse
13. Energieströme



R8 Steinkohle

Übersicht



1. Was ist Steinkohle (= Hartkohle)?
2. Potentiale und Nutzung
3. Steinkohle in *Deutschland*



R8 Steinkohle

R8.1 Was ist Steinkohle?

- **Steinkohle:** Schwarzes, hartes Sedimentgestein; besteht zu
 - a) mehr als 50 Gewichts-Prozent bzw.
 - b) mehr als 70 Volums-Prozent (75 ... 91.5%)aus Kohlenstoff C

- **Entstanden durch:**

Karbonisierung von Pflanzenresten im Erdzeitalter „*Karbon*“ (vor 358.9...298.9 Mio. Jahren).

Organisches Material wurde unter Luftabschluss, hohem Druck und hohen Temperaturen verdichtet und umgewandelt („*Inkohlung*“)

Quelle: mineralien.goblack.de



Heizwert $H_i = 29.3 \text{ MJ/kg}$, Dichte: ca. $1.2 \dots 1.5 \text{ kg/dm}^3$

Bei reiner C-Verbrennung:
Heizwert $H_i = \text{Brennwert } H_s$

- **Steinkohleeinheit (SKE):**
 - 1 t SKE = 8.141 MWh
 - 1 kg SKE = 29 308 kJ

1 Tonne SKE = Energiemenge, die bei vollständiger Verbrennung von 1 t Steinkohle bestimmter Qualität freigesetzt wird (C-Gehalt ca. 90%)

R8.1 Was ist Steinkohle?

Steinkohlesorten

Einteilung nach Anteil an flüchtigen Bestandteilen (Gasen) (in Gew.-%):

Flammkohle	40 ... 43 %	
Gasflammkohle	35 ... 40 %	
Gaskohle	28 ... 35 %	
Fettkohle	19 ... 28 %	überwiegend als Brennstoff in der Energieerzeugung (Feuchtigkeitsgehalt < 20%, C-Gehalt \approx 88% der wasserfreien Kohle, Schwefelgehalt < 1%)
Esskohle	14 ... 19 %	
Magerkohle	10 ... 14 %	
Anthrazit (Glanzkohle)	< 10 %	hochwertigste Kohlesorte großer Härte; C-Gehalt > 90%, nahezu rückstandsfreie Verbrennung

Höherer C-Anteil



R8.2 Potentiale und Nutzung Steinkohlenutzung: Verbrennung

- Überwiegend als **Brennstoffnutzung**, um Wärme durch Verbrennung zu erzeugen.
Reine C-Verbrennung: $C + O_2 \rightarrow CO_2 - 394 \text{ kJ/mol } (\Delta H)$

$$\text{Brennwert: } H_s = \frac{\Delta H}{12 \cdot m_u \cdot L'} = \frac{394 \cdot 10^3 \text{ J/mol}}{12 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 6.023 \cdot 10^{23} / \text{mol}} = 32839 \text{ kJ/kg}$$

- **Reale Kohle-Verbrennung (C-Gehalt $\approx 90\%$):** $H_s = 29.3 \text{ MJ/kg}$

Es entstehen

Kohlenstoffdioxid,
Wasserdampf und
andere Gase wie Schwefeldioxid.

R8.2 Potentiale und Nutzung

Steinkohle-Nutzung: Verkokung u. a.



- **Verkokung von Kohle** = Gewinnung von Steinkohlenkoks aus ascheärmerer Fettkohle
 - a) als Brennstoff und
 - b) als Reduktionsmittel bei der Eisenproduktion in Hochöfen.
- **Koks**: - Poröser, stark kohlenstoffhaltiger Brennstoff mit hoher spezifischer Oberfläche.
 - Der störende Schwefel wird bei stark schwefelhaltiger Kohle abgetrennt.
- **Steinkohle**: Rohstoff für die **chemische Industrie** auf Basis der bei der Verkokung anfallenden Nebenprodukte Teer, Benzol, Toluol ...
- **Kohleverflüssigung** ist derzeit gegenüber der Erdölchemie nicht wirtschaftlich umsetzbar.



R8.2 Potentiale und Nutzung

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Weltweite Hartkohle-Reserven/Ressourcen 2020

in Gt = 10⁹ t

	<u>Reserven</u>	<u>Ressourcen</u>
N-Amerika	224.2 (~ 31%)	6646
S-Amerika	8.6	26.5
Afrika	14.8	327.4
Europa	26.6	470.2
Nahe Osten	1.2	40
GUS	132.4 (~ 18%)	1331.8
Asien/Australien	348.4 (~ 45%)	7196.7
China	17.8%	150.0 Antarktis
Indien	13.1%	
Australien	9.7%	

Reichweite:

a) Reserven:

$$\frac{756.2 \text{ Gt}}{6.79 \text{ Gt/a}} = 111.4 \text{ a}$$

b) Ressourcen:

$$\frac{16188.6 \text{ Gt}}{6.79 \text{ Gt/a}} = 2384.2 \text{ a}$$

Summe

756.2 Gt

16 188.6 Gt

Weltweite Förderung 2020: 6.79 Gt

Quelle: BGR Energiestudie 2021



R8.2 Potentiale und Nutzung

Weltweite Hartkohle-Förderung 2020

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Die weltweite Steinkohle-Förderung betrug 2020: 6.79 Gt.
- VR China 3580 Mio. t 52.7% der Weltförderung!
- Indien 716 Mio. t 10.5 %
- Indonesien 504 Mio. t 7.4 %
- USA 441 Mio. t 6.5 %
- Australien 426 Mio. t 6.3 %

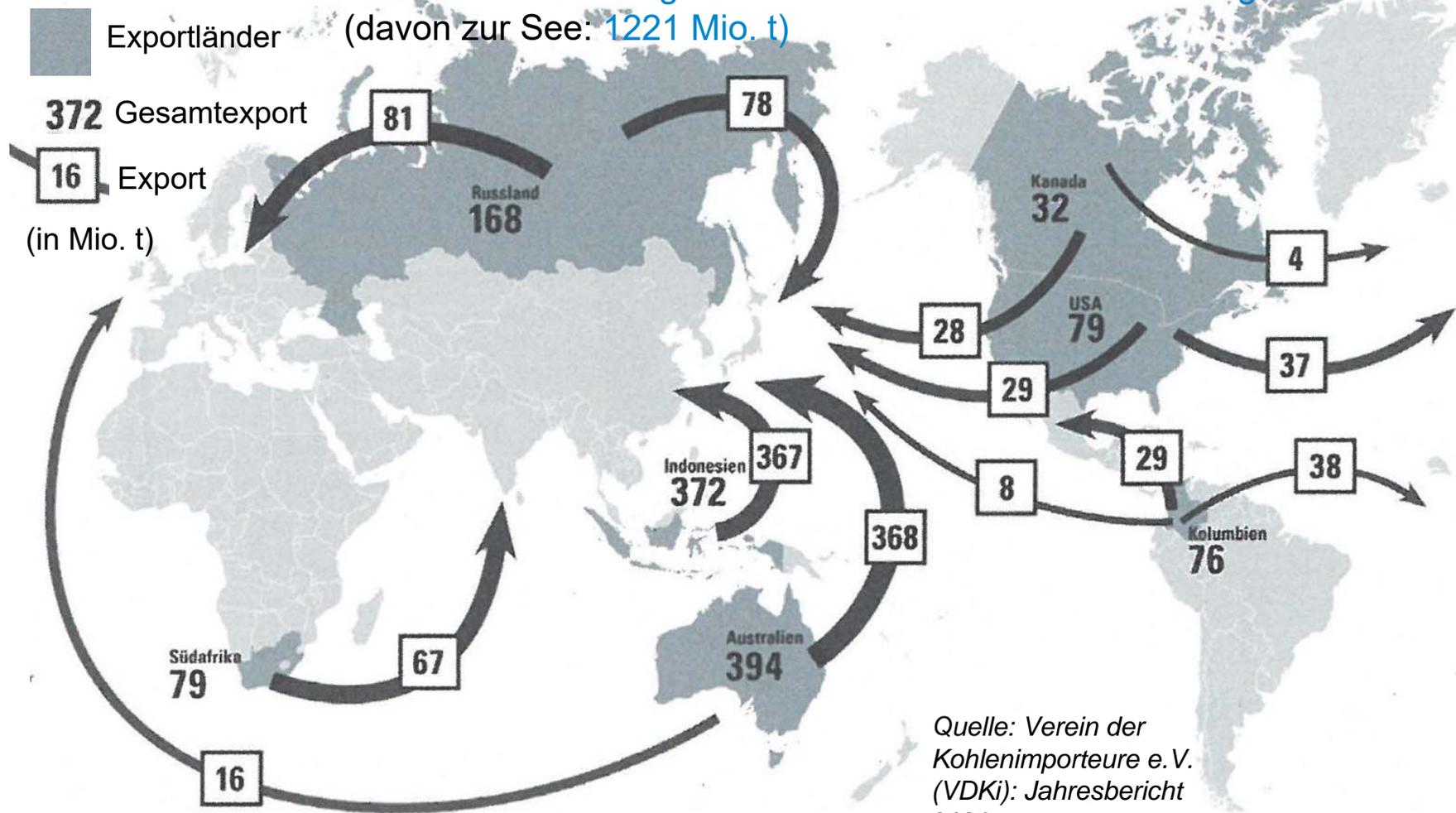
Quelle: BGR Energiestudie 2021



R8.2 Potentiale und Nutzung

Haupt Handelsströme (Seeverkehr) von Steinkohle 2019

Gesamthandelsmenge ~ 1400 Mio. t = 20% der Förderung
(davon zur See: 1221 Mio. t)



Quelle: Verein der
Kohlenimporteure e.V.
(VDKi): Jahresbericht
2020



R8.2 Energieströme - Beispiele

Steinkohletransport

- **Überseetransport** per Schiff
- **Binnentransport** auf
 - a) Land- und
 - b) Wasserwegen

(Eisenbahn und Binnenschifffahrt)

Beispiel:

Binnenschifffahrt:
Steinkohlefrachtschiff



Quelle: RWE



R8.3 Steinkohle in Deutschland

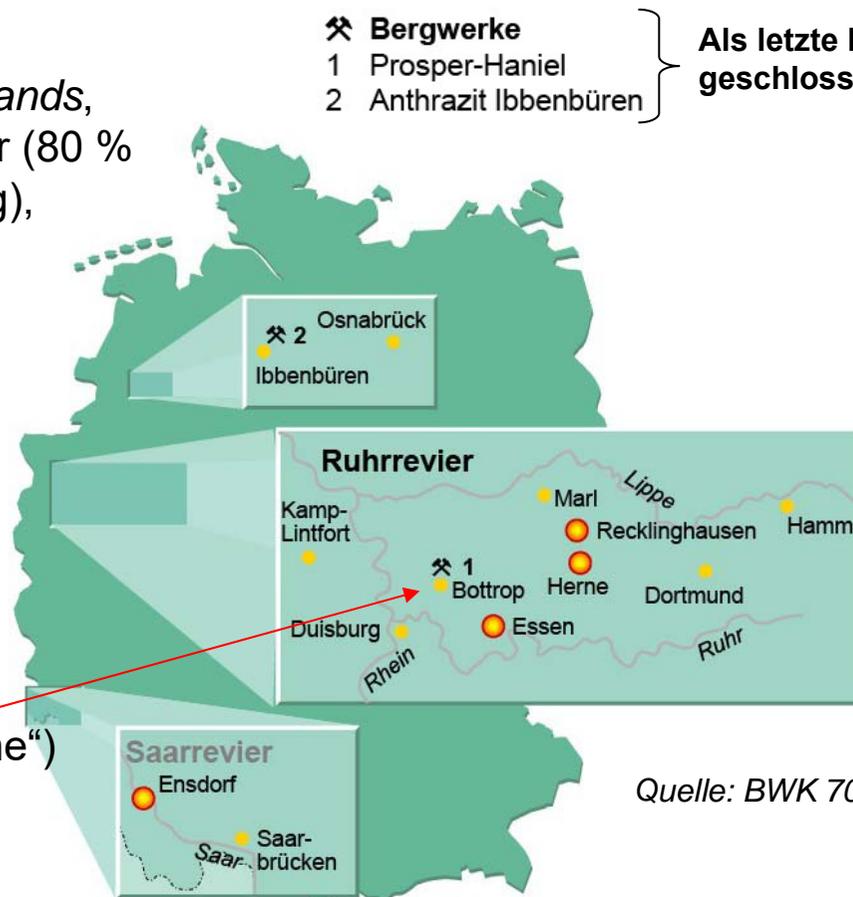
Reserven 0, Ressourcen 82.9 Gt

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- **Ibbenbüren: Anthrazit:** Ursprüngliche Lagerung in großer Tiefe bei höheren Temperaturen: Ibbenbürener Kohle stärker „inkohlt“ (= höherer C-Anteil) als die Ruhr-Kohle
- **Ruhr-Revier:** Größter Steinkohlevorrat Deutschlands, früher 32 Mio. t Förderung pro Jahr (80 % der deutschen Steinkohleförderung), Lagerstätte ist Teil des NW-europäischen Kohlegürtels
- **Saar-Revier:** Entstanden aus Sumpfwäldern bei Süßwasserseen, früher 7.2 Mio. t Förderung pro Jahr
- **Aachener Revier:** 1997 Kohleabbau beendet
- **Beendigung d. Abbaus: 2018** Letztes Steinkohlebergwerk („Zeche“) Prosper-Haniel (Ruhrgebiet)

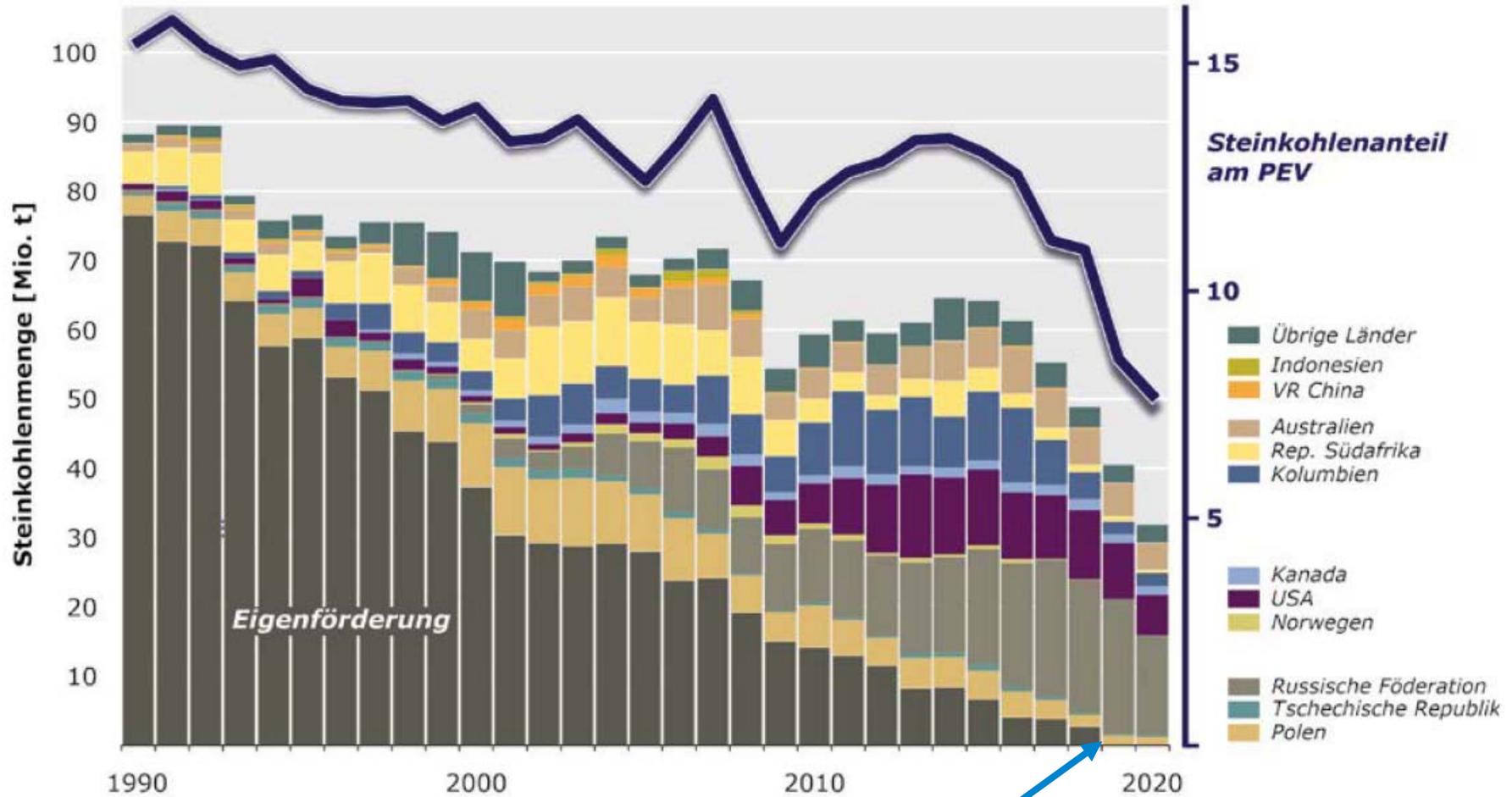


Quelle: BWK 70 (2018), no. 5



R8.3 Steinkohle in Deutschland

Steinkohleaufkommen/-importe in Deutschland



▪ Beendigung d. Abbaus im Dez. 2018:
Letztes Steinkohlebergwerk (Zeche Prosper-Haniel, Ruhrgebiet)

Quelle: BGR Energiestudie 2021



R8.3 Steinkohle in *Deutschland* Nutzung in *Deutschland*



- **Steinkohleimporte nach *Deutschland* 2020:** 31.82 Mio. t (- 25% zum Vorjahr!)
- **Verbrauch:** 30.8 Mio. t SKE
- SINKENDER Steinkohleverbrauch durch Umstieg auf Erdgas!
- Nutzungsarten:

Bedeutung

El. Energieerzeugung (Kesselkohle)	1
Stahlherstellung (Kokskohle, Koks)	2
Hausbrand	3
Industrielle Wärme	4

Quelle: Verein der Kohleimporteure VDKI 2019 & BGR Energiestudie 2021



R8.3 Steinkohle in *Deutschland*

“Kohleausstieg“ in *Deutschland*



- *Kommission für Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung*: „Kohlekommission“ bestehend aus: Mitgliedern des Bundestages, verschiedener Landtage und verschiedener Lobbyverbände (28 stimmberechtigte Mitglieder)

- Von Kohlekommission in 01/2019 beschlossen:
Beendigung der Kohleverstromung im Jahr 2038



Entschädigung der Betreiber soll durch Fiskus erfolgen

- Hintergrund: CO₂-Ausstoß 2017 um 100 Mio. t zu hoch gegenüber gesetzlicher Vorgabe, Anteil der Kohlekraftwerke am Gesamt CO₂-Ausstoß bei ca. 80 %
→ Abschalten von Kohlekraftwerken als zentrale Gegenmaßnahme
- Plan für Abschalten der Kohlekraftwerke:
 - Bis 2022: 3 GW (Braunkohle) + 4 GW (Steinkohle) + 5.5 GW („altersbedingt“) = 12.5 GW
 - Bis 2030: 6 GW (Braunkohle) + 7 GW (Steinkohle) = 14 GW
 - Bis 2038: Abschalten der verbliebenen 17 GW

Quelle: Spiegel online, 2019



R Ressourcen

R8. Steinkohle

Zusammenfassung

- Nach dem Erdöl ist **Kohle mit ca. 26%** des weltweiten Primärenergieverbrauchs aus nicht-erneuerbaren Quellen **zweitwichtigster Welt-Primärenergieträger** (24.2 % Steinkohle, 1.4 % Braunkohle, 2020)
- **Bedarf steigt weltweit** um ca. 2.3 % p. a. wegen steigender Industrialisierung **in SO-Asien!**
- Spitzenimporteure 2020 (in Mio. t): *VR China* 304, *Indien* 215, *Japan* 174, *S-Korea* 122; gesamte *EU-28* (28 Staaten): 95 Mio. t, **davon Deutschland: ca. 32 Mio. t.**
- In *Deutschland*:
Nach Erdöl und Erdgas **ist Stein- u. Braunkohle mit 15.8%** des deutschen Primärenergieverbrauchs **drittwichtigster Primärenergieträger (Steinkohle: 7.6%).**
ABER: Für Umwandlung in el. Energie soll bis 2038 keine Stein- u. Braunkohle mehr verwendet werden!
- **Weltweit begrenzte Reichweite bzgl. Reserven von ca. 100 Jahren.**
- **Vielseitige Nutzung möglich, doch häufig nur Brennstoffnutzung.**

R Ressourcen

R9. Braunkohle



1. Energieträger: Reserven und Ressourcen
2. Sonnenenergie
3. Wasserkraft
4. Windkraft
5. Meeresenergie
6. Erdöl
7. Erdgas
8. Steinkohle
9. Braunkohle
10. Kernbrennstoffe
11. Erdwärme
12. Biomasse
13. Energieströme



R9 Braunkohle

Übersicht



1. Was ist Braunkohle?
2. Braunkohle weltweit
3. Braunkohle in *Deutschland*



R9 Braunkohle

R9.1 Was ist Braunkohle?

- **Braunkohle:** Bräunlich-schwarzes, meist lockeres Sedimentgestein, fossiler Brennstoff mit im Vergleich zur Steinkohle niedrigem „Inkohlungsgrad“

Kohlenstoffanteil (C) in a) **Hart-Braunkohle:** 70 ... 75 %
getrockneter Kohle: b) **Weich-Braunkohle:** 65 ... 70 %

- **Entstanden im:** „Tertiär“ (vor 65 ... 2.6 Mio. Jahren) aus organischem Material, das unter Luftabschluss, hohem Druck und hohen Temperaturen verdichtet und umgewandelt wurde („Inkohlung“).



Quelle: gesteine-projekt.de [online]

- Braunkohle deutlich „jünger“ als Steinkohle, daher Braunkohleflöze oft nur wenige Meter unter der Erdoberfläche ⇒ **Tagebau** mit großen Schaufelradbaggern

Vergleiche: Steinkohleflöze oft Hunderte von Metern unter der Erdoberfläche ⇒
Aufwändiger Bergbau mit Stollensystemen

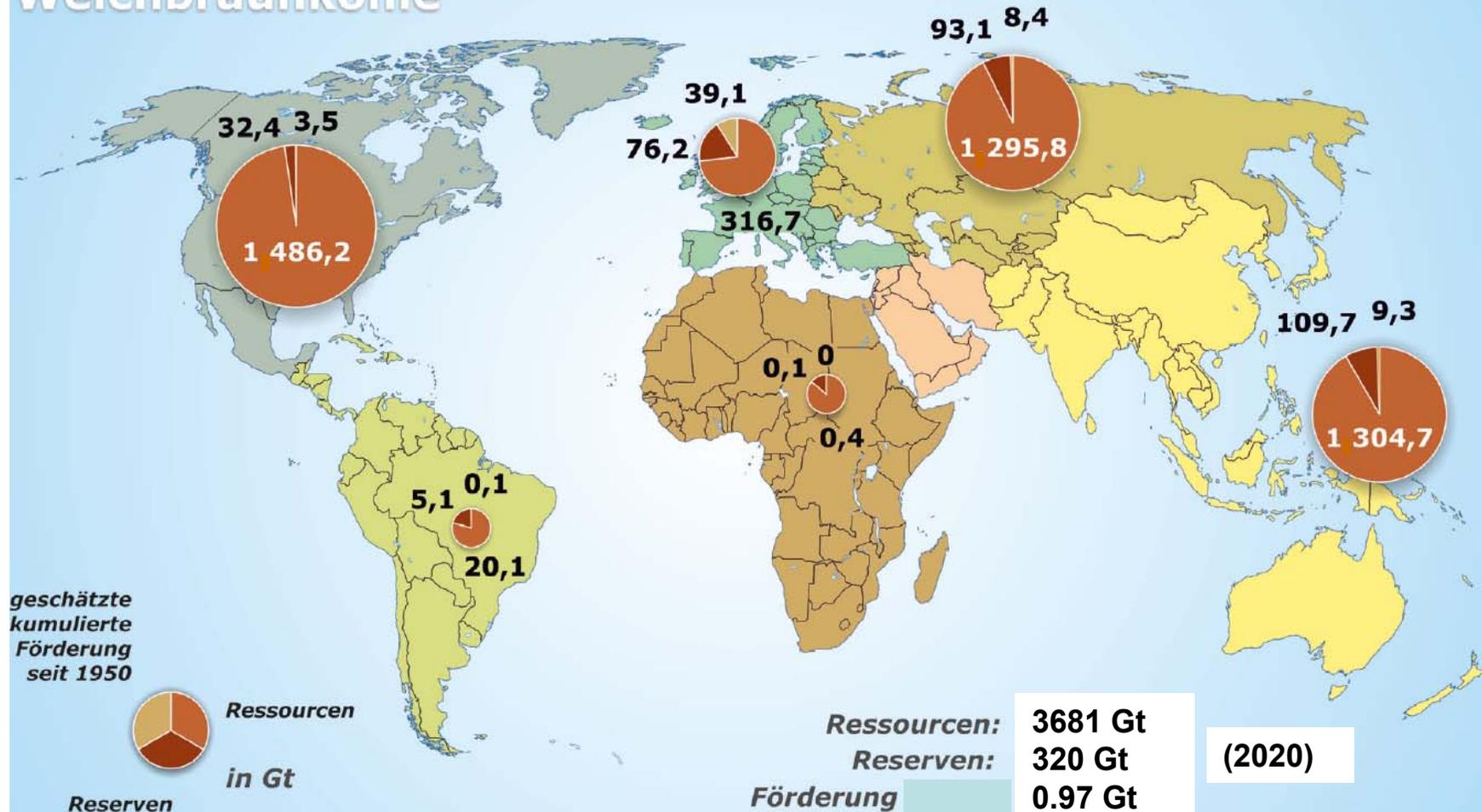
- **Heizwert:**

a) **Rohbraunkohle (55% Wasser!):** $H_i \approx 8 \text{ MJ/kg}$ (ca. 1/3 von Steinkohle)
b) **Getrocknete Braunkohle:** $H_i \approx 14.7 \text{ MJ/kg}$ (ca. 2/3 von Steinkohle)

Dichte: 1.2 ... 1.4 kg/dm³

R9.2 Braunkohle weltweit Reserven & Ressourcen weltweit 2020

Weichbraunkohle



Quelle: BGR, 2021



R9.2 Braunkohle weltweit

Reichweite

- **Rangliste: Welt Braunkohle-Förderung Mio. t/a**

▪ VR China	260
▪ Deutschland	107 (10 % der Weltförderung)
▪ Russland	73
▪ Türkei	71
▪ Indonesien	60
▪ Polen	46
▪ USA	45
▪ Australien	40

- **Reserven** 320 Gt (2020), **Ressourcen** 3681 Gt

- Welt-Braunkohleförderung ca. 1 Gt pro Jahr

Reichweite:

Bei derzeitiger Braunkohle-Reserve und gleichbleibender Braunkohle-Fördermenge:
320 Gt / 1 Gt/Jahr = **320 Jahre**; **Ressourcen-Reichweite: 3681 Jahre.**

R9.2 Braunkohle weltweit Nutzung



- Braunkohlenutzung:
- 90 %: Gemahlen und getrocknet als Brennstoff für die Stromerzeugung
- 10 %: Veredelung:
 - Briketts,
 - bitumenreiche Braunkohle \Rightarrow Montanwachs ...



R9.3 Braunkohle in *Deutschland*

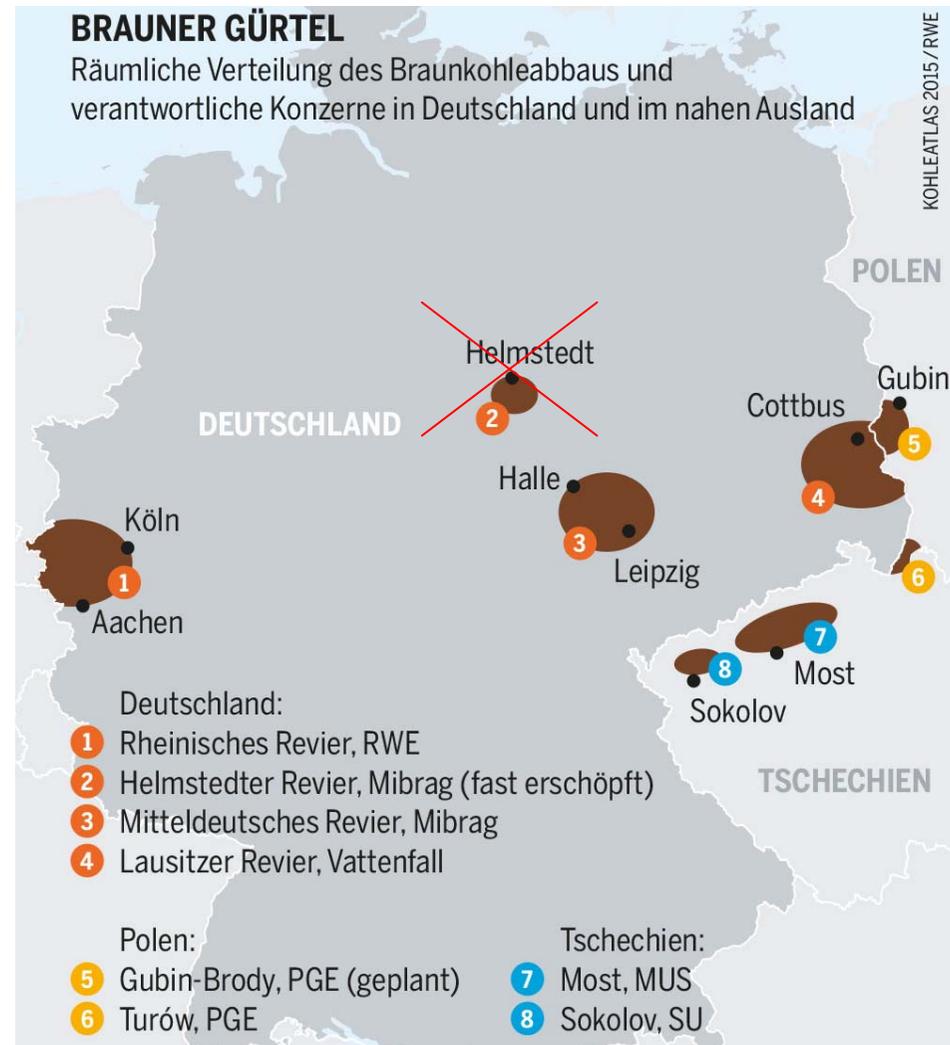
Reserven / Ressourcen 36 / 36 Gt (2020) in *Deutschland*



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

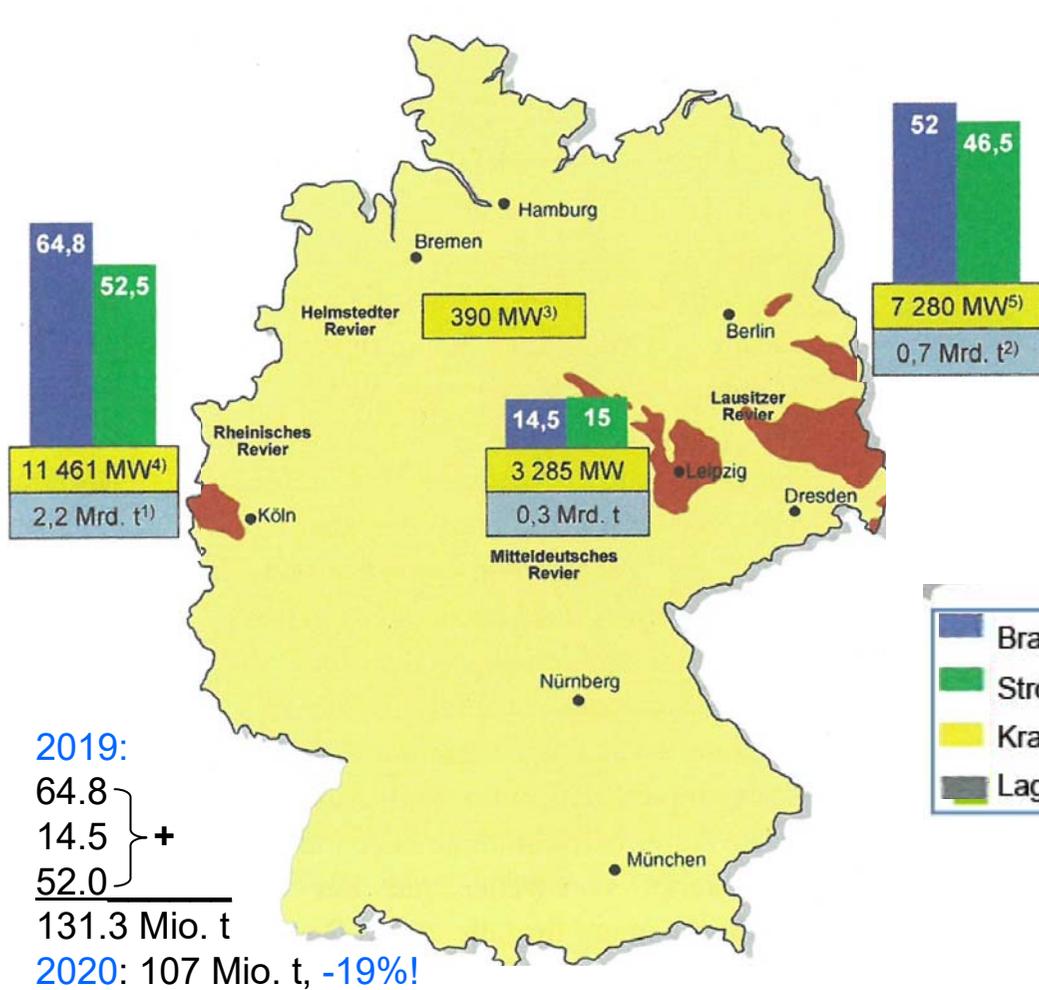
- Rheinisches Revier:
Größte zusammenhängende Braunkohlelagerstätte Europas:
3 Tagebaue:
Hambach, Inden, Garzweiler
Reserven & Ressourcen:
51 Mrd. t Braunkohle
- Lausitzer Revier:
Reserven & Ressourcen:
11 Mrd. t Braunkohle.
Revier soll bis ca. 2050 geschlossen werden
- Mitteldeutsches Revier:
Reserven & Ressourcen:
10 Mrd. t Braunkohle
- Helmstedter Revier: Erschöpft

Quelle: Heinrich-Böll-Stiftung, 2015, [online]

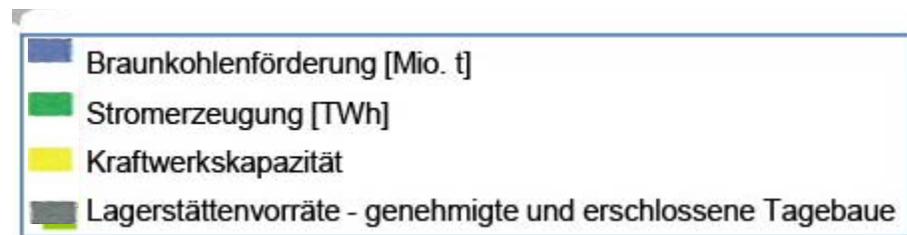


R9.3 Braunkohle in *Deutschland*

Förderung & Stromerzeugung in *Deutschland* (2020)



- Braunkohle-Förderung 2020: 107 Mio. t = ca. 10 der BK-Weltproduktion
- D ist Land mit der **zweitgrößten p.a.-Fördermenge**, denn: Braunkohle liefert 18.7% (2021) der dt. Brutto-Stromerzeugung ⇒ ⇒ **großer Beitrag zur Verringerung teurer Energieimporte**

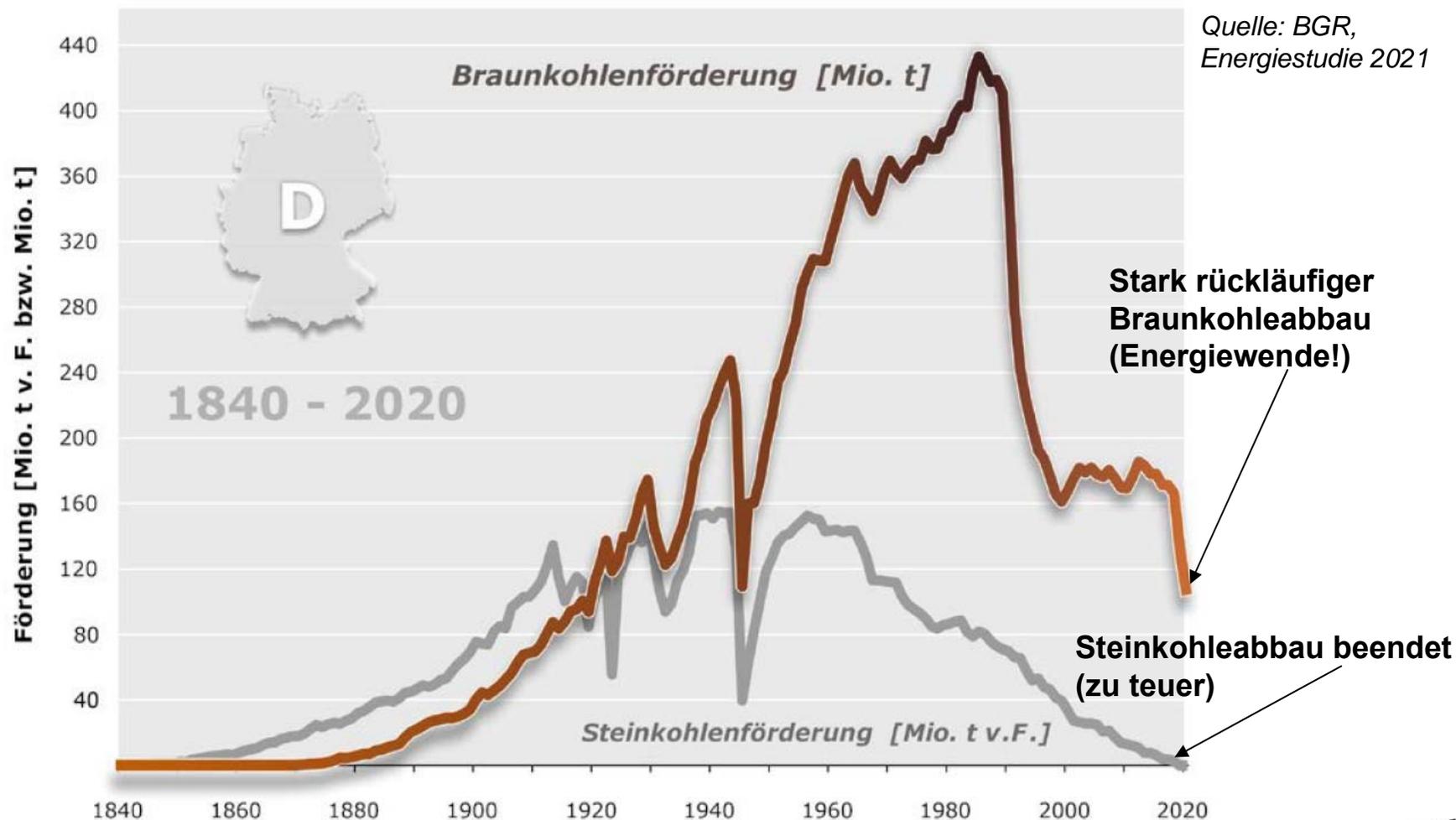


Quelle: BWK 72 (2020), no. 8-9
aus: Statistik d. Kohlewirtschaft e.V.



R9.3 Braunkohle in *Deutschland*

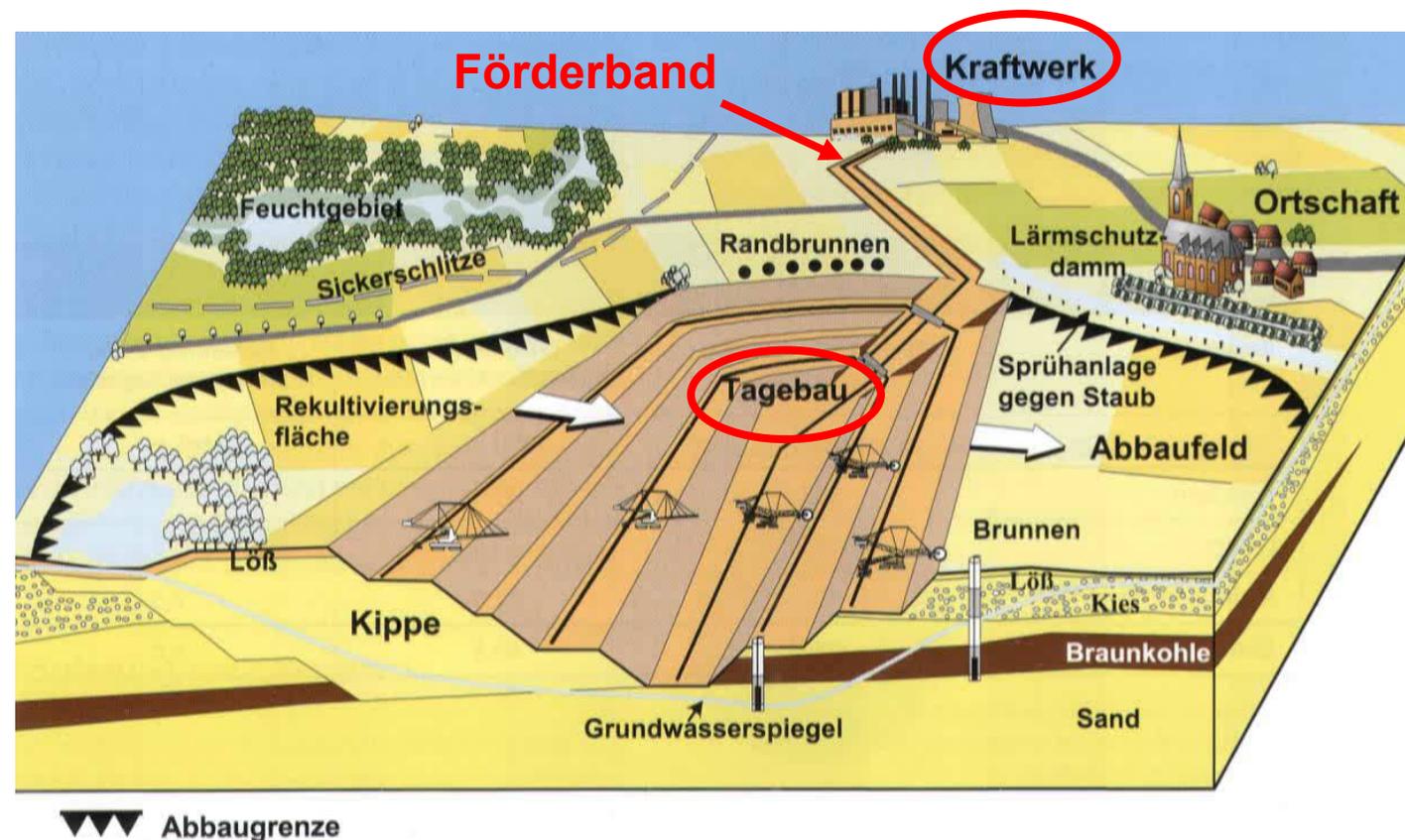
Kohleabbau in *Deutschland* 1840 ... 2020



R9.3 Braunkohle in *Deutschland* Braunkohletransport

- Wegen des ca. 60% geringeren Energieinhalts der **feuchten Braunkohle** gegenüber der Steinkohle lohnt es sich in *Deutschland* nicht, Braunkohle weit zu transportieren.

- **Kraftwerke** stehen daher in der Nähe von **Tagebauen**
- **Transport** der Braunkohle über **Förderbänder**



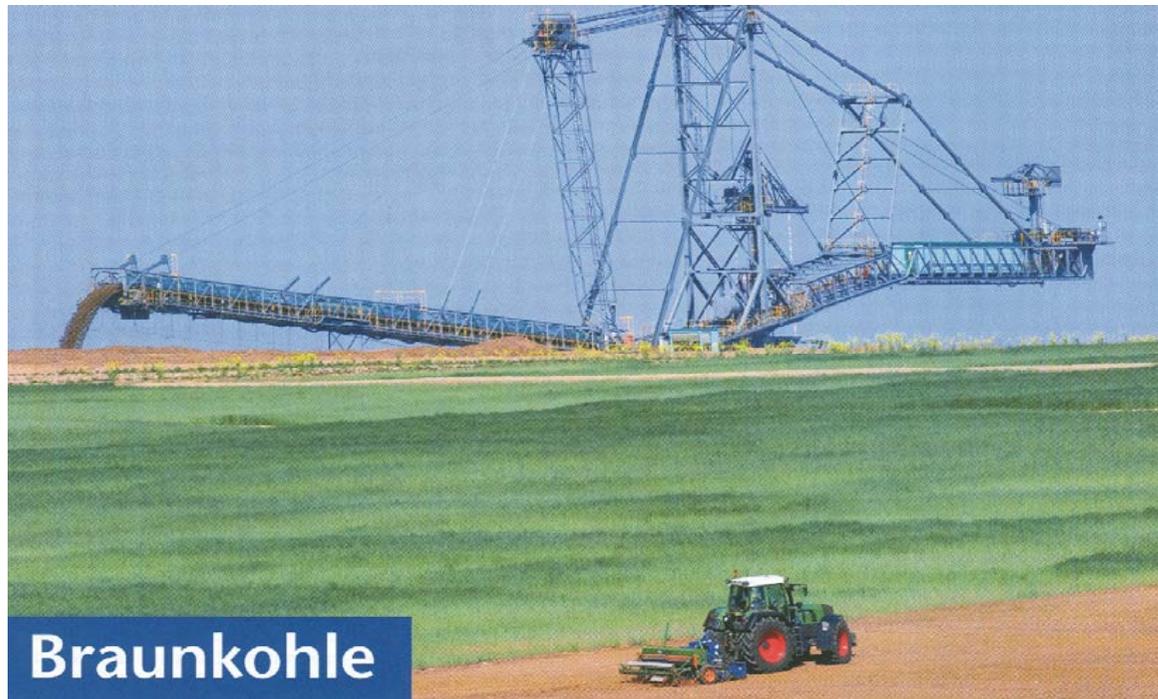
Quelle: globalchange.de [online]

R9.3 Braunkohle in *Deutschland*

Braunkohle-Tagebau: Mitteldeutsches Braunkohlerevier



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Quelle:

BWK 63/2011, no. 4

- **Beispiel:** Tagebau *Profen/D* (südlich v. *Leipzig*) \Rightarrow Braunkohlekraftwerk *Lippendorf* (seit 1999):
2 x 933.6 MW (el. Leistung), Standort 15 km südlich von *Leipzig*:
Heißwasserleitung nach *Leipzig*: Fernwärmenutzung.
- **Oberflächenschürfung** mit Großbaggern,
- Der Abraumverkipfung folgt unmittelbar die **Rekultivierung**.



R9.3 Braunkohle in *Deutschland* Rekultivierung im Tagebau *Hambach* (bei *Köln*)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Abraumverkipfung zur
Rekultivierung



Rekultivierung:

In Summe durch RWE ca. 10 Mio. neu gepflanzte Bäume

Quelle: BWK 70 (2018) no. 5



R Ressourcen

R9. Braunkohle



Zusammenfassung

- Braunkohle: Deutlich geringerer Brennwert als Steinkohle (max. etwa 65%)
- Große Vorräte in *Deutschland* = Energiepolitischer Vorteil inländischer fossiler Primärenergieträger-Vorkommen (Reserven ca. 36 Mrd. Tonnen)
- Reichweite in Deutschland bei 107 Mio. t Förderung p. a.: ca. 336 Jahre!
- Braunkohle drittichtigster Primärenergieträger in *Deutschland* (8.1% des Primärenergieverbrauchs).
- Hoher Wassergehalt = geringerer Energieinhalt als Steinkohle, deshalb: Braunkohletransport energetisch ungünstig:
 - ⇒ Kraftwerke zur Verstromung in Tagebaunähe (Förderband zum KW)
 - ⇒ anschließender Stromtransport über Freileitungen



R Ressourcen

R10. Kernbrennstoffe



1. Energieträger: Reserven und Ressourcen
2. Sonnenenergie
3. Wasserkraft
4. Windkraft
5. Meeresenergie
6. Erdöl
7. Erdgas
8. Steinkohle
9. Braunkohle
10. Kernbrennstoffe
11. Erdwärme
12. Biomasse
13. Energieströme



R10 Kernbrennstoffe

Übersicht



1. Kernspaltung (<https://www.kernd.de/kernd-wAssets/docs/service/018basiswissen.pdf>)

- Prinzip
- Brennstoffe
- Ressourcen

2. Kernverschmelzung

- Prinzip
- Brennstoffe
- Ressourcen



R10 Kernbrennstoffe

R10.1 Kernspaltung – Prinzip



- **Verbrennung** fossiler Brennstoffe:
Nutzung der **Bindungsenergie der Elektronen in der Atomhülle!**
- **Kernspaltung und Kernfusion:**
Nutzung der um Größenordnungen höheren **Bindungsenergie der Kernteilchen!**
- Technisch relevant: **Neutroneninduzierte Kernspaltung:**
 - Relativ langsames Neutron („thermisches Neutron“) kommt schwerem Atomkern nahe.
 - Das Neutron wird absorbiert und der angeregte Atomkern spaltet sich in zwei mittelschwere Kerne, die selbst tw. weiter zerfallen.



R10 Kernbrennstoffe

R10.1 Kernspaltung – Spaltprodukte



- Spaltprodukte:

a) Kerne geringerer Ordnungszahl und Masse, z. B. Kr und Ba

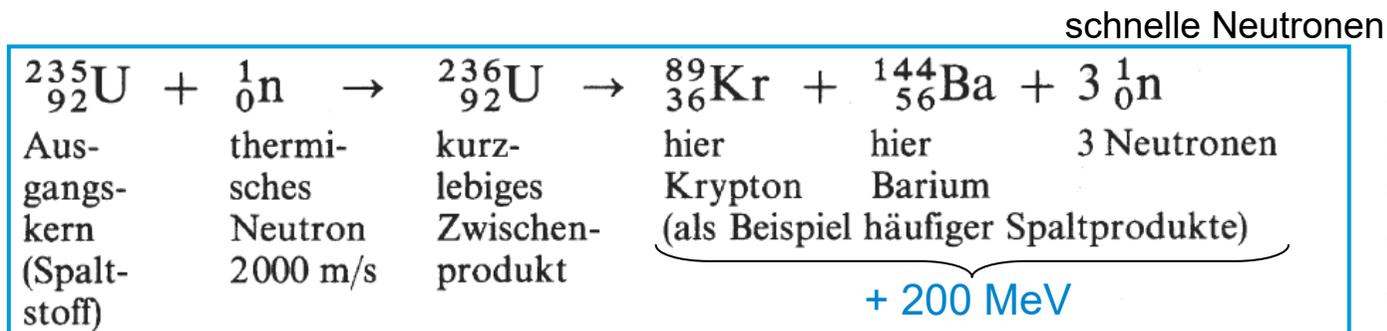
und

b) Schnelle freie Neutronen ($W_k = \text{ca. } 2 \text{ MeV}$):

Diese werden im Moderator des Reaktors zu

langsamen („thermischen“) Neutronen ($W_k < 0.1 \text{ eV}$) abgebremst:

Langsame Neutronen stehen zur erneuten neutroneninduzierten Spaltung zur Verfügung (kontrollierte Kettenreaktion)!



Quelle: Dubbel



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Masse-Energie-Erhaltung



- **Energie-Masse-Erhaltung:**

Bei Kernumwandlungsprozessen bleiben i. A. NICHT die Energie und die Masse jeweils für sich erhalten, sondern die SUMME aus Masse (umgerechnet in Energie $W = m \cdot c_0^2$) UND Energie bleibt konstant.

$$W = m \cdot c_0^2 \quad \text{Einstein'sche Formel} \quad c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s (Vakuumlichtgeschwindigkeit)}$$

- **Massendefekt & Kernbindungsenergie:**

- Die Masse des Atomkerns ist kleiner als die Summe der Massen der im Kern vereinigten Kernbausteine.
- Der Massendefekt Δm ist durch die „starke Wechselwirkungs-Kraft“ bedingt.
- Wenn der Kern in seine Nukleonen-Bestandteile (p, n) zerlegt würde, würde die Kern-Bindungsenergie $\Delta m \cdot c_0^2$ frei.



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Massendefekt = Kernbindungsenergie

$$1m_u = m_{12C} / 12 = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad 1\text{kg}/(1m_u) = 6.023 \cdot 10^{26} = L \quad \text{Loschmidt-Zahl}$$

- **Beispiel:**

He-Atom: ${}^4_2\text{He} : m_{\text{He}} = 4.002597 \cdot m_u \quad A = 4$

Bestandteile:

$$\sum m = \begin{cases} 2p: 2m_p = 2 \cdot 1.00727 \cdot m_u = 2.01454 \cdot m_u \\ 2n: 2m_n = 2 \cdot 1.00866 \cdot m_u = 2.01732 \cdot m_u \\ 2e: 2m_e = 2 \cdot 0.00055 \cdot m_u = 0.0011 \cdot m_u \end{cases}$$

$= 4.03296 \cdot m_u$

$$\Delta m = m_{\text{He}} - \sum m = -0.03036 \cdot m_u$$
$$1000 \cdot \Delta m / (4 \cdot m_u) = -7.59$$

- Kernbindungsenergie des He je Nukleon:

(1 MeV = $1.6 \cdot 10^{-13}$ J)

$$\frac{\Delta W}{A} = \frac{\Delta m \cdot c_0^2}{4} = -7.08 \text{ MeV}$$

- Kernbindungsenergie je Kern: ${}^4_2\text{He} : \Delta W = 4 \cdot (-7.08) = -28.3 \text{ MeV}$
 ${}^3_2\text{He} : 3 \cdot (-7.08) = -21.2 \text{ MeV}$

R10.1 Kernspaltung – Prinzip

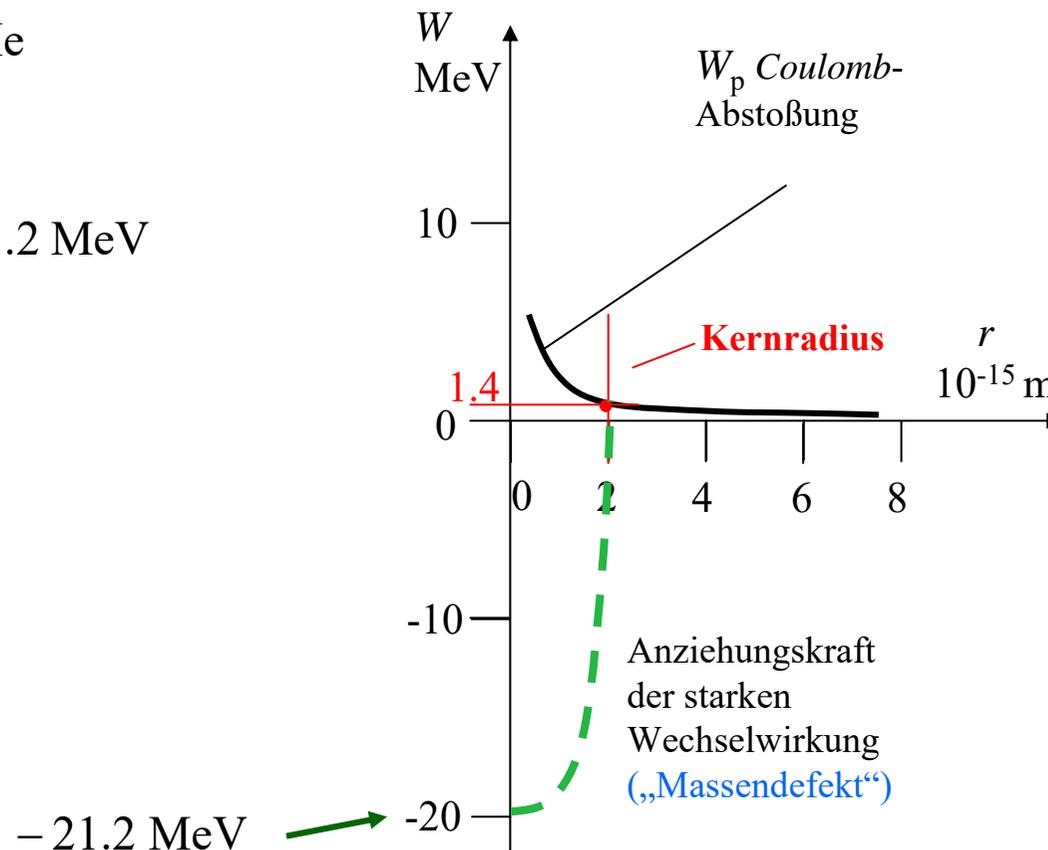
Beispiel: Kernbindungsenergie ${}^3_2\text{He}$

Beispiel:

Heliumkern: $Z = 2: {}^3_2\text{He}$

Kernbindungsenergie:

$${}^3_2\text{He}: 3 \cdot (-7.08) = -21.2 \text{ MeV}$$



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

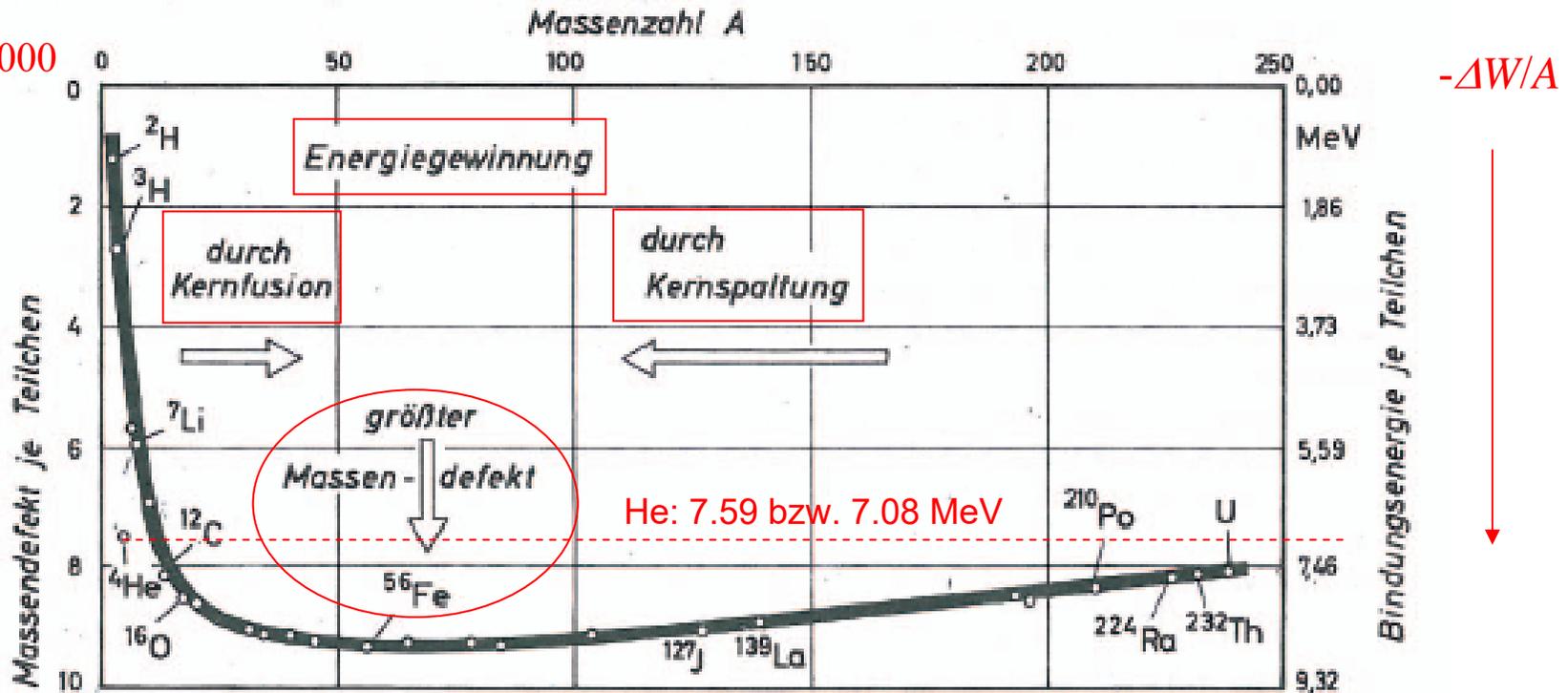
Kernbindungsenergie je Nukleon $\Delta W/A$

Den größten Massendefekt weisen die mittelschweren Kerne auf: Eisen Fe, $Z = 26$, $A = 56$

$$\Delta W = \Delta m \cdot c_0^2$$

$-\Delta m/A$

in $m_u/1000$

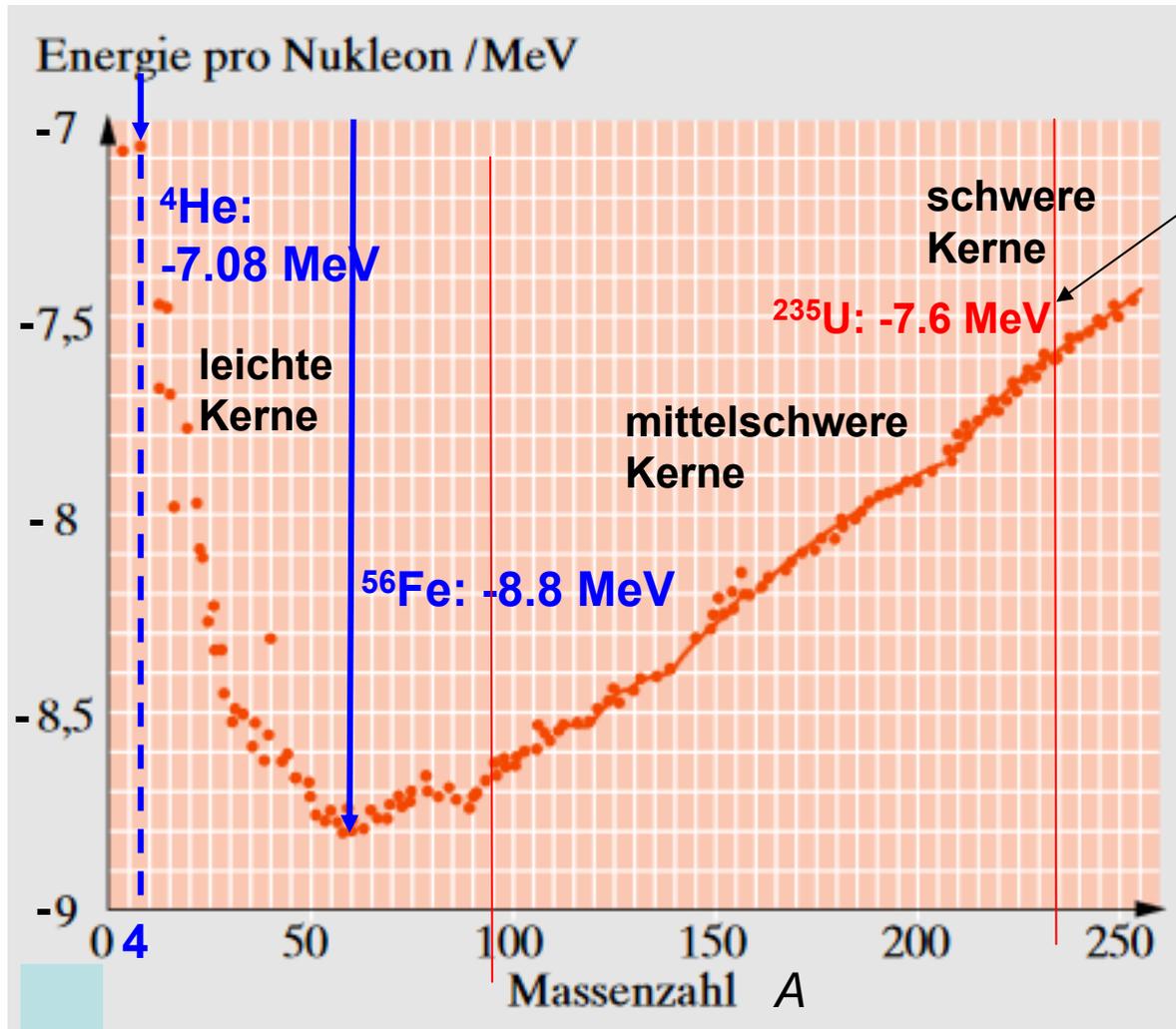


Quelle: Schreiner, Physik



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Kernbindungsenergie je Nukleon $\Delta W / A$



$$\Delta W_{235\text{U}} / A = -7.6 \text{ MeV} = \Delta m_{235\text{U}} \cdot c_0^2$$

$$\Rightarrow \Delta m_{235\text{U}} / A = -0.008 \cdot m_u$$

- **Kernverschmelzung (Fusion):**

Werden zwei leichte Kerne verschmolzen, **wird Energie frei**, denn die beiden leichten Kerne sind zusammen schwerer als der resultierende Kern.

- **Kernspaltung (Fission):**

Wird ein schwerer Kern in zwei mittelschwere Kerne gespalten, **wird Energie frei**, denn diese beiden Kerne sind zusammen leichter als der Ausgangskern.

Quelle: Gerthsen, Physik, Springer



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Kernspaltung mit „langsamen“ Neutronen < 0.1 eV



- **Langsame („thermische“) Neutronen:** $m_n = 1.67 \cdot 10^{-27}$ kg
Haben die Geschwindigkeit der Moleküle eines Gases mit der Temperatur T (Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung)
$$T = 293 \text{ K} : W_k = m_n \cdot v_{av}^2 / 2 = 3kT / 2 = 0.038 \text{ eV} \Rightarrow v_{av} = 2700 \text{ m/s}$$
- **Bohr & Wheeler (1939):** Nur schwerste Kerne $Z \geq 90$ (Thorium) mit ungerader Neutronenzahl $N = A - Z$ lassen sich künstlich spalten durch „thermische“ Neutronen
- Nur ^{235}U kommt **natürlich** vor, das diese Bedingung erfüllt:
$$^{235}_{92}\text{U} : N = A - Z = 235 - 92 = 143 \text{ ungerade}$$
$$^{238}_{92}\text{U} : N = A - Z = 238 - 92 = 146 \text{ gerade} \Rightarrow \text{nicht spaltbar durch therm. Neutronen}$$
- **Künstlich** hergestellte Isotope, die durch thermische Neutronen spaltbar sind:
Aus $^{232}_{90}\text{Th}$: $^{233}_{92}\text{U} : N = A - Z = 233 - 92 = 141$ ungerade
Aus $^{238}_{92}\text{U}$: $^{239}_{94}\text{Pu} : N = A - Z = 239 - 94 = 145$ ungerade
- **Beispiele:** Durch **thermische** Neutronen
a) spaltbare Pu-Isotope: $^{239}_{94}\text{Pu}$, $^{241}_{94}\text{Pu}$ b) nicht spaltbar: $^{240}_{94}\text{Pu}$, $^{242}_{94}\text{Pu}$
Aber: Alle Pu-Isotope sind durch **schnelle** Neutronen spaltbar!



R10.1 Kernspaltung

Actinoide

- **Actinoide:** (siehe Kap. G Grundlagen)

- a) Thorium (Th), Protactinium (Pa), Uran (U: $Z = 92$): ${}^{232}_{90}\text{Th}$, ${}^{231}_{91}\text{Pa}$, ${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$
Schwerste natürlich vorkommende Elemente, deren Kerne instabil (radioaktiv) sind.
Sie zerfallen gemäß den „natürlichen“ Zerfallsreihen in stabile End-Elemente.

Uran-238 (Halbwertszeit HWZ: $4.468 \cdot 10^9$ a; Uran-Radium-Reihe),

Uran-235 (HWZ: $703.8 \cdot 10^6$ a; Uran-Actinium-Reihe),

Thorium-232 (HWZ: $1.405 \cdot 10^{10}$ a).

(Pa: „Kurzlebig“: In freier Natur selten!)

- b) **Transurane** (Protonenzahl $Z > 92$):

Kommen in der Natur „natürlich“ nicht vor, weil sie (relativ) „rasch“ zerfallen;

Neptunium (Np),

Plutonium (Pu),

Americium (Am),

Curium (Cm),

Berkelium (Bk),

Californium (Cf),

Einsteinium (Es)

u. 4 weitere.

$Z \uparrow$

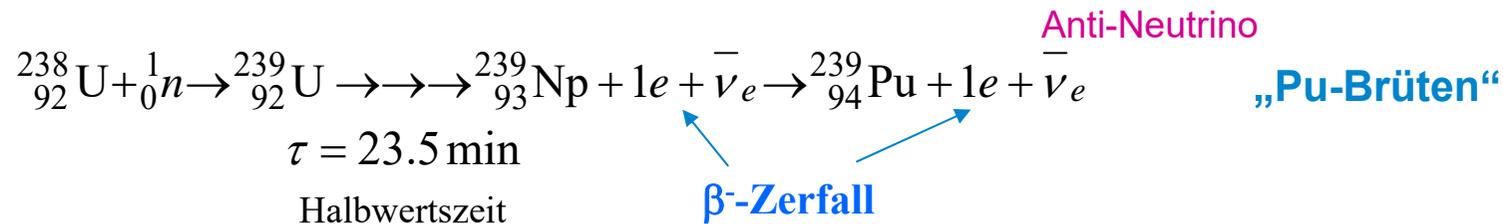
Quelle: Wikipedia.de

R10.1 Kernspaltung – Prinzip

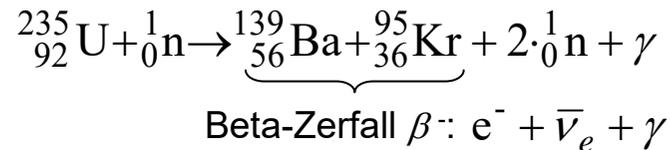
Kernspaltung Uran ^{235}U (Hahn & Straßmann, D, 1938)



- **1938: Hahn & Straßmann** beschießen natürliches Uran (99.3% ^{238}U , 0.7% ^{235}U) mit **thermischen Neutronen**
- Positiv geladene U-Kerne stoßen ungeladene Neutronen **nicht ab!**
- ^{238}U wird nicht gespalten, sondern wandelt sich um:



- Das **zunächst unbeachtete ^{235}U** wird gespalten: Spaltprodukte z. B. Ba, Kr, n



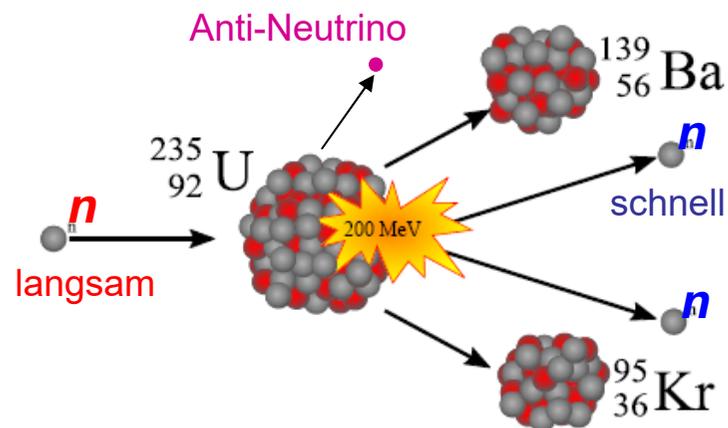
$$\text{Massenzahl: } 235 + 1 = 139 + 95 + 2$$

$$\text{Kernladungszahl: } 92 = 56 + 36$$



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Kernspaltung Uran ^{235}U



$$W_k = \frac{m_n v_{av}^2}{2} < 0.1 \text{ eV} \Rightarrow v < 4.36 \cdot 10^3 \text{ m/s}$$

„langsames“ Neutron
z. B. 0.025 eV, 2200 m/s

Quelle:

Wikipedia, Kernspaltung

- Die **Spaltprodukte** (hier: Ba, Kr, 2n) **sind leichter** als die Massensumme von **U-Kern** und **n**, so dass ein **Massendefekt** auftritt: Es wird Kernbindungsenergie 200 MeV frei!

R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Kernspaltung von Uran ^{235}U : Spaltprodukte

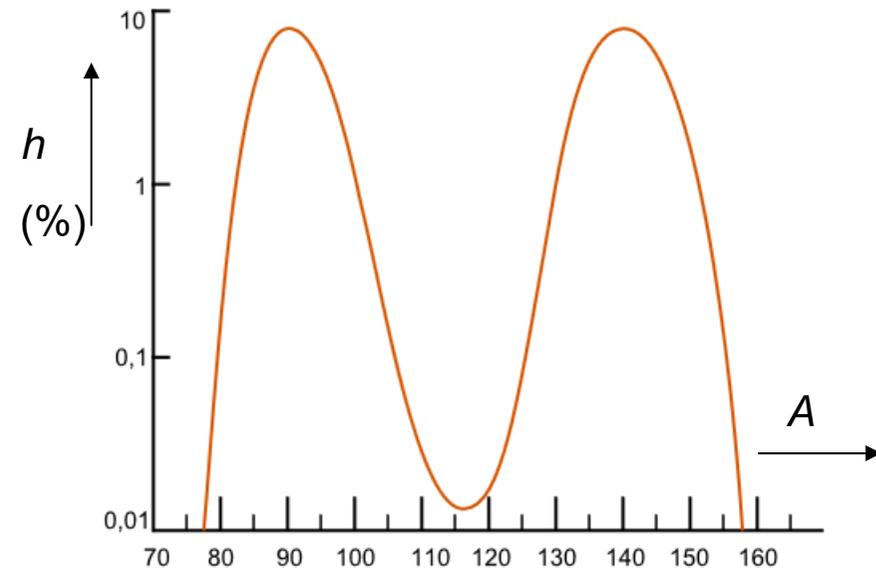


- Spaltprodukte a und b: z. B.:

a + b:

Sn + Mo, Te + Zr, Ba + Kr,
Sb + Nb, Xe + Sr, La + Br, ... } Weitere Kern-
umwandlungen
durch Beta-Zerfall

- Häufigkeit h der „Spaltfragmente“
als Funktion der Spaltprodukt-Massenzahl A



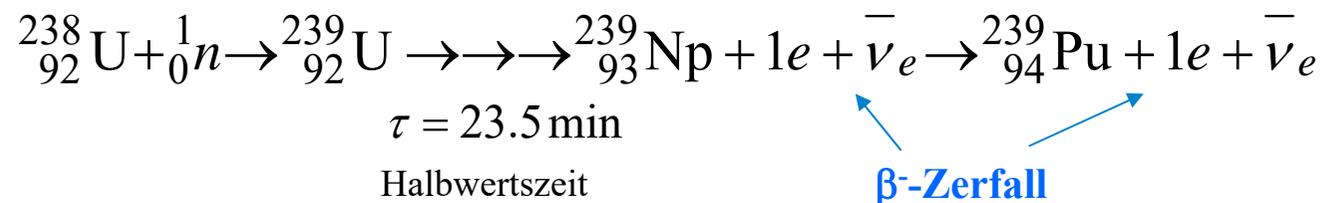
Quelle: Wikipedia, Kernspaltung

- **Resultat:** Beschuss eines „schweren“ ^{235}U -Kerns mit „langsamen“ Neutronen ($W_k < 0.1 \text{ eV}$)
⇒ Kernspaltung in zwei „mittelschwere“ instabile Kerne (radioaktive Spaltprodukte)
und 2 ... 3 schnelle Neutronen ($W_k \sim 2 \text{ MeV}$): Kernbindungs-Energie wird frei!
- „Langsames“ Neutron: $v_{av} = \text{ca. } 2500 \text{ m/s}$, „schnelles“ Neutron: $v_{av} = \text{ca. } 20\,000\,000 \text{ m/s}$

R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Uran 235 gemeinsam mit Uran 238

- **Uran 235** wird sehr wirksam durch „**langsame**“ Neutronen (Energie < 0.1 eV) gespalten.
- Dabei werden 2 ... 3 „**schnelle**“ Neutronen (Energie ca. 2 MeV/Neutron) ausgesandt.
- **Uran 238:** a) Reagiert mit „**langsamen**“ Neutronen (Energie < 6 eV) KAUM!
b) Fängt „**schnelle**“ Neutronen ein, wird aber i. A. NICHT gespalten, sondern in spaltbares Plutonium umgewandelt („Pu-Brüten“)!



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Energiegewinn bei der Kernspaltung Uran 235



- Massendefekt je Kernbaustein bei Uran 235: ^{235}U : $\Delta m_{\text{U}} / A = -0.008 \cdot m_{\text{u}}$
- Massendefekt je Kernbaustein bei mittelschweren Kernen: $A = \text{ca. } 100$: $\Delta m_{\text{MS}} / A = -0.009 \cdot m_{\text{u}}$

$$(\Delta m_{\text{U}} - \Delta m_{\text{MS}}) / A = (-0.008 + 0.009) \cdot m_{\text{u}} = 0.001 \cdot m_{\text{u}}$$

- Massendefektdifferenz je Kernbausteinmasse: $\frac{0.001 \cdot m_{\text{u}}}{m_{\text{u}}} = 0.001$

- Ein Promille der ^{235}U -Masse tritt als frei werdende Kern-Bindungsenergie auf!

- Frei werdende Kern-Bindungsenergie für $m = 1 \text{ kg } ^{235}\text{U}$:

$$W_{^{235}\text{U}} = 0.001 \cdot m \cdot c_0^2 = 0.001 \cdot 1 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$$



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Kernspaltung Uran 235 vs. Steinkohle

- Frei werdende Kern-Bindungsenergie für $m = 1 \text{ kg } ^{235}\text{U}$:

$$W_{235\text{U}} = 0.001 \cdot m \cdot c_0^2 = 0.001 \cdot 1 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Vergleich: 1 kg Steinkohle ^{12}C : Chem. Bindungsenergie: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 - 394 \text{ kJ/mol}$

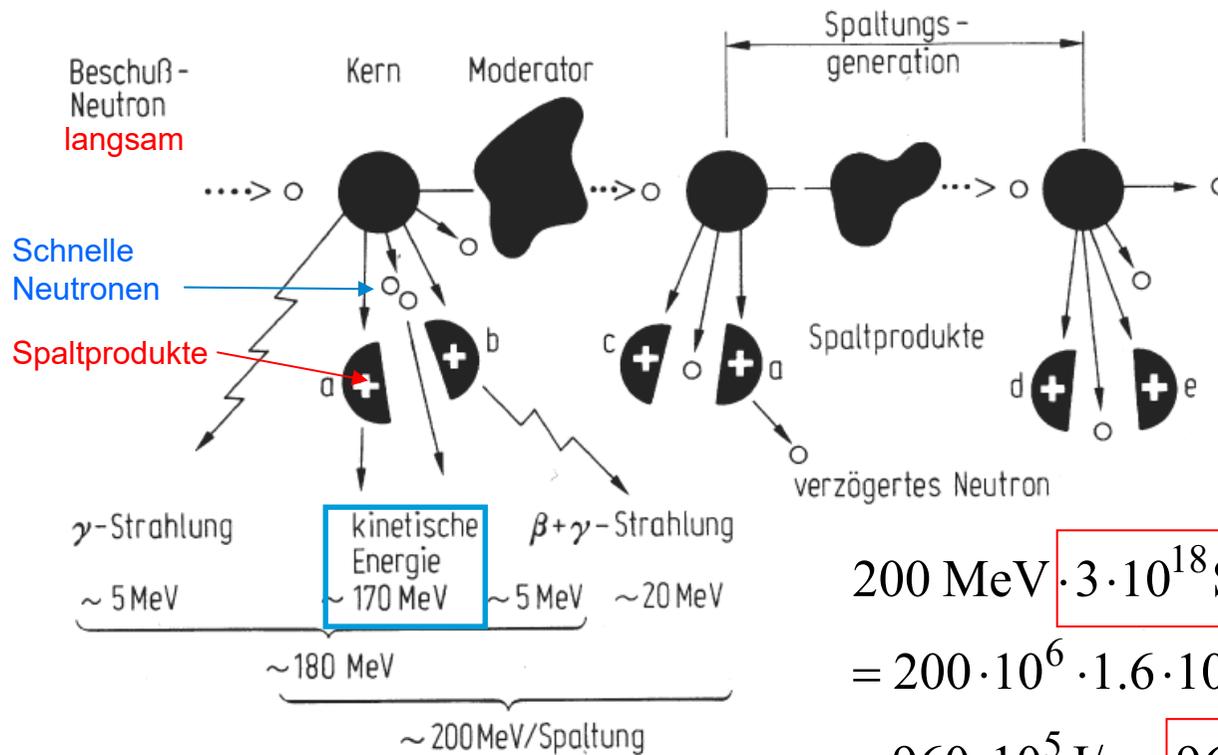
12 kg entspr. 1 kMol: $W_{\text{ch}} = \frac{1 \text{ kg}}{12 \text{ kg/kMol}} \cdot 394 \frac{\text{MJ}}{\text{kMol}} = 33 \cdot 10^6 \text{ J}$

$$\frac{W_{\text{ch}}}{W_{235\text{U}}} = \frac{1}{2.8 \cdot 10^6}$$

- Bei der Spaltung schwerer Kerne $Z \geq 90$ (Massendefekt ca. $\Delta m / A = -0.008 \cdot m_u$) wird **drei Millionen Mal so viel Energie frei** wie bei der Verbrennung der gleichen Masse Steinkohle.
- 1 kg Uran = 52 ml = 52 cm³, 1 kg Kohlenstoff = 442 cm³ !

R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Kernspaltung – Energiebilanz (2)



Quelle: Dubbel, Springer

$$\begin{aligned}
 & 200 \text{ MeV} \cdot 3 \cdot 10^{18} \text{ Spaltungen/s} = \\
 & = 200 \cdot 10^6 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ AVs} \cdot 3 \cdot 10^{18} / \text{s} = \\
 & = 960 \cdot 10^5 \text{ J/s} = 96 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Anreicherung von Uran 235 auf ca. 3 ... 4%



Resultat:

- In einem Block **natürlichen Urans** (99.3% ^{238}U , 0.72% ^{235}U) kann **KEINE Kettenreaktion** auftreten, da die bei der Spaltung von ^{235}U ausgestoßenen **schnellen** Neutronen vorwiegend von ^{238}U -Kernen eingefangen werden, wobei sich Plutonium bildet („Pu-Brüten“).
- Für die Kernkraftnutzung muss aus dem Uranblock das ^{235}U durch z. B. sehr schnell drehende **Uranzentrifugen** getrennt (angereichert) werden (^{238}U schwerer als ^{235}U !).
- **Uran-Anreicherung** („Brennelemente“): ^{235}U -Anteil auf 3 ... 4% erhöht!



R1.1 Kernspaltung – Prinzip

Kontrollierte Kettenreaktion bei Uran ^{235}U (1)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Bei der Spaltung von ^{235}U werden 2 ... 3 **schnelle** Neutronen frei: $W_k = \text{ca. } 2 \text{ MeV} \gg 0.1 \text{ eV}$
- **L. Szilard:** 1934: Idee einer **Kettenreaktion** zur Energiegewinnung
- Damit im ^{235}U eine Spaltungs-Kettenreaktion stattfinden kann, müssen die schnellen Neutronen abgebremst werden, um als „**thermische**“ **Neutronen** weitere ^{235}U -Kerne zu spalten.
- **Bremsmittel (Moderator):** H_2O , D_2O , Graphit $^{12}_6\text{C}$, Beryllium ^9_4Be , ...
- **Moderator:** Stoff, der die „schnellen“ Neutronen zu „langsamen“ Neutronen abbremst.
- Da 2 ...3 Neutronen je Spaltung frei werden, muss durch **Neutronenabsorber** (z. B. Bor $^{11}_5\text{B}$) dafür gesorgt werden, dass **im Mittel nur 1 Neutron/Spaltung** eine weitere Spaltung bewirkt.
- Thermische Neutronen einfangende **Steuerelemente** (Cd, B: $^{112}_{48}\text{Cd}$, $^{11}_5\text{B}$) für
Regelung & Abschaltung des Reaktors („Notbremse“: Borsäure eingespritzt)



R1.1 Kernspaltung – Prinzip

Kontrollierte Kettenreaktion bei Uran ^{235}U (2)



- **KONTROLLIERTE Kettenreaktion:**

Je zertrümmertem ^{235}U -Kern wird ein dabei frei werdendes thermisches Neutron n genutzt, um einen weiteren ^{235}U -Kern zu zertrümmern = konstante Spaltungsrate!

- Energiebilanz der Kernspaltung: **Kinetische Energie** der **Spaltprodukte** dominiert.
- Sie erwärmen durch Stöße über z. B. die Zirkalloy-Brennstabhülle das Kühlmittel z. B. Wasser
- Die kinetische Energie des Spaltstoffs ist Wärmequelle eines **thermischen Kraftwerks**.
- **Kühlmittel** (z. B. Wasser, He-Gas, flüssiges Natrium $^{23}_{11}\text{Na}$, $\vartheta > 98^\circ\text{C}$):
Spaltungswärme erhitzt Kühlmittel,
das die Wärme abführt z.B. zum Wärmetauscher.
- Im **Wärmetauscher** z. B. Wasser aus Sekundärkreislauf erhitzt und verdampft \Rightarrow
Dampfturbine \Rightarrow E-Generator: Erzeugung el. Energie



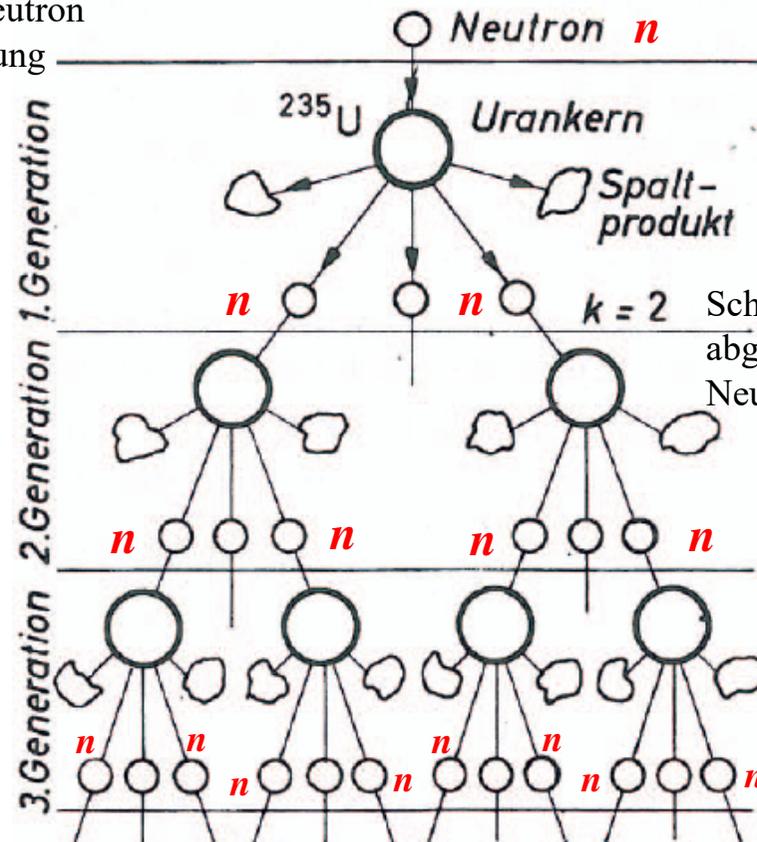
R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Unkontrollierte Kettenreaktion bei reinem Uran ^{235}U

Lawinenartige Zunahme der Kettenreaktion

Langsames „Start“-Neutron
z. B. aus Höhenstrahlung
oder
Spontanzerfall

Hier: Annahme:
Drei schnelle Neutronen
 n je Spaltung



Schnelle Neutronen durch Stöße
abgebremst werden zu langsamen
Neutronen

Quelle: Schreiner, Physik

R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Kritische Masse m_{krit}



a) Reines Uran ^{235}U -Spaltung – KRITISCHE Masse m_{krit} :

- Die „schnellen“ Neutronen müssen im ^{235}U Uranblock beträchtliche Wege zurücklegen, um durch im Mittel ca. 17 Stöße im U-Block abgebremst als „langsame“ Neutronen weitere ^{235}U -Kerne zu spalten.
- Bei zu kleinen U-Blockabmessungen verlassen zu viele schnelle Neutronen den Block ohne Spaltungstreffer \Rightarrow Kettenreaktion erlischt = **UNTERKRITISCHE ^{235}U -Masse**
- Bei der **KRITISCHEN Masse** spaltet im Mittel 1 Neutron aus einem Spaltungsvorgang den nächsten Kern \Rightarrow **FRIEDLICHE Kernkraftnutzung:**
 ^{235}U : $m_{\text{krit}} = \text{ca. } 50 \text{ kg}$ bei kugelförmiger Anordnung (Kugelradius $r = 8.5 \text{ cm}$, $\gamma_{\text{U}} = 19.16 \text{ kg/dm}^3$)

- b) Bei ÜBERKRITISCHER Masse $m > m_{\text{krit}}$ ohne Moderator spaltet im Mittel mehr als 1 Neutron aus einem Spaltungsvorgang den nächsten Kern**
- \Rightarrow **lawinenartige Zunahme der Kettenreaktion,**
 - \Rightarrow **explosionsartige Zunahme der Wärmeentwicklung,**
 - \Rightarrow **Prinzip der Atombombe!**

- c) Friedliche Kernkraft-Nutzung:** Leicht überkritische Masse, die durch Steuerstäbe über Neutroneneinfang genau „kritisch“ gehalten wird!



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Reaktortyp „Thermischer“ Reaktor



- „Thermischer“ Reaktor: Prinzip:

Verwendung von „langsamen“ (= thermischen) Neutronen für Kernspaltung!

- „Thermischer“ Reaktor:

(fast ausschließlich genutzter Reaktortyp weltweit)

90%: Leichtwasser-Reaktor: Welt:

ca. 70 % Druckwasser-Reaktor, 30 % Siedewasserreaktor

10%: Schwerwasser-Reaktor & Graphitmoderierter Reaktor

- **Leichtwassermoderierter Reaktor:** Moderator und Kühlmittel: H₂O

- „Gewöhnliches“ (= „leichtes“ Wasser) = **Leichtwasserreaktor** (90% der Reaktoren weltweit)

- Kernspaltung von angereichertem ²³⁵U (ca. 3 ... 4%).

- Anreichern ist teuer, aber erforderlich für ausreichend große Energieausbeute!

- **Bauformen der Leichtwasser-Reaktoren:**

- Siedewasserreaktor, 50 MW/m³

- Druckwasserreaktor, 100 MW/m³

(z. B. neue Generation European Pressurized Reactor EPR, *Areva*)



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Reaktor-Prinzipien



1) Homogener Reaktor: Kernbrennstoff, Moderator, Kühlmittel „gleichmäßig“ verteilt:

z. B.: a) **Schwerwasser-Reaktor:**

Natürliches Uran (^{235}U & ^{238}U) und Moderator D_2O , sonst zu großer Einfang der schnellen Neutronen durch ^{238}U

b) **Flüssigsalz-Reaktor:**

In heißer Salzschnmelze z. B. gelöstes $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$ („U-Brüten“);
 ^{233}U ist durch thermische Neutronen spaltbar \Rightarrow Energiegewinn!

2) Heterogener Reaktor: Kernbrennstoff in zylindrischen oder kugelförmigen kleinen Massen:

^{238}U kann nur an der Massenoberfläche schnelle Neutronen einfangen:

Es verbleiben ausreichend Neutronen für deren Abbremsung für die Kettenreaktion.



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Heterogener Reaktor



2) Heterogener Reaktor:

2a) „Kernbrennstoff“:

Spaltbare Kerne in leicht überkritischer Masse in „Brennelementen“, die durch **Steuerstäbe** („**Bremsstäbe**“) in kritischem Zustand gehalten werden.

für „**thermische**“ Neutronen: ${}_{92}^{235}\text{U}$ z. B. in angereicherter Form oder ${}_{90}^{232}\text{Th} \rightarrow {}_{92}^{233}\text{U}$ (spaltbar)

für **schnelle Neutronen**: ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{94}^{239}\text{Pu}$: (spaltbar auch durch schnelle Neutronen)

2b) **Moderator**: Nur für „thermische“ Reaktoren, um schnelle Neutronen abzubremesen:

für Natur-Uran: Schweres Wasser: D_2O (teuer) od. Graphit ${}^{12}\text{C}$; für Thorium: Graphit ${}^{12}\text{C}$,

für angereichertes ${}^{235}\text{U}$ (3 ... 4%): „Gewöhnliches“ (= „leichtes“) Wasser H_2O od. Graphit

2c) **Kühlmittel**: H_2O , He-Gas, flüssiges Natrium (Schmelzpunkt 98°C), ...



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Moderation der „schnellen“ Neutronen zu „thermischen“ Neutronen



a) Moderation:

- Abbremsung der „schnellen“ Neutronen durch **wiederholte elastische Stöße** („Streuung“) an leichten Atomkernen (niedrige Massenzahl A).
- Die vom Neutron abgegebene Energie wird als Rückstoß vom getroffenen Atomkern aufgenommen; dieser gibt sie in weiteren Stößen als **Wärme** an die umgebende Materie ab.
- Bremswirkung eines elastischen Stoßes am stärksten bei **gleich großen Massen** $m_1 = m_2$ der Stoßpartner:
 - **Bei zentralem Stoß** reicht ein einziger Stoß aus, um das Neutron auf $v = 0$ zu bremsen.
 - **Idealer Moderator:** Wasserstoffkerne (= Protonen, da $m_p \approx m_n$)

b) Technisch genutzte Moderatoren in Kernkraftwerken:

1) Wasserstoff

a) als ^1H im „leichten“ (= gewöhnlichen Wasser) = „**Leichtwasserreaktor**“ (^{235}U),

b) als ^2H (Deuterium D) im „schweren“ Wasser („**Schwerwasserreaktor**“, ^{238}U),

2) Kohlenstoff (^{12}C) als Graphit (**Graphitmoderierter Reaktor**, z. B. Typ RBMK, *Tschernobyl*)



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Weitere thermische Reaktortypen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- **Schwerwasserreaktor:**

Moderator & Kühlmittel: D₂O (teuer);

Kernbrennstoff: Natürliches Uran (²³⁸U 99.3%, ²³⁵U 0.7%, billig),

Entwicklung in *Kanada*,

- **Graphitmoderierte Reaktoren:**

Moderator: Graphit C,

unterschiedliche Kühlmittel:

- a) **Leichtwasser-Kühlung:**

Kernbrennstoff: Angereichertes Uran ²³⁵U;

z. B. *Russland*: Druckröhren; Typ RBMK (z. B. *Tschernobyl*)

- b) **Gaskühlung**, z. B. He-Gas,

Kernbrennstoff: Thorium, „**Hochtemperaturreaktor**“ (6 MW/m³),

„U-Brüten“: ${}_{90}^{232}\text{Th} \rightarrow {}_{92}^{233}\text{U}$ (mit therm. Neutronen spaltbar)

seltene Nutzung bisher überwiegend als Prototypen

(D: *Hamm*: 300 MW, Graphit-Kugelhaufen-Reaktor)



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

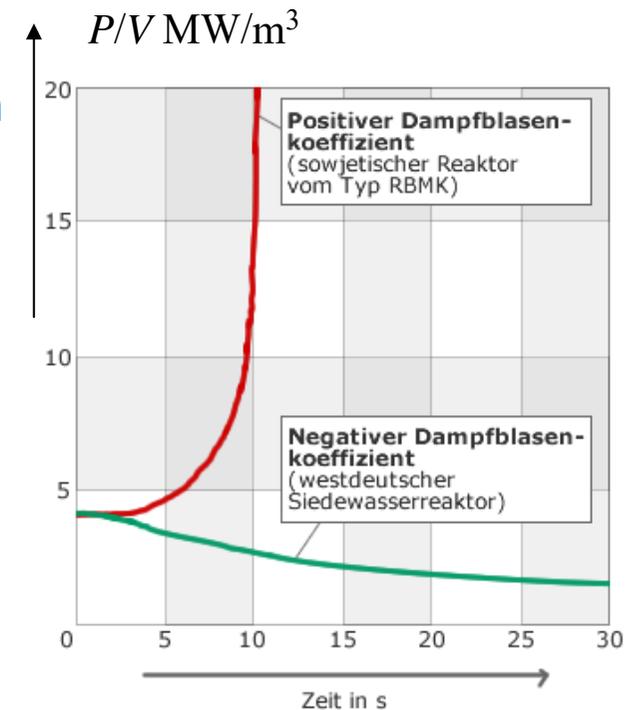
„Thermische“ Reaktoren - Dampfblaseneffekt

- **Eigensicherheit bei Leichtwasser-moderierten Reaktoren (50 ... 100 MW/m³):**

- **Reaktorkühlmittel und Moderator:** Wasser

Zu hohe Wärmeleistung $P \Rightarrow$ ungewollter Anstieg der Reaktorkerntemperatur T : Wasser siedet \Rightarrow Dampfblasenbildung (= geringere Dichte als Wasser) \Rightarrow schnelle Neutronen werden nicht mehr abgebremst \Rightarrow Kettenreaktion erlischt $\Rightarrow P$ und T sinkt, ABER: Notkühlung für Nachzerfallswärme trotzdem nötig!

- **Militär. Nachteil:** Erbrütetes Pu nur nach Reaktoröffnung entnehmbar!



Quelle: Wikipedia.de

R10.1 Kernspaltung – Prinzip

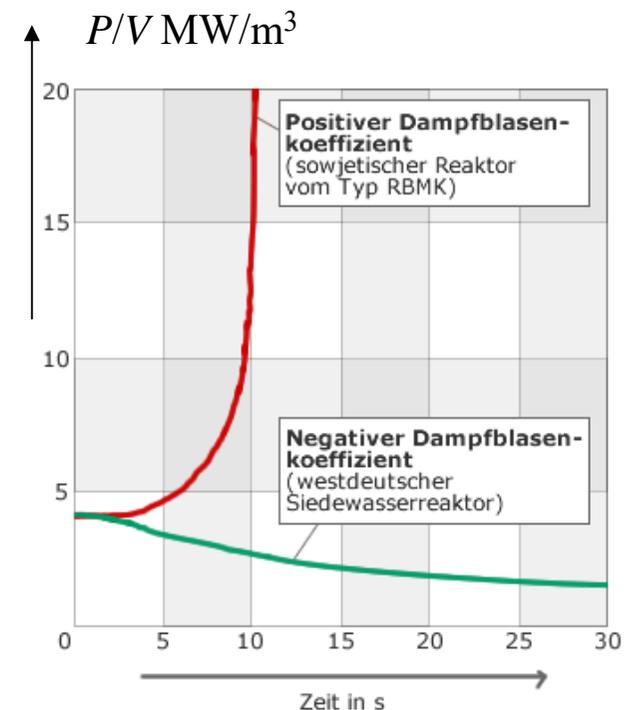
„Thermische“ Reaktoren - Dampfblaseneffekt

- **Kernschmelzgefahr bei graphitmoderierten Reaktoren:** (ca. 5 MW/m^3):

- **Reaktorkühlmittel:** Wasser in geschlossenen Druckröhren um jedes einzelne Brennelement, **Moderator:** Graphitblöcke

Zu hohe Wärmeleistung $P \Rightarrow$ Anstieg von $T \Rightarrow$ Wasser siedet \Rightarrow Dampfblasenbildung \Rightarrow aus Graphit kommende langsame Neutronen erreichen vermehrt den Uran-Brennstoff \Rightarrow Kettenreaktion nimmt zu $\Rightarrow P$ und T steigen rasch an (**Reaktorunfall in Tschernobyl, 1986**)

- **Militär. Vorteil:** Pu während des Betriebs entnehmbar!



Quelle: Wikipedia.de

R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Nachzerfallswärme (1)

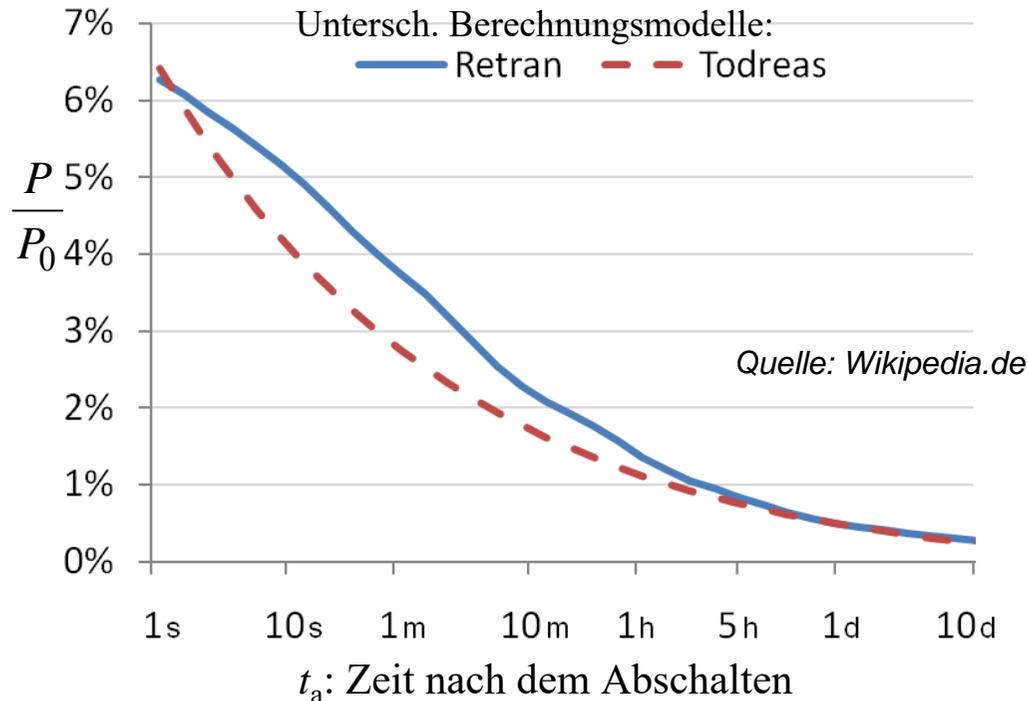


- **Abschalten** des Reaktors = Unterbrechen der Kettenreaktion durch Einfahren der „Bremsstäbe“ (B, Cd)
- **Spaltprodukte:**
Haben Massezahlen gehäuft bei $A = \text{ca. } 100$ und $A = \text{ca. } 140$, sind radioaktiv und zerfallen „ α , β , γ -Zerfall“ i. A. innerhalb weniger Tage zu stabilen Kernen.
- Dieses Zerfallen erzeugt „Nachzerfallswärmeleistung“ P , die mit der Zeit t_a nach dem Abschalten des Reaktorbetriebs abnimmt.



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Nachzerfallswärme (2)



Way-Wigner-Formel (T_0, t_a in s)

$$\frac{P(t_a)}{P_0} \approx 0.066 \cdot \left(\frac{1}{t_a^{0.2}} - \frac{1}{(T_0 + t_a)^{0.2}} \right)$$

$$10 \text{ s} \leq t_a \leq 100 \text{ d}$$

- Reaktorbetrieb für T_0 Tage, anfangs mit therm. Leistung P_0 betrieben
- t_a Tage nach dem Abschalten:
Nachzerfall: Wärmeleistung $P(t_a)$

- **Beispiel:** (Way-Wigner)

$$T_0 = 100 \text{ Tage}, P_0 = 2800 \text{ MW}: t_a = 10 \text{ s}: P(t_a) = 110 \text{ MW}, 4\%$$

$$t_a = 1 \text{ Tag}: P(t_a) = 11 \text{ MW}, 0.4\%$$

R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Kühlung der Nachzerfallswärme



- Nachzerfallswärmeleistung P muss über Kühlsystem abgeführt werden, sonst v. a. bei älteren Reaktoren: **Gefahr der Kernschmelze!**
- Bei Zerstörung des Sicherheitsbehälters: Austritt von radioaktivem Material möglich!
- \Rightarrow **Notkühlsystem** mit unabhängiger Energieversorgung **nötig**, falls Kühlsystem ausfällt!
- **Fukushima, Japan (11.3.2011):** Erdbeben & Flutwelle: ca. 20 000 Tote, 500 000 evakuiert
 - Erdbebensicheres Kernkraftwerk meerwassergekühlt an *Japans* Ostküste, schaltet ab
 - Sämtliche öff. Stromversorgung auf Grund des Erdbebens in Kraftwerksnähe ausgefallen
 - Erd-(See)-Beben löste 12 m hohe Flutwelle aus \Rightarrow 5.6 m hohe Schutzmauer überspült
 - Notstromdiesel z. T. ebenerdig aufgestellt \Rightarrow unter Wasser gesetzt \Rightarrow Notstromausfall
 - Nachzerfallswärme \Rightarrow Kernschmelze durch Ausfall der Notkühlung, große Hitze
 - Hitze \rightarrow Wasser \Rightarrow Wasserstoffgasbildung \rightarrow H₂-O₂-Explosionen an 3 der 6 KW-Blöcke
 - Austritt von hochradioaktivem Material \Rightarrow spätere Notkühlung mit Meerwasser!



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Reaktortyp „Schneller“ Reaktor (1)



- Alle Plutoniumisotope lassen sich durch „schnelle“ Neutronen ($W_k = \text{ca. } 2 \text{ MeV}$) spalten \Rightarrow daher prinzipiell für Kernwaffen geeignet!
- **Friedliche Nutzung: „Schneller“ Reaktor („Schneller Brüter“):** (nur wenige Anlagen weltweit, z. B. *Kalkar, D*, Na-gekühlt)
- Verwendung der „schnellen“ Neutronen für Einfang im ^{238}U -Kern \Rightarrow Umwandlung zu ^{239}Pu
 $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{239}_{94}\text{Pu}$: (spaltbar auch durch schnelle Neutronen)
- Natürliches Uran (99.3% ^{238}U , 0.7% ^{235}U) ist ausreichend für große Energieausbeute, da auch durch Pu-Spaltung über schnelle Neutronen Energie erzeugt wird.



R10.1 Kernspaltung – Prinzip

Reaktortyp „Schneller“ Reaktor (2)



- **Resultat:**

- 60-mal mehr Energie je kg ^{235}U erzielbar als beim „thermischen“ Reaktor!
- Wegen schneller Neutronen kein Moderator nötig = kein H_2O !
- Als Kühlmittel flüssiges Na (Schmelzpkt. 98°C) in Primär- u. Sekundärkreislauf bei ca. 10 bar.
- Tertiärkreislauf mit Wasserdampf (500°C , 180 bar) für Turbine!

ABER: Pu:

- hochgiftig (toxisch),
- hohe natürliche Radioaktivität über lange Zeit („geologisch kurze“ Halbwertszeit 24 111 Jahre)



R10.1 Kernspaltung

Kernbrennstoffe

- Technisch nutzbare Kernbrennstoffe sind durch thermische Neutronen spaltbar!
- Isotope mit hoher Ordnungszahl ($Z \geq 90$, ab Thorium) und ungerader Neutronenzahl
- Technisch relevant für thermische Neutronen sind die Isotope:
 - Uran 235: ${}_{92}^{235}\text{U}$
 - Uran 233: ${}_{92}^{233}\text{U}$
 - Thorium 232: ${}_{90}^{232}\text{Th}$ U-233-Brüten; dieses thermisch spaltbar!
 - Plutonium 239: ${}_{94}^{239}\text{Pu}$
 - Plutonium 241: ${}_{94}^{241}\text{Pu}$

R10.1 Kernspaltung

Uran-Brennstoff-Kette (1)

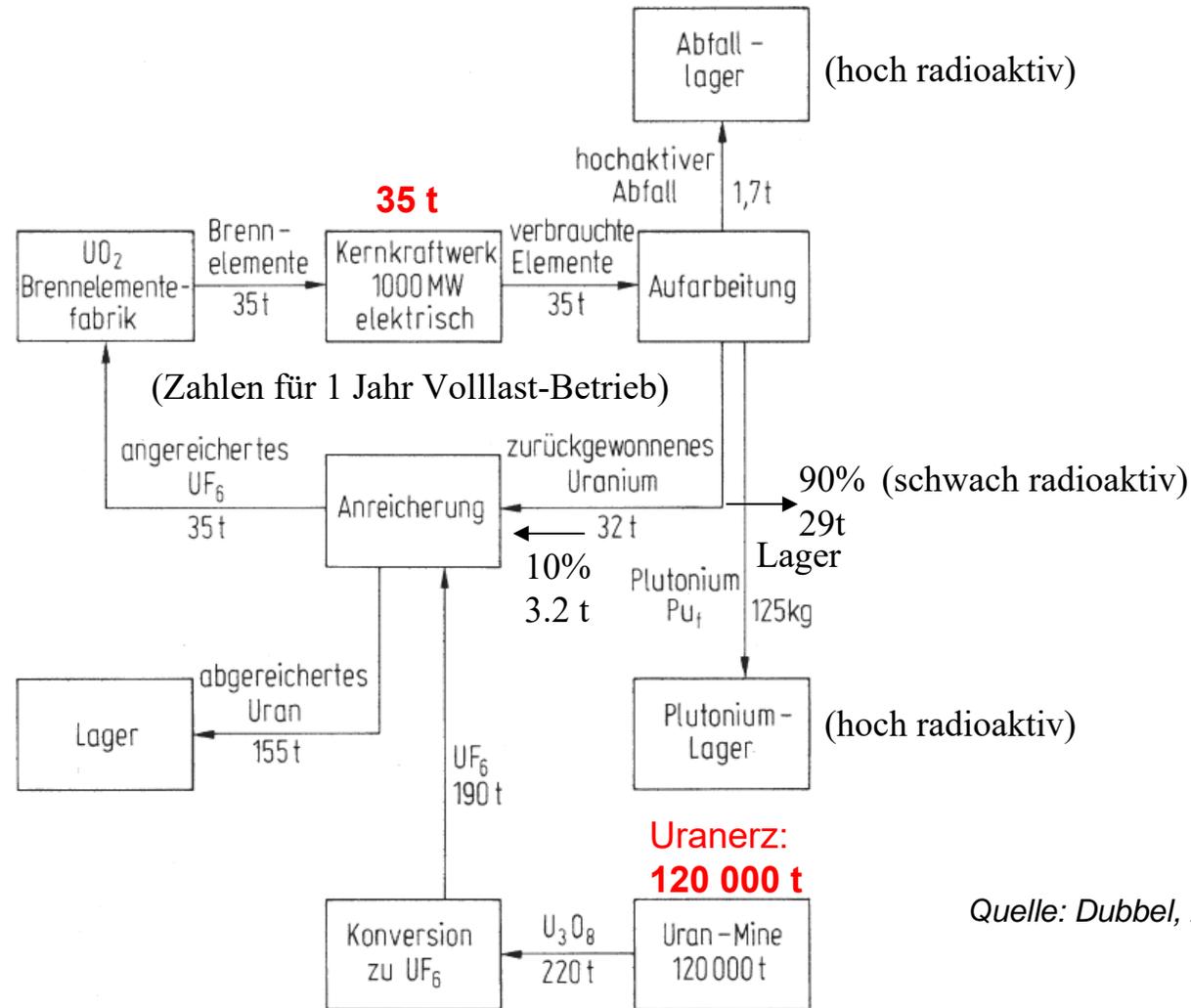


- Aus dem natürlichen Uranerz wird durch Säuren Uranoxid gewonnen (U_3O_8 , Yellow cake).
- Dieses enthält nur **0.71%** des benötigten ^{235}U (99.29%: ^{238}U).
- U_3O_8 wird chemisch umgewandelt in UF_6 , das z. B. in Hochdrehzahl-Zentrifuge durch kleinere Fliehkraft auf ^{235}U als auf ^{238}U im Inneren der Zentrifuge angereichertes U ergibt.
- **Anreicherung auf ca. 3% ^{235}U ; danach:** UF_6 in UO_2 chemisch umgewandelt!
- UO_2 in i. A. lange zylindrische Brennelemente mit Zirkalloy-Hülle verbaut!
- **Nach der Nutzung: Wiederaufbereitung** in der Brennstoffkette möglich!



R10.1 Kernspaltung

Uran-Brennstoff-Kette (2)



Quelle: Dubbel, 2016

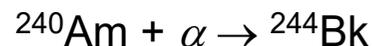
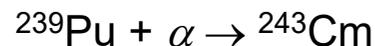
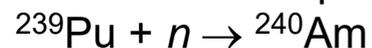
R10.1 Kernspaltung

Bildung von Actinoiden während des Betriebs



- **Transurane** werden **während des Kernspaltungsbetriebs** durch den Einfang von z. B. a) **schnellen Neutronen**, b) α -Teilchen, ... und z. T. anschließend **β -Zerfall gebildet** („erbrütet“), sind aber (außer Pu) tw. **gering neutroneninduziert spaltbar** (= gering energetisch nutzbar).
- Die **Transuran-Kerne** sind **hoch radioaktiv**; sie zerfallen mit tw. sehr unterschiedlich langen Halbwertszeiten.
- Sie sind Teil des „Atommülls“ und **müssen endgelagert** werden.

- **Beispiele** zur Bildung von Transuran-Kernen während der Kernspaltung:

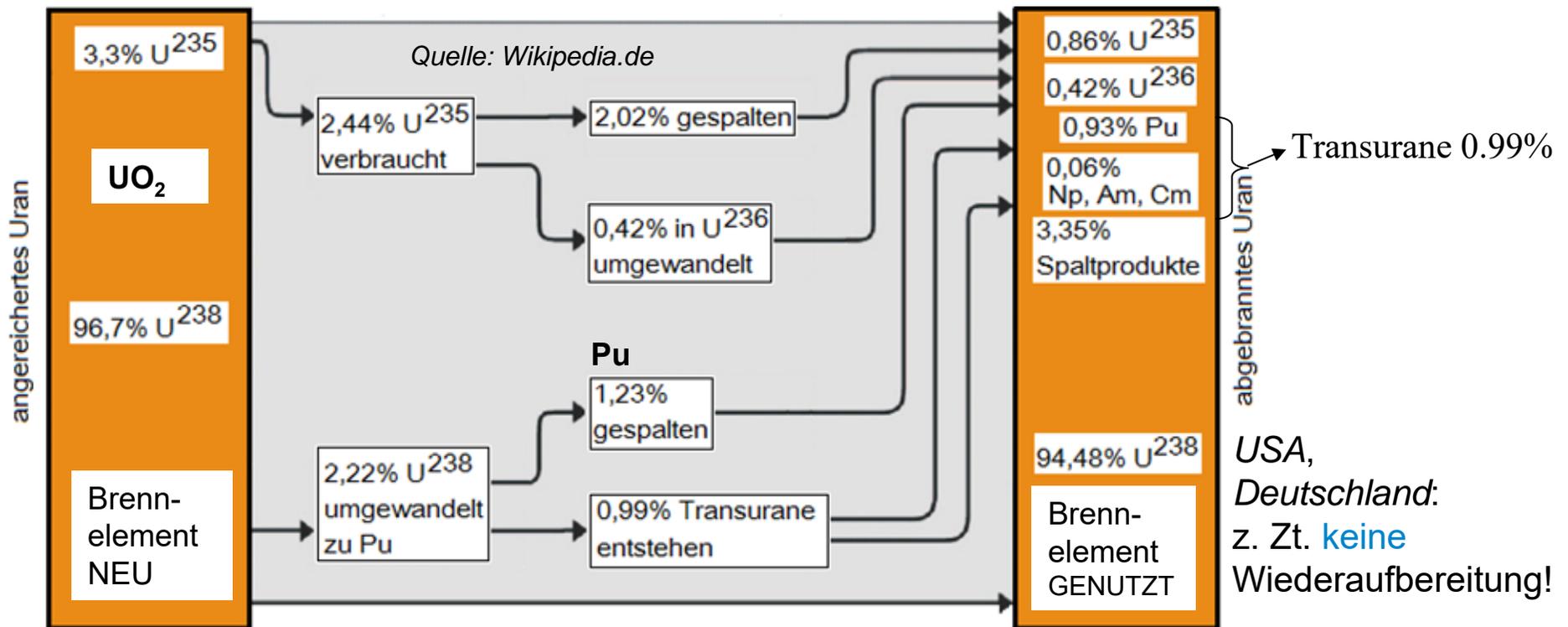


Quelle: Wikipedia.de



R10.1 Kernspaltung

Brennelementnutzung bei der Kernspaltung (1)



R10.1 Kernspaltung

Brennelementnutzung bei der Kernspaltung (2)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- **Abgebrannte Brennelemente:** 95 % Uran, 1 % Plutonium, i. A.: zunächst **zwischengelagert**.
- Durch **Wiederaufbereitung** (z. B. chemisches PUREX-Verfahren):
Uran: 10% Weiterverwendung durch erneute Anreicherung,
Uran: 90 % = nicht verwendbares Uran (schwach radioaktiv ⇒ **Endlager**)
- Spaltprodukte & durch Neutroneneinfang entstandene höhere Actinoide (z. B. Plutonium, Americium, Curium, ...) hoch radioaktiv: **Endlagerung**



R10.1 Kernspaltung

Brennelementbedarf für 1 Jahr Vollastbetrieb



- 100% Brennelementmasse = 35 t: Spaltung von 2.02% ^{235}U + 1.23% ^{239}Pu
- Vereinfacht: 2.02% + 1.23% = 3.55% Spaltung von ^{235}U
- Gespaltene ^{235}U -Masse: $0.0355 \cdot 35\,000 = 1243$ kg pro Jahr
- Je kg ^{235}U : $9 \cdot 10^{13}$ J thermische Energie \Rightarrow Energie pro Jahr W :

$$W / T = 1243 \text{ (kg/a)} \cdot 9 \cdot 10^{13} \text{ J/kg} = 11.2 \cdot 10^{16} \text{ J/a}$$

- Thermische Leistung P_{th} des z. B. Druckwasser-Reaktors:

$$P_{th} = W / T = \frac{11.2 \cdot 10^{16} \text{ J}}{8760 \cdot 3600 \text{ s}} = 3.546 \text{ GW}$$

- Elektrische Leistung P_e des Druckwasser-Reaktors (el. Wirkungsgrad $\eta = 0.33$):

$$P_e = \eta \cdot P_{th} = 0.33 \cdot 3.546 = 1.17 \text{ GW}$$

- Für ca. 1 000 MW el. Leistung werden pro Jahr ca. 35 t Brennelemente benötigt.
- Die dabei entstandenen hoch radioaktiven 0.99% Transurane und 3.35% mittelschwere Spaltprodukte (ca. 1.7 t) müssen endgelagert werden, ebenso ca. 90% schwach radioaktives ^{238}U (31.5 t).

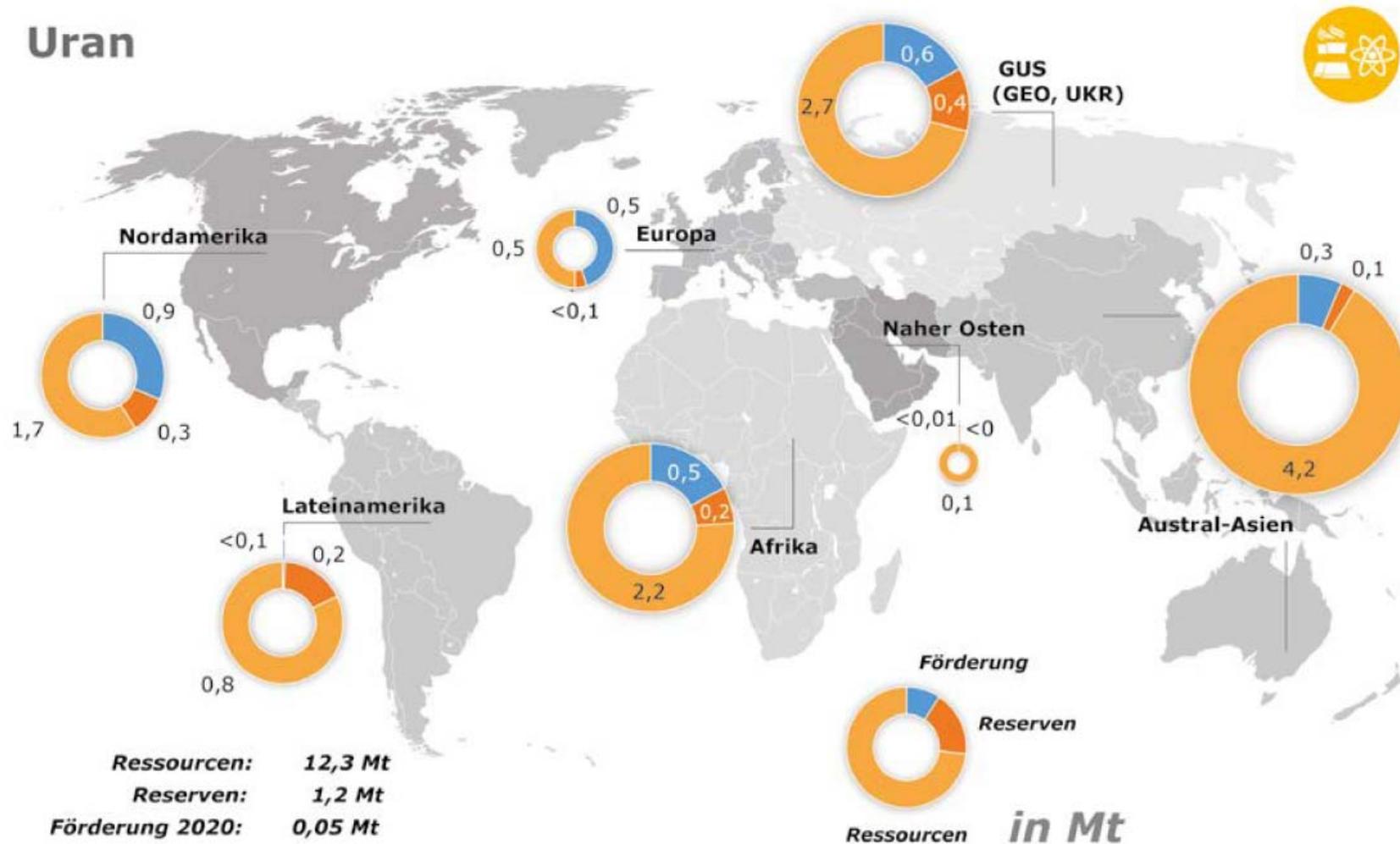
OHNE Wiederaufbereitung werden 35 t Brennelemente (1.8 m³) endgelagert.



R10.1 Kernspaltung

Reserven & Ressourcen von Uran (2020)

Uran



Quelle: BGR Energiestudie, 2021

R10.1 Kernspaltung

Uran – Reichweite (2020)



- Uran-Ressourcen (2020): 12.3 Mt
- Uran-Reserven (2020): Vorkommen mit Förderkosten < 80 \$/kg, stark begrenzt: 1.2 Mt
- Jährliche Uranförderung: 47.4 kt (2020), Verbrauch p. a. 68.3 kt (Wiederaufbereitung!)
- Reichweite: 80 \$/kg: $1\,200\,000 / 47\,400 = \text{ca. } 25 \text{ Jahre!}$ (Bei 260 \$/kg: ca. 125 Jahre)
- **Alternative zu Uran**: Bisher kein großtechnischer Einsatz in der Energieerzeugung.
 - a) Thoriumkerne („**thermischer Brüter**“): ^{233}U wird erbrütet
 ^{233}U wird durch langsame („thermische“) Neutronen gespalten!
 - b) ^{238}U -Kerne + schnelle Neutronen: Umwandlung in ^{239}Pu -Kerne („**Schneller Brüter**“):
 ^{239}Pu -Kerne werden durch schnelle Neutronen gespalten \Rightarrow Energie;
ABER: Plutonium ist toxisch (= giftig),
Reichweite um den Faktor 50 ... 100 größer als bei ^{235}U

Quelle: BGR Energiestudie,2019



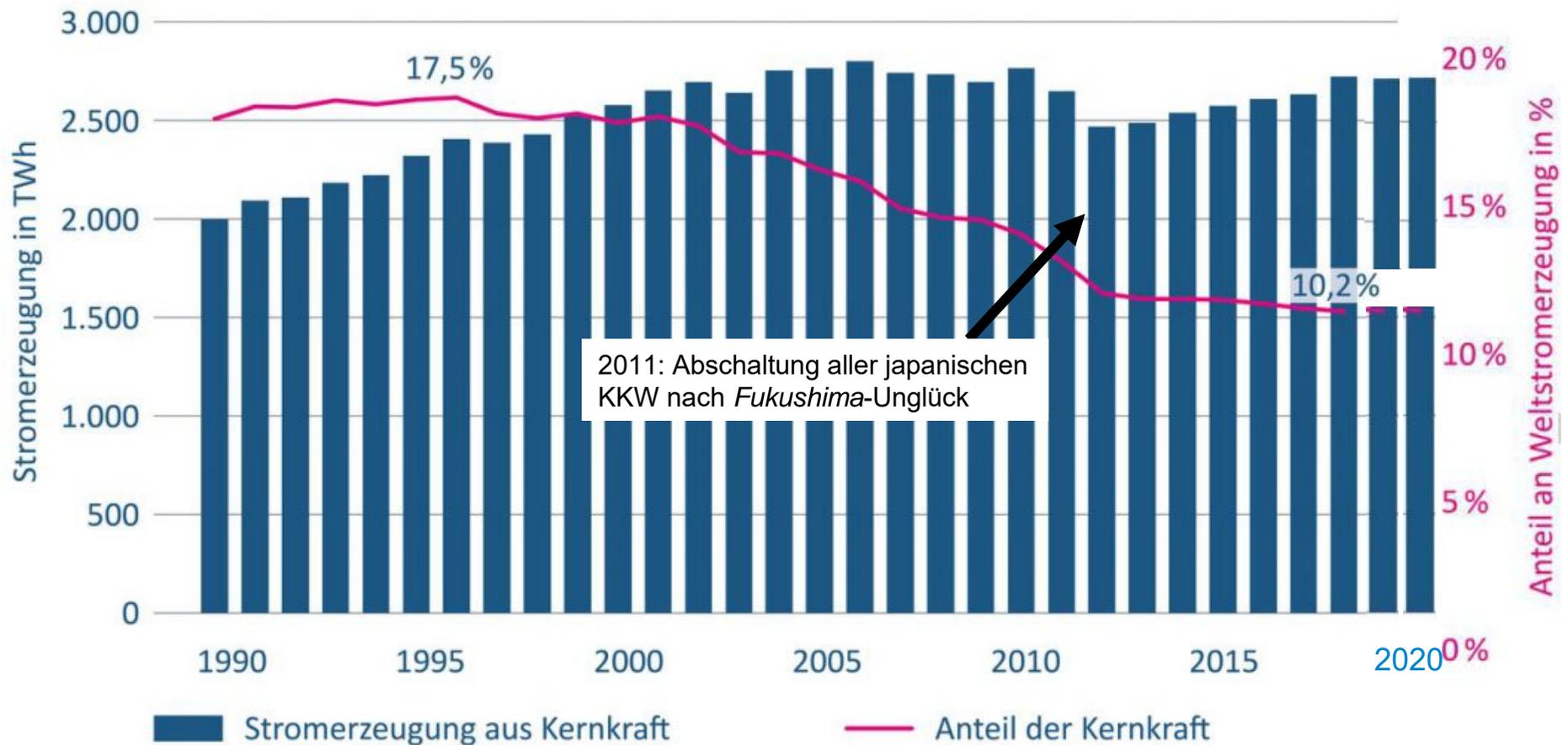
R10.1 Kernspaltung

Weltweite Nutzung der Kernenergie zur Erzeugung elektrischer Energie ca. 2600 TWh/a (2020)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Zum Vergleich: D: 2021: Bruttostromerzeugung 579 TWh (Kernkraft: 11.9 %)



Quelle: solarify.eu, 2019 & statista 2021



R10.1 Kernspaltung

Europa: Kernkraftreaktoren in Bau und Planung

Quelle: VDI-Nachrichten, 08/2016



AKW: Im Bau (2022):

China 17, Indien 7, S-Korea 5, Russland 3, Japan 2, Pakistan 2, Bangladesh 2, Belarus 2, Finnland 1, Frankreich 1, Slowakei 1, Brasilien 1, ...

Quelle: wikipedia.de

In Planung (2022):

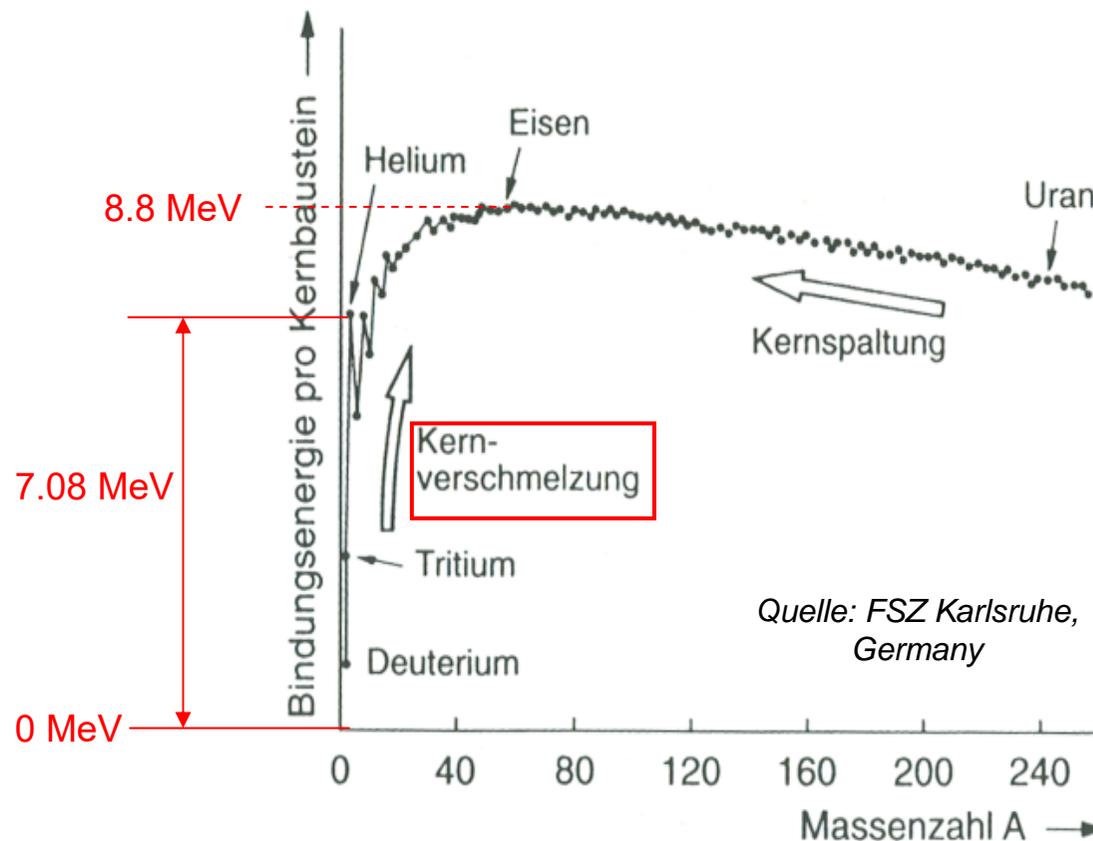
China 43, Russland 24, Indien 14, Ägypten 4, UK 3, Türkei 3, Tschechien 2, Ungarn 2, Rumänien 2, ...

Quelle: de.statista.com

R10.2 Kernverschmelzung (Fusion)

Bindungsenergie der Kernbausteine

- Die stabilsten Atomkerne (= höchste Bindungsenergie) sind Fe, Co, Ni, Cu.
- Energie wird bei der Verschmelzung leichterer Kerne bzw. Spaltung schwerer Kerne frei.
- Großer Energiegewinn ergibt sich bei der Verschmelzung von H-Kernen zu He.



R10.2 Kernverschmelzung (Fusion)

Beispiel: D-D-Fusionsreaktion (1)

„Schweres Wasser“ $D_2O \Rightarrow$ Deuterium: H-Isotopenkern ${}^2_1H = {}^2_1D$



$$2 \cdot (2.014 \cdot m_u) = 4.028 \cdot m_u \rightarrow 3.016 \cdot m_u + 1.00866 \cdot m_u + \underbrace{0.0033 \cdot m_u}_{\Delta m}$$

$$W = 0.0033 \cdot m_u \cdot c_0^2 = 0.5229 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 3.27 \text{ MeV}$$

R10.2 Kernverschmelzung (Fusion)

Beispiel: D-D-Fusionsreaktion (2)

Vergleich:

- a) 1 kg Deuterium fusioniert (Teilchenzahl $N = L/2$, denn $1 \text{ kg } ^1\text{H} = 1 \text{ kmol H-Kerne} \Rightarrow 1 \text{ kg } ^2\text{D} = 0.5 \text{ kmol } ^2\text{D-Kerne} \Rightarrow \text{Teilchenzahl } N = L/2 \Rightarrow N/2 = L/4$ Fusionsereignisse

$$\text{Frei werdende Energie } W_{\text{D-D}} = (L/4) \cdot 3.27 \text{ MeV} = 78.7 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

- b) 1 kg Steinkohle verbrannt: ^{12}C : Chem. Bindungsenergie: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 - 394 \text{ kJ/mol}$

12 kg C entspricht 1 kmol

$$\Rightarrow \text{Frei werdende Energie: } W_{\text{ch}} = \frac{1 \text{ kg}}{12 \text{ kg/kMol}} \cdot 394 \frac{\text{MJ}}{\text{kMol}} = 32.8 \cdot 10^6 \text{ J}$$

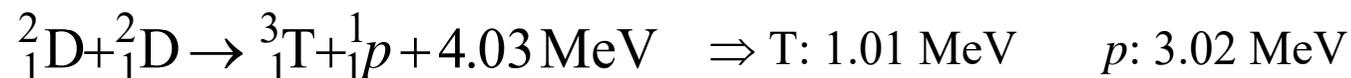
$$\frac{W_{\text{ch}}}{W_{\text{D-D}}} = \frac{1}{2.4 \cdot 10^6}$$

$$1m_u = m_{^{12}\text{C}} / 12 = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$1 \text{ kg} / (1m_u) = 6.023 \cdot 10^{26} = L$$

R10.2 Kernverschmelzung (Fusion) Fusionsreaktionen mit H-Ionen

- Bevorzugte Fusionsreaktion:
H-Ionen mit Massenzahl 2 (**Deuterium D**) und mit Massezahl 3 (**Tritium T**) als Reaktionspartner.
- **Freigesetzte Fusionsenergie** W_f je Verschmelzung ist als kinetische Energie auf die Fusionsteilchen verteilt.



R10.2 Kernverschmelzung (Fusion)

Kernfusion aus D und T



▪ Relevante Brennstoffe:

- Schwere Wasserstoffkerne:

- Deuterium ${}^2\text{H} = \text{D}$
- Tritium ${}^3\text{H} = \text{T}$

▪ Fusionsprozess

- **Verschmelzung** von leichteren Atomkernen zu schwereren Atomkernen
- Technisch aussichtsreich ist die Fusion von **Deuterium und Tritium** zu Helium



R10.2 Kernverschmelzung (Fusion)

Kernfission und Kernfusion – Vergleich



- Energie je kg Ausgangsstoff:

a) ^{235}U -Spaltung

$$m = 235 \cdot m_u \quad W = 200 \text{ MeV}$$
$$\frac{W}{m} = \frac{200 \cdot 10^6 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{235 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27}} = 0.82 \cdot 10^{14} \frac{\text{J}}{\text{kg}} =$$
$$= 0.95 \text{ MWd/g}$$

b) D-T-Fusion

$$m = (2 + 3) \cdot m_u = 5 \cdot m_u \quad W = 17.6 \text{ MeV}$$
$$\frac{W}{m} = \frac{17.6 \cdot 10^6 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{5 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27}} = 3.39 \cdot 10^{14} \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$3.39/0.82 = \mathbf{4.14\text{-fach!}}$$

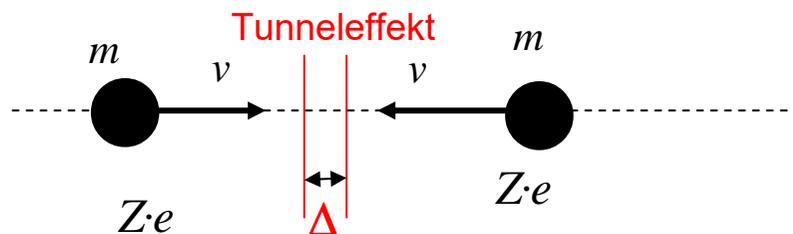
- Es wird je kg bei D-T-Fusion **4-mal so viel Energie frei** wie bei ^{235}U -Kernspaltung !



R10.2 Kernverschmelzung (Fusion)

Erforderliche Gastemperatur der H-Ionen

- Erforderliche Temperatur T des Gases der **H-Ionen** gegen *Coulomb*-Abstoßung bei Annäherung auf den Abstand eines Kerndurchmessers $\Delta \approx 10^{-14}$ m zur Verschmelzung:



$$2 \cdot \frac{m \cdot (v^2)_{av}}{2} = 2 \cdot \frac{3}{2} \cdot kT = W_p = \frac{Z \cdot e \cdot Z \cdot e}{4\pi\epsilon_0\Delta}$$

$$v^* = \sqrt{(v^2)_{av}}$$

$$T = \frac{Z \cdot e \cdot Z \cdot e}{3k \cdot 4\pi\epsilon_0\Delta} \Big|_{Z=1} = \frac{(1.6 \cdot 10^{-19})^2}{3 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 4\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-14}} = 556 \cdot 10^6 \text{ K} \quad v^* = 3.7 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

- Auf Grund der *Maxwell-Boltzmann*-Geschwindigkeitsverteilung tritt bei v^* immer ein kleiner Anteil deutlich schnellerer **H-Ionen** auf ($v \gg v^*$), so dass eine geringere Temperatur für einzelne Fusionsereignisse ausreicht!
- Erforderliche Gastemperatur: $T \approx 170$ Mio. K, $v^* = 2 \cdot 10^8 \text{ m/s} < v = 3.7 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- Kernfusion ist Gegenstand der **Forschung und Entwicklung** (Großexperiment ITER)

R10.2 Kernverschmelzung (Fusion)

Kernfusionsreaktoren



- **Fusionsprozess** in kompliziert aufgebauten Reaktoranlagen
- Extreme Reaktionsbedingungen für die Verschmelzung erforderlich:
 - Temperatur **150 Mio. K** (zehnmal höher als im Kern der Sonne),
 - Druck nur einige Bar (acht Größenordnungen geringer als im Kern der Sonne),
 - In Fusionsreaktoren ist zum Erhalt der hohen Temperaturen ein **berührungsloser** (und damit **magnetischer**) **Plasma-Einschluss** im Plasmagefäß erforderlich.
- Zwei verschiedene Anlagentypen großtechnisch in Untersuchung:
 - a) Tokamak, b) Stellarator.
 - Tokamak (russ.):** *toroidalnaja kamera w magnitnych katuschkach*) *Toroidale Kammer in Magnetspulen*
- Weitere Forschung: (z. B auch an *TU Darmstadt*)
Laser-induzierte Fusion (Rückstoßprinzip)



R10.2 Kernverschmelzung (Fusion)

ITER-Tokamak-Fusionsexperiment



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Ergänzung

Baubeginn: 2007

Plasmabetrieb mit Deuterium: ab 2025

Plasmabetrieb mit Tritium: ab 2035

Plasma

(= heißes, vollständig ionisiertes H-Gas):
im Querschnitt (rechts)

Blanket (Gefäßwand): Außen um das Plasma

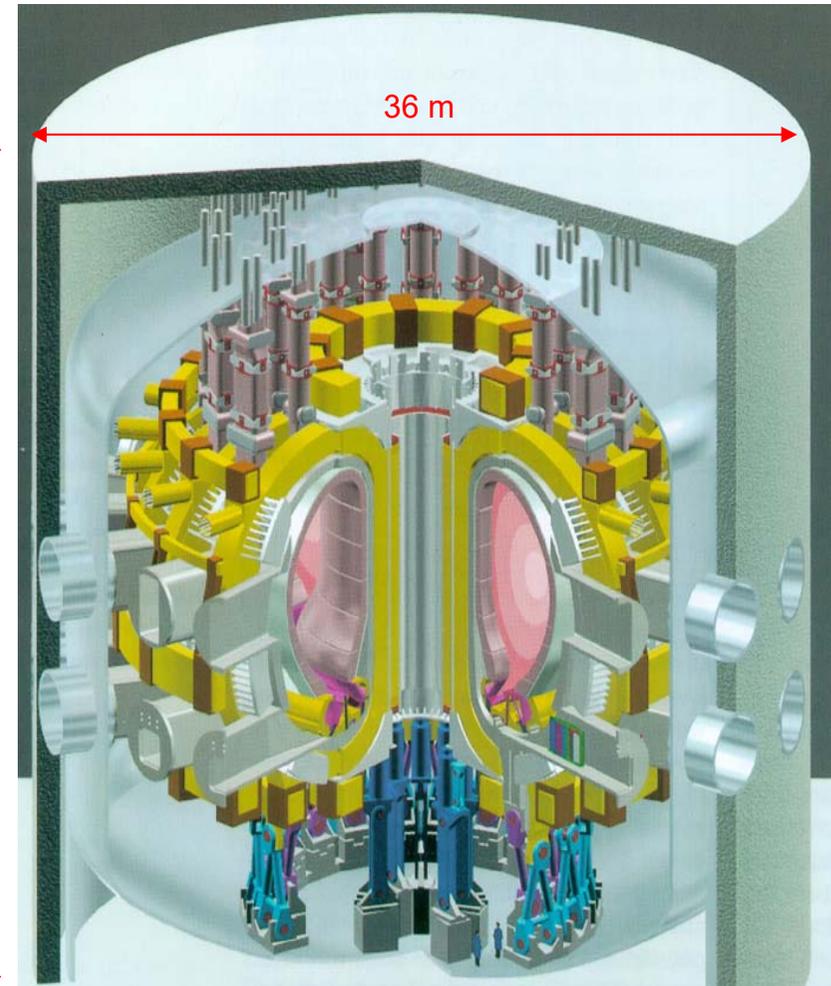
Plasmagefäß mit am Boden angebrachten
Divertorplatten für Abfuhr der He-Kerne

Magnetspulen (supraleitend): Halten über LORENTZ-
Kraft das Plasma schwebend ⇒
⇒ heißes Plasma berührt Gefäßwand nicht

Kryostat für Magnete
und

elektromagnetische Abschirmung

36 m



Quelle: FSZ Karlsruhe, Germany



R10.2 Kernverschmelzung (Fusion)

ITER-Fusionsreaktor

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Tokamak-Experiment *ITER: Cadarache/ F* *International Thermonuclear Experimental Reactor*

Daten

Gesamtradius/Durchmesser:	15 m / 30 m
Gesamthöhe:	30 m
Plasmaradius:	6.2 m
Plasmahöhe:	7.4 m
Plasmabreite:	4.0 m
Plasmavolumen:	837 m ³
Ring-Magnetfeld:	5.3 T
Max. Plasmastrom:	15 MA
Startheizung:	734 MW
Zieltemperatur:	170 Mio. K
Neutronen-Wandlast p.a. *):	~ 10 ²⁵ Teilchen/m ²
Fusionsleistung:	500 MW (für 400 ... 1000 s)

*) bei künftigen Reaktoren etwa 10-mal so hoch

Quelle: Kernfusion, Sonderheft, KIT, 2006



R10.2 Kernverschmelzung (Fusion)

Kernfusion: Perspektive

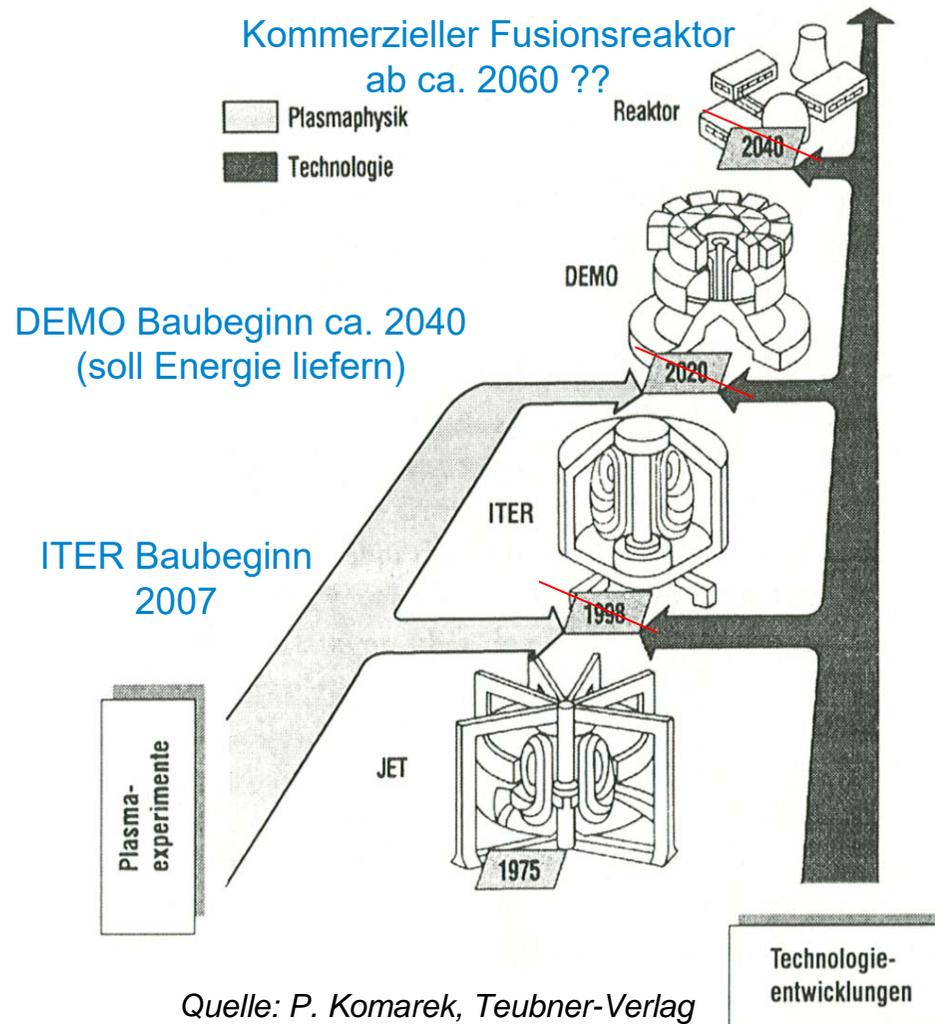


- **Hohe Forschungskosten** \Rightarrow internationaler Kooperation (*ITER, Cadarache, Frankreich*): Es wird erforscht, ob und wie sich Fusionsenergie zur Stromerzeugung nutzen lässt.
- Erster **wirtschaftlich nutzbarer Fusionsreaktor** wird aus heutiger Sicht günstigstenfalls **nicht vor 2050 ... 2060** erwartet.
- Falls Kernfusion wirtschaftlich konkurrenzfähig wäre, könnte **großtechnischer Einsatz ggf. ab 2075** erfolgen.



R10.2 Kernverschmelzung (Fusion)

Road map für die friedliche Nutzung der Kernfusion

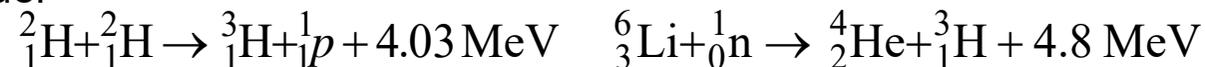


R10.2 Kernverschmelzung (Fusion)

Kernfusion: Ressourcen



- Großtechnischer Einsatz von Kernfusion z. Zt. nicht absehbar
- Daher keine bestehende Rohstoffwirtschaft für Deuterium und Tritium existent.
- Wasser auf der Erde: $1.4 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$ (Würfel mit 1120 km Seitenlänge) $\Leftrightarrow 1.4 \cdot 10^{21} \text{ kg}$ (nahezu zur Gänze Seewasser in den Weltmeeren)
- Gewinnung von Deuterium (D): $D = {}^2_1\text{H}$
 - Gewinnung aus „halbschwerem“ Wasser (HDO statt H_2O)
 - In Seewasser kommt Deuterium (D) in einem Verhältnis bis zu 1:5500 zu normalem Wasserstoff (H) vor: Deuteriummasse weltweit im Seewasser: $254.5 \cdot 10^{15} \text{ kg}$.
 - Anreicherung durch Elektrolyse
- Gewinnung von Tritium (T): $T = {}^3_1\text{H}$
 - Tritiumvorkommen: Nur in einem Verhältnis von $1:10^{18}$ zu normalem Wasserstoff: Tritiummasse weltweit: 1.4 Tonnen \Rightarrow
 - Technisch nutzbare Mengen müssen im Fusionsreaktor z. B. aus Li erbrütet werden.
 - Aufwendig und teuer



R Ressourcen

R10. Kernbrennstoffe

Zusammenfassung

- ²³⁵Uran: Für Siede- und Druckwasser-Reaktoren:
Reserven-Reichweite ca. 25 (100%)... 125 Jahre (300% Gewinnungskosten),
aber
 - ca. 10-fache Ressourcen,
 - alternative Kernspaltungsreaktionen (Brüter) mit 50 ... 100-fach größerer Reichweite,
 - Kohlendioxid-arme Wärmeenergieerzeugung
- ABER: - Tw. instabile Kettenreaktion möglich
 - Tw. sehr langlebige hochradioaktive Abfälle
 - ⇒ Problem der langzeitstabilen Endlagerung
- Weltweit **ungebrochener Zubau** an neuen Atomkraftwerken (*China, Indien, ...*)
- *Deutschland*: 2020: ca. 6% des Primärenergieverbrauchs, Ausstieg bis 2022!
- **Kernfusion**: Noch in der technischen Grundlagenforschung.
Keine weltweit großtechnische Nutzung von ca. 2075.

R Ressourcen

R11. Erdwärme

1. **Energieträger: Reserven und Ressourcen**
2. **Sonnenenergie**
3. **Wasserkraft**
4. **Windkraft**
5. **Meeresenergie**
6. **Erdöl**
7. **Erdgas**
8. **Steinkohle**
9. **Braunkohle**
10. **Kernbrennstoffe**
11. **Erdwärme**
12. **Biomasse**
13. **Energieströme**

R11 Erdwärme

Übersicht



1. Primärenergiequelle Erdwärme

- Wie entsteht Erdwärme?
- Geothermische Vorkommen
- Wie ist Erdwärme nutzbar?

2. Risiken der Nutzung

3. Bedeutung (*Deutschland*, weltweit)



R11.1 Primärenergiequelle Erdwärme

Wie entsteht Erdwärme?



- Für den aus dem Erdinneren strömenden Wärmefluss verantwortlich:
 - Zu 80%:
Natürliche Radioaktivität:
Zerfall radioaktiver Isotope in Gesteinen
(^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K)
 - Beispiel: 1 t Granit enthält 3.3 g Uran
 - Zu 20%:
Ursprungswärme der Erdentstehung (therm. Zeitkonstante $\sim 10^9$ Jahre)



R11.1 Primärenergiequelle Erdwärme

Erdwärmefluss an die Oberfläche



- **Typischer Wärmestrom** q aus dem Erdinneren: $0.062 \text{ W/m}^2 = 62 \text{ kW/km}^2$
(= 997 EJ/a für die gesamte Erdoberfläche)

$$q = \frac{P}{A} = \frac{W/T}{r_E^2 \cdot 4\pi} = \frac{9.97 \cdot 10^{20} \text{ J/a}}{(6.37 \cdot 10^6)^2 \cdot 4\pi \cdot \text{m}^2} = 1.955 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{a} \cdot \text{m}^2} = 0.062 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Wärmeleistung

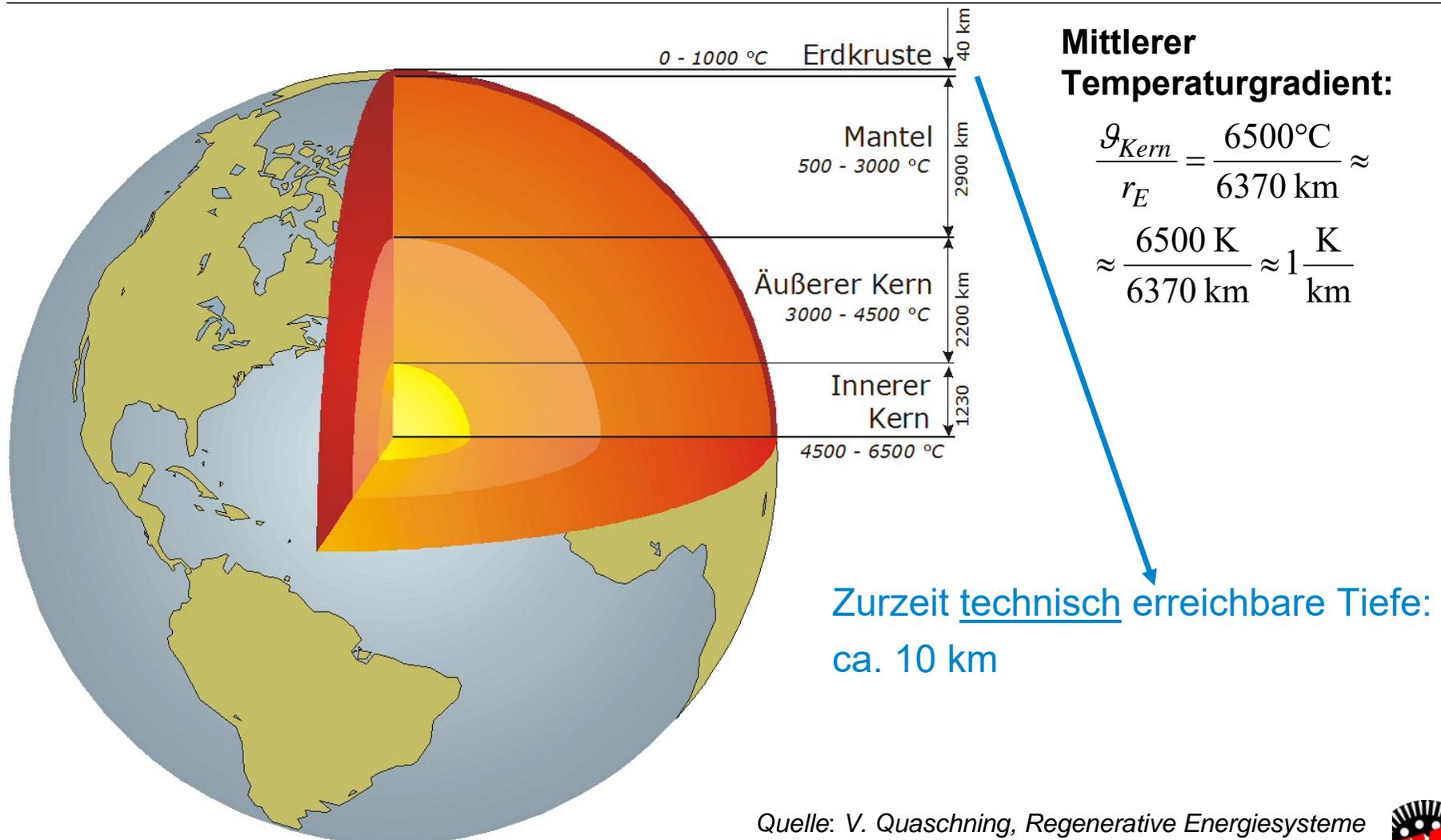
$$P = \frac{997 \cdot 10^{18} \text{ J}}{365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} = 31.6 \cdot 10^{12} \text{ W} = 31.6 \text{ TW}$$

- **Temperaturzunahmen** je 100 m Tiefe: Durchschnittlich: 3 K \Rightarrow **Gradient: 30 K/km!**
- Tektonische Bruchzonen: z. B. im *Mittelrheingraben (D)*: 5 K / 100 m,
- Vulkanischer Untergrund: z. B. *Larderello, Toskana, Italien*: 20 K / 100 m



R11.1 Primärenergiequelle Erdwärme

Aufbau der Erde



R11.1 Primärenergiequelle Erdwärme

Geothermische Vorkommen (1)

- **Erdwärme** heizt unterirdische Gesteinsschichten und Wasserreservoirs auf
 - Thermalwasserfelder < 100°C
 - Nassdampffelder } > 100°C
 - Heißdampffelder } dampfhaltig 125 ... 245°C
 - Geokomprimierte Heißwasserfelder 150 ... 200°C
 - Hochtemperatur-Kluftspeichersysteme bis 220°C

a) Thermalwasserfelder (Heißwasser)

- Wasserquellen mit Temperaturen unter 100 °C, teilweise mit Pumpen gefördert
- Nutzung zu Heizzwecken

b) Nassdampffelder (Heißwasser und Dampf)

- Ausstoß eines Wasser-Dampf-Gemisches (z.B. **Geysire**), Temperaturen unter Umständen weit über 100 °C
- Nutzung je nach wirtschaftlicher Nutzbarmachung von Dampf und Heißwasser

R11.1 Primärenergiequelle Erdwärme

Geothermische Vorkommen (2)

c) Heißdampffelder (überhitzter Dampf)

- Ausstoß von trockenem, überhitztem Dampf
- Nahezu frei von flüssigen Bestandteilen, Temperaturen: 125 ... 245 °C
- Nutzung zu Heizzwecken bedeutend

d) Geokomprimierte Heißwassersysteme

- Unter hohem Druck stehende, unterirdische Heißwasservorkommen (durch hohen Druck bleibt Wasser flüssig = kein Dampf)
- Aber: Bei Anzapfung Dampfausstoß mit Temperaturen von 150 ... 200 °C
- Nutzung überwiegend zur **Stromerzeugung**

e) Hochtemperatur-Kluftspeichersysteme

- Auftreten in Grabensystemen von tektonischen Bruchzonen oder in geklüfteten, tiefen Gesteinen der Erdkruste
- Ständiges Eindringen und Aufheizen von Oberflächenwasser bis auf Temperaturen von 220 °C
- Nutzung überwiegend zur **Stromerzeugung**

R11.1 Primärenergiequelle Erdwärme

Wie ist Erdwärme nutzbar? (1)



▪ Arten der Nutzbarmachung der „tiefen“ (> 400 m) Geothermie:

- 1) Natürlicher Wärmestromaustritt an der Erdoberfläche
- 2) Künstliche Erschließung mit bohrtechnischen Verfahren:
„Hot-Dry-Rock“-Verfahren als großtechnische Nutzung, wo kein Tiefenwasser vorhanden: Mit **Wärmetausch-Prozess!**
Bei Stromerzeugung: Einsatz einer Kraft-Wärme-Kopplung!
Bislang nur wenige Prototyp-Anlagen!

▪ Bei Niedertemperatur-Wärmequellen: $\vartheta \approx 80^\circ\text{C}$: Niedriger thermischer Wirkungsgrad!

a) **Organic-Rankine-Cycle**-Verfahren:

Einsatz eines organischen Lösungsmittels mit niedrigem Siedepunkt

z. B. Pentan C_5H_{12} , Sieden: 36°C ; Iso-Butan C_4H_{10} , Sieden: $-11.7^\circ\text{C} \Rightarrow$ Dampf \Rightarrow Turbine

b) **Kalina-Verfahren**: Zweistoffgemische (z. B. Ammoniak NH_3 (-33°C Siedepunkt) und Wasser) als Arbeitsmittel \Rightarrow Dampf \Rightarrow Turbine

▪ **Direkte Nutzung der „oberflächennahen“ Geothermie**: Niedrigtemperatur-Nutzung zum Anheben der Raumtemperatur. Eine Sonderform: **Wärmepumpenheizung**:

(*Deutschland*: ca. 50 000 Anlagen, zusammen mehr als $500 \text{ MW}_{\text{th}}$)



R11.1 Primärenergiequelle Erdwärme

Geokomprimierte Heißwassersysteme

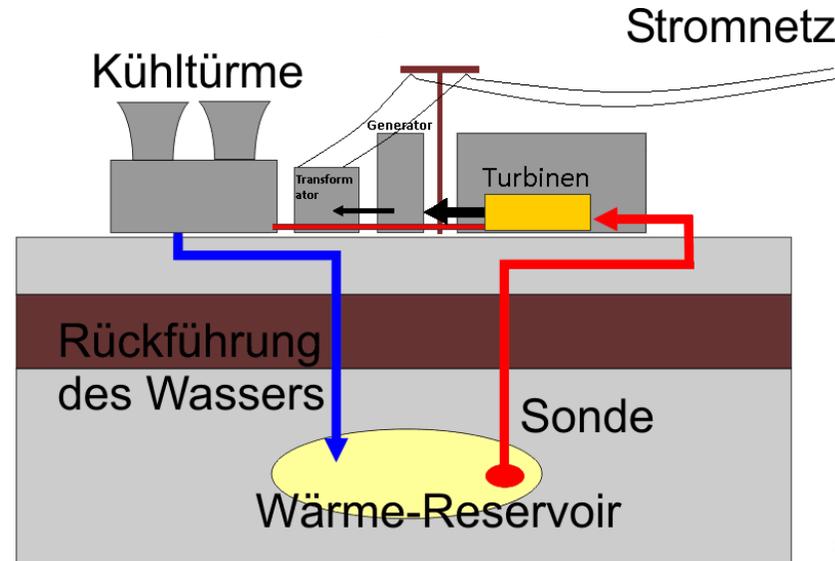
Beispiel:

Geothermie-Kraftwerk *Larderello, Toskana, Italien*, seit 1913 (ca. 750 MW)

Vulkanischer Untergrund:

- Ausströmender hydrothermaler Wasserdampf direkt auf die Turbinenschaufeln,
- Gelöste Mineralstoffe \Rightarrow starke Schaufelkorrosion \Rightarrow häufiger Schaufeltausch

Stark „schwefelhaltige“ Luft (H_2S): Vermehrt Auftreten von Atemwegserkrankungen



Quelle: Wikipedia

R11.1 Primärenergiequelle Erdwärme

Hot-Dry-Rock-(HDR)-Verfahren (1)



- **Hot-Dry-Rock-Verfahren (HDR):**

Verfahren zur Nutzung der im Erdkörper enthaltenen Erdwärme aus einer Tiefe zwischen 3000 ... 6000 m \Rightarrow bei 30 K/km \Rightarrow 90 ... 180 K Wassererwärmung \Rightarrow ca. 110 ... 200°C

- **Herstellung eines überdimensionalen Wärmeübertragers im Untergrund zwischen mindestens zwei Bohrlöchern:**

Einpressen von Wasser mit Druck von bis zu 150 bar \Rightarrow

\Rightarrow Es weiten sich die im Gestein vorhandenen Risse trotz des Gebirgsdrucks, und neue Risse bilden sich aus.

\Rightarrow Risse mit mittlerer Weite < 1 mm bleiben dauerhaft offen = bilden Wärmeübertrager mit großer Oberfläche im „Gebirge“ zwischen den Bohrlöchern.

- **Betrieb:**

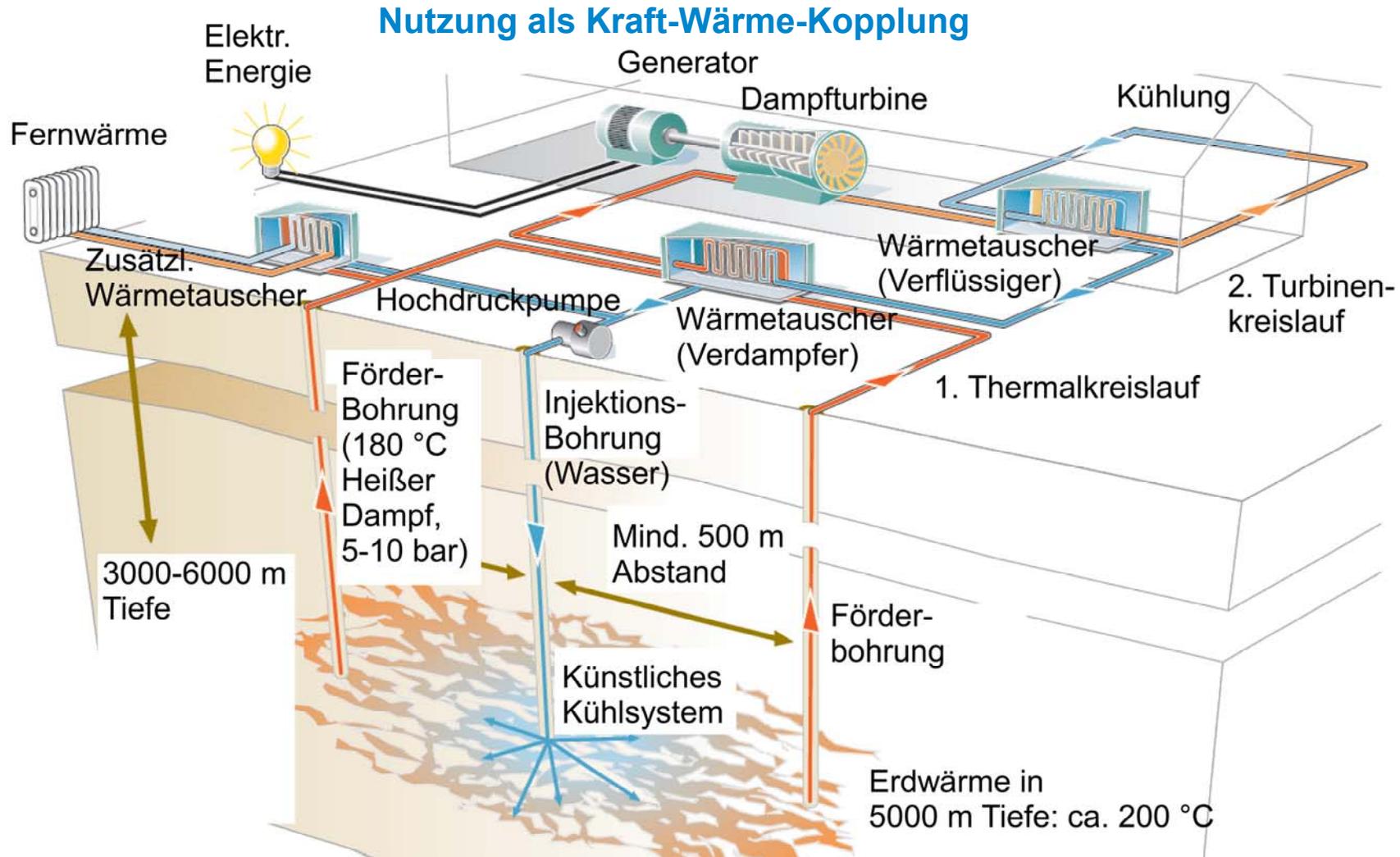
Dem System wird durch die eine Bohrung **kaltes Wasser zugeführt** und an einer zweiten Bohrung **warmes Wasser entnommen** (evtl. mit natürlich vorhandenem Tiefenwasser angereichert). Natürlicher thermischer Auftrieb des heißen Wassers erleichtert die Zirkulation.

- **Prototyp-Anlagen:** z. B. *Soultz-sous-Forêts/Frankreich*: Seit 2016 Betrieb mit 1.7 MW_{el}.



R11.1 Primärenergiequelle Erdwärme

Hot-Dry-Rock-(HDR)-Verfahren (2)



Quelle: Agentur für erneuerbare Energien Berlin [online]

R11 Erdwärme

R11.2 Risiken der Nutzung

- Die Ausnutzung des (nahezu) unerschöpflichen Erdwärmestroms ist auch mit Risiken behaftet:
 - HDR-Verfahren: Ggf. Schäden an Bebauung durch Bodenverwerfung oder kleinere Erdbeben bei der Hochdruck-basierten Herstellung des Gesteinskluft-Wärmeübertragers
 - Freisetzung von im Thermalwasser gelösten Mineralstoffen
 - Freisetzung von Begleitgasen:
 - z. B. H₂S Schwefelwasserstoff (Reizung der Atemwege)
 - Großer Landbedarf: Ca. 1 km² für ein 5 MW_{el}-Kraftwerk
(Vgl. 0.06 MW_{th}/km² bei natürlichem Wärmestrom!)

R11.3 Erdwärme- Bedeutung

Geothermische Energiegewinnung weltweit

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

▪ Situation weltweit:

Erdwärmekraftwerke mit 2020 insgesamt

32.0 / 78.0 GW_{th} thermischer Leistung (tiefe / nahe Geothermie),

14.1 GW_{el} elektrischer Leistung (vgl.: Windkraft in D installiert 64 GW_{el})

Vergleiche: D: 2021:

Windkraft installiert 64 GW_{el}

▪ Ca. 25 Länder nutzen weltweit Erdwärmekraftwerke für el. Energiebereitstellung:

- USA (2546 MW)
- Indonesien (1946 MW)
- Philippinen (1928 MW)
- Türkei (1283 MW)
- Neuseeland (996 MW)
- Mexiko (951 MW)
- Italien (767 MW)
- Island (753 MW)
- Kenia (663 MW)
- Japan (536 MW)
-
- Deutschland (42 MW)

13.0 GW_{el}

Quelle: a) www.deutsche-erdwaerme.de
b) Statista.de



R11.3 Erdwärme- Bedeutung

Geothermische Stromerzeugung, *Deutschland*



▪ Wirtschaftlich sinnvolle Erschließung:

Nur in Gegenden mit geographischen Anomalien = hochgelegene, warme Gesteinsschichten

▪ Situation in *Deutschland*:

- Theoretische Abschätzung: D: 375 000 km², 5 MW_{el}/km² ⇒ 15 640 TWh_{el}
- *Büro f. Technikfolgen-Abschätzung beim Bundestag, 2013*: Geotherm. Gesamtpotenzial zur Stromerzeugung 300 TWh/a = 50% des deutschen Jahresstrombedarfs 600 TWh/a
- Problem: Wirtschaftlich nutzbare heiße Gesteinsschichten befinden sich meist in großer Tiefe (4 ... 6 km: hohe Bohrkosten)

▪ Pilotprojekte: (Beispiele)

Bei *München*: *Unterhaching* (3.4 MW_{el}), *Taufkirchen* (4.3 MW_{el}), *Grünwald-Oberhaching*,
Sauerlach, *Dürrnhaar*;

Garching a. d. Alz: 2021, 4.9 MW_{el}, ORC-Prozess (Iso-Butan), 6.9 MW_{th}, 4 km Tiefe;
Bruchsal;

Landau, Pfalz (3 MW_{el}): 2007-2014;

Insheim im Oberrheingraben;

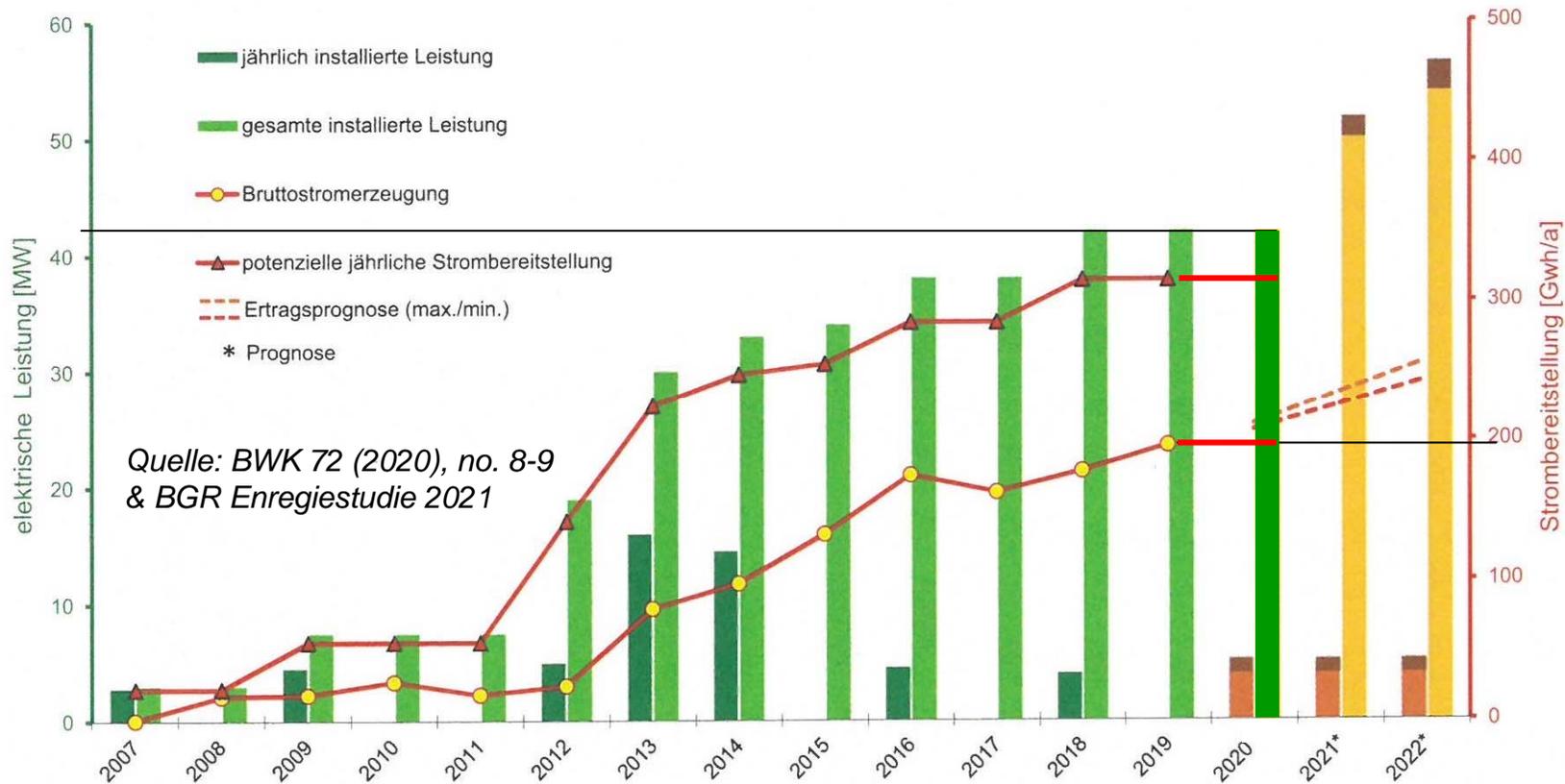
Neustadt-Glewe (0.23 MW_{el}) in Norddeutschland: 2003-2010.



R11.3 Erdwärme- Bedeutung

Installierte el. Leistung & el. Energieerzeugung aus tiefer Geothermie (Tiefe > 400 m), Deutschland

- Nur **geringer Anteil der tiefen Geothermie** an el. Energiebereitstellung in D:
5 K.W., 4 Heiz-K.W.: 2020: 0.19 TWh, 42 MW_{el} installiert \Rightarrow ca. 4050 Volllaststunden
- D: El. Brutto-Stromerzeugung (2021): 579.1 TWh \Rightarrow $0.19/579.1 = 0.03\%$



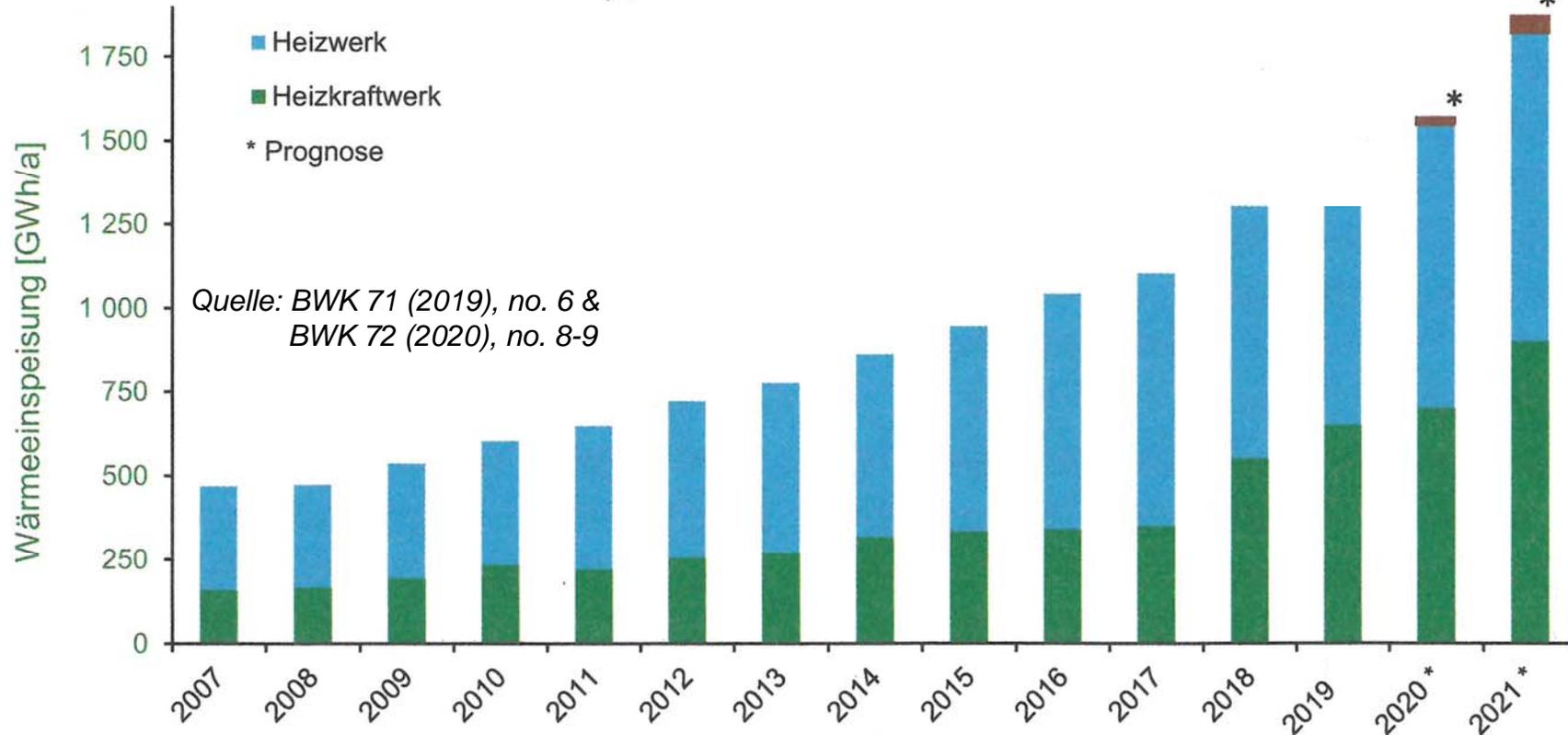
R11.3 Erdwärme- Bedeutung

Wärme aus tiefer Geothermie (> 400 m) Deutschland, 2020: 350 MW_{th} installiert



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Heizwerke: 30 geotherm. Anlagen (170 MW_{th}) zur ausschließl. Wärmebereitstellung
- Heizkraftwerke (El. Energie und Wärme kombiniert): 180 MW_{th} Wärmeeinspeisung
- 170 + 180 = 350 MW_{th}, ca. 4000 h Volllaststunden = 1.4 TWh_{th} = 0.1 % des dt. Wärmebedarfs



R Ressourcen

R11. Erdwärme

Zusammenfassung

- Erdwärme hat **große Reserven** für den weltweiten Energiehaushalt
 - a) Wärmeinhalt in 4 ... 6 km Tiefe: $1.8 \cdot 10^{27}$ J
 - b) Wärmestrom: 10^{21} J/a \Rightarrow „Reichweite“ 1.8 Mio. Jahre
- Überwiegend **direkte Nutzung** der Erdwärme (Heizzwecke)
- Untergeordnete Bedeutung: **Indirekte Nutzung** zur Stromerzeugung
- Länder mit **starkem Vulkanismus** geographisch „bevorzugt“ für Erdwärmennutzung (verbunden mit den Nachteilen vermehrter Erdbeben)
- **Nutzungsart der Erdwärme** je nach regionalem Vorkommen stark unterschiedlich
 - z. B. für Stromerzeugung:
 - a) tw. aufwendige Tiefenbohrungen erforderlich (**HDR-Verfahren**);
 - b) Fallweise: **Niedertemperatur-Kreisprozesse** für Fluidkreisläufe zur Stromerzeugung
- In **Deutschland: Pilotprojekte** im MW-Bereich mit gekoppelter Kraft-Wärme-Nutzung, aber z. Zt. mit 0.03 % nahezu kein Anteil an el. Energieversorgung
 - mit 0.1 % nahezu kein Anteil an Wärmeversorgung

R Ressourcen

R12. Biomasse

1. **Energieträger: Reserven und Ressourcen**
2. **Sonnenenergie**
3. **Wasserkraft**
4. **Windkraft**
5. **Meeresenergie**
6. **Erdöl**
7. **Erdgas**
8. **Steinkohle**
9. **Braunkohle**
10. **Kernbrennstoffe**
11. **Erdwärme**
12. **Biomasse**
13. **Energieströme**

R12 Biomasse

Übersicht



1. Primärenergiequelle Biomasse
 - Was ist Biomasse?
 - Photosynthese / CO₂-Kreislauf
2. Nutzung der Biomasse
3. Bedeutung für den Energiemix weltweit
4. Potenzial der Biomassenutzung (*Deutschland*)



R12.1 Primärenergiequelle Biomasse

Was ist Biomasse?



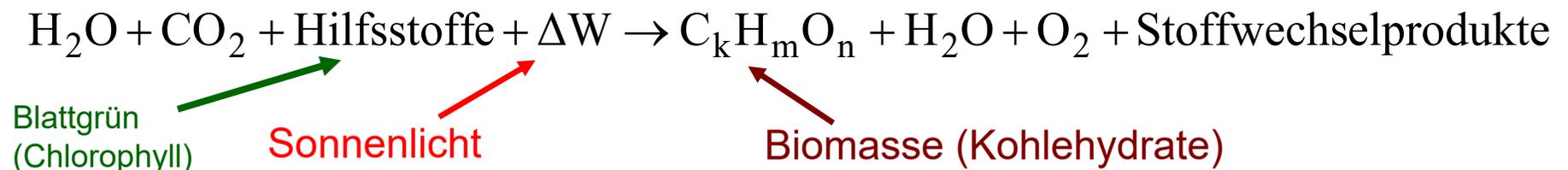
- **Biomasse** ist die NICHTFOSSILE Stoffmasse von Lebewesen oder deren Körperteilen. Als Menge dieser Stoffgemische gilt ihre Masse (Einheit: Kilogramm).
- **Unterschiedliche Verwendung des Begriffs „Biomasse“:**
 - a) **Ökologie:** z. B. Biomasse ausgesuchter, räumlich abgegrenzter Ökosysteme
 - b) **Energietechnik:** Biotische Stoffe, die als Energiequellen genutzt werden können
- **Biomasse** ist in den chemischen Verbindungen der Moleküle biotischer Stoffe gespeicherte Sonnenenergie als organische Endprodukte der **Photosynthese**
 - z. B.: Zucker, Stärke, Zellulose, Öle, ... in Holzpellets, Hackschnitzel, Stroh, Getreide, Altholz, pflanzliches Treibgut, Biodiesel (Fettsäure-Methylester), Bioethanol (C_2H_5OH), Biogas (roh: 60% CH_4)
- Nutzung von Biomasse zur Umwandlung in nutzbare Energie (z. B. durch Verbrennung)
- Diese Umwandlung ist theoretisch CO_2 -neutral = „geschlossener Kohlenwasserstoff-Kreislauf“
- **Holz (Zellulose):** Mit mehr als 50% der weltweiten Biomasse die bedeutendste erneuerbare Energiequelle



R12.1 Primärenergiequelle Biomasse

Photosynthese / CO₂-Kreislauf (1)

- Photosynthese → Erzeugung von Biomasse / Bindung von CO₂



Die drei Schritte der Photosynthese:

1. **Elektromagnetische Energie** (Licht geeigneter Wellenlänge, Sonnenlicht) wird mithilfe von Farbstoffen (Chlorophylle, Phycobiline, Carotinoide) z.B. in den Pflanzenzellen **absorbiert**.
2. **Umwandlung der Lichtenergie in chemische Energie** durch Übertragung von Elektronen, die durch die Lichtenergie in einen energiereichen Zustand versetzt wurden
3. Verwendung der chemische Energie zur **Synthese energiereicher organischer Verbindungen**, die den Lebewesen sowohl im Baustoffwechsel für das Wachstum als auch im Energiestoffwechsel für die Gewinnung von Energie dienen

R12.1 Primärenergiequelle Biomasse

Photosynthese / CO₂-Kreislauf (2)

- Umwandlung der Biomasse → Nutzbare Energie mit Freisetzung von CO₂:

- Direkte Verbrennung
- Verflüssigung → Verbrennung
- Vergasung → Verbrennung
- Vergärung → Verbrennung

} Wärmeenergie und elektrische Energie

- **CO₂-Neutralität:**

a) CO₂ wird bei der Photosynthese umgewandelt:

C in organischen Verbindungen (Biomasse) gespeichert, Sauerstoff freigesetzt

b) Bei der Umwandlung (Verbrennung) der Biomasse in Energie entsteht CO₂ in der ursprünglichen Menge

⇒ Die CO₂-Menge bleibt konstant. Die in den organischen Verbindungen eingespeicherte Sonnenenergie wird CO₂-neutral in nutzbare Energie umgesetzt.

R12.1 Primärenergiequelle Biomasse

Photosynthese – Energiebilanz (1)

- CO₂-Neutralität nur bei „nachhaltiger Nutzung“ gewährleistet:
Die bei der Biomasse-Nutzung freigesetzte CO₂-Menge wird erneut durch den Anbau rasch nachwachsender Rohstoffe (Pflanzen) über Photosynthese gebunden.
- Anbau + Nachwachsen der Altbestände = Abbau
- **Sonnenenergienutzung:**
Gesamteinstrahlung 100 % ⇒ davon etwa 0.8 % für Photosynthese:
- a) Photosynthese-Wirkungsgrad η_{ph} bei der Umwandlung von Sonnenenergie in **chemische Bindungsenergie**: $\eta_{\text{ph}} = W_{\text{c}} / \Delta W \approx 20\%$:
Daher $k = \text{ca. } 0.008 \cdot 0.2 = 0.0016 = 0.16\%$ der eingestrahlten Sonnenenergie in chemische Bindungsenergie der Biomasse umgewandelt.
- b) **Real**: $k = \text{ca. } 0.1 \dots 0.14 \dots 0.16\%$ der eingestrahlten Sonnenenergie!
Faustwert: $k = 0.1\% \Leftrightarrow 5.57 \cdot 10^{21} \text{ J/a}$

R12.1 Primärenergiequelle Biomasse

Photosynthese – Energiebilanz (2)

Beispiel:

- 1 Hektar (= 10^4 m²) **Wald** (auf 48° nördl. Breite):
Neuaufwuchs p.a. 12 Tonnen Holz (Heizwert: Getrocknetes Holz mit Rinde: 18.7 MJ/kg)
Heizenergie in 12 Tonnen Holz: $W_c = 12000 \cdot 18.7 \cdot 10^6 = 224.4 \cdot 10^9$ J/a
- Real eingestrahlte Sonnenenergie auf 48° nördl. Breite im Mittel: $P_s/A = 0.6$ kW/m²

▪ Wirkungsgrad der Biomasseproduktion:

$$\eta = \frac{W_c}{P_s \cdot T} = \frac{224.4 \cdot 10^9}{0.6 \cdot 10^3 \cdot 10^4 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = 0.0012 \Rightarrow \eta = 0.12\%$$

▪ Typische Wirkungsgrade η der Biomasseproduktion:

Ozeane	0.07%
Grasland	0.3%
Süßwasser	0.5%
Wälder	0.55%
Mais	3.2%
Zuckerrohr	4.8%
Zuckerrüben	5.4%

„Energiepflanzen“ (C4-Pflanzen):
Großer Gehalt an „Zucker“!

R12.2 Nutzung der Biomasse

Heizwerte der Biomasse

- Heizwerte H_i verschiedener Brenn- und Kraftstoffe:

Brennstoff (wasserfrei)	Heizwert H_i	Brennstoff (wasserfrei)	Heizwert H_i
Stroh (Weizen)	17,3 MJ/kg	Sonnenblumenschalen	17,9 MJ/kg
Grünpflanzen (Weizen)	17,5 MJ/kg	Chinaschilf	17,4 MJ/kg
Holz ohne Rinde	18,5 MJ/kg	Rapsöl	37,6 MJ/kg
Rinde	19,5 MJ/kg	Ethanol C_2H_5OH	26,7 MJ/kg
Holz mit Rinde	18,7 MJ/kg	Methanol CH_3OH	19,7 MJ/kg
Olivenkerne	18,0 MJ/kg	Benzin (zum Vergleich)	43,9 MJ/kg

Zum Vergleich:

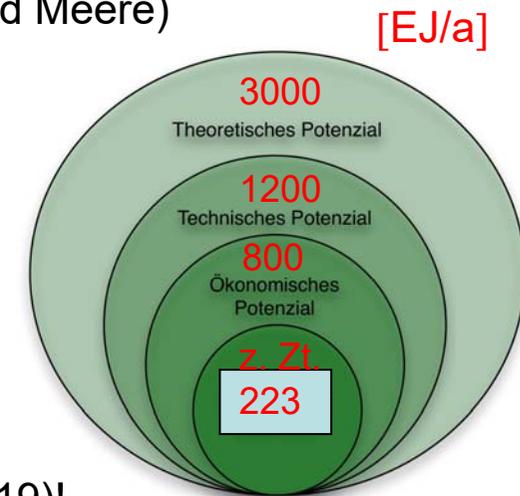
Steinkohle 29.3 MJ/kg
 Braunkohle (trocken) 14.7 MJ/kg
 Erdöl 44.0 MJ/kg

Quelle: V. Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme*

R12.2 Nutzung der Biomasse

Potenziale der Biomassennutzung

- Chemisch gespeicherte Energie in der Biomasse: $5.57 \cdot 10^{21}$ J/a = 5570 EJ/a = 100%
- Davon theoretisch nutzbares Biomassepotenzial der Erde: ca. 3000 EJ/a:
ca. 2000 EJ/a (Land-Biomasse) und ca. 1000 EJ/a (Gewässer und Meere)
- Technisch davon nutzbar: ca. 1200 EJ/a
- Davon ökonomisch nutzbar (Kosten!): ca. 800 EJ/a
- Weltweite Nutzung: 4% bzw. 223 EJ/a:
davon: Die Hälfte (2%): Nahrungs- und Futtermittelproduktion
Ein Viertel (1%): Holz-, Papier-, Faserstoff-Produkte
Ein Viertel (1%): Energie (zumeist Brennholz, ca. 56 EJ/a)



Dies sind ca. 9% des weltweiten Primärenergiebedarfs 624 EJ (2019)!

$$0.04 \cdot (1/4) \cdot 5.57 \cdot 10^{21} \text{ J/a} = 55.7 \cdot 10^{18} \text{ J/a} (= \text{ca. } 0.09 \cdot 624 \cdot 10^{18} \text{ J/a})$$

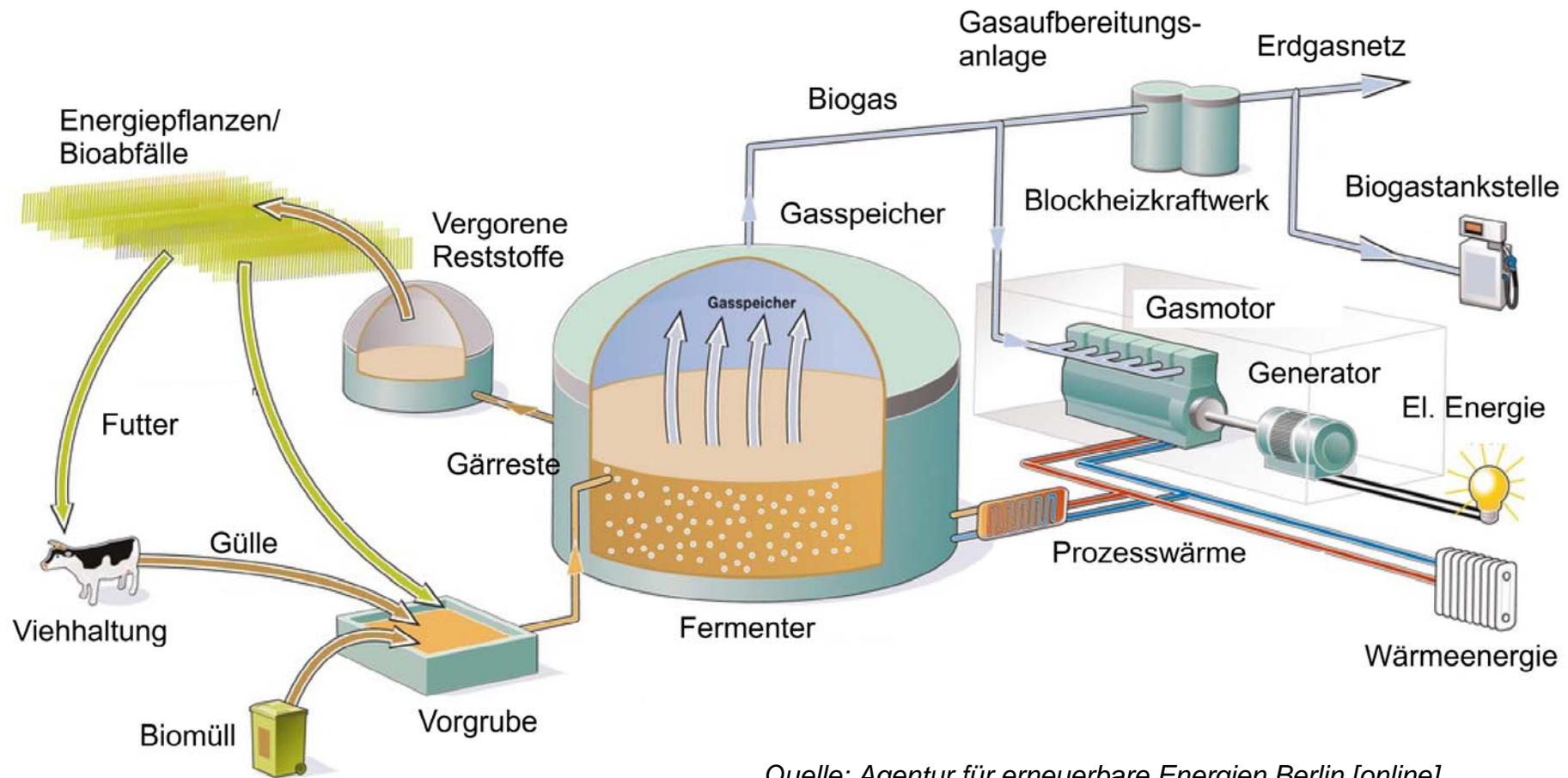
Quelle: Wikipedia

- Prinzipielle Nutzung der Biomasse:
 - a) Reststoffnutzung aus Land- und Forstwirtschaft
 - b) Anbau von „Energiepflanzen“ \Rightarrow Bio-Ethanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \Rightarrow$ Otto-Motor
 \Rightarrow „Bio-Diesel“ (Fettsäure-Methylester) \Rightarrow Diesel-Motor

R12.2 Nutzung der Biomasse

Beispiel: Biogasanlage – Prozessbeschreibung

Von der Biomasse durch Vergärung zur nutzbaren Energie im Biogas Methan



Quelle: Agentur für erneuerbare Energien Berlin [online]

R12.3 Bedeutung für den Energiemix weltweit

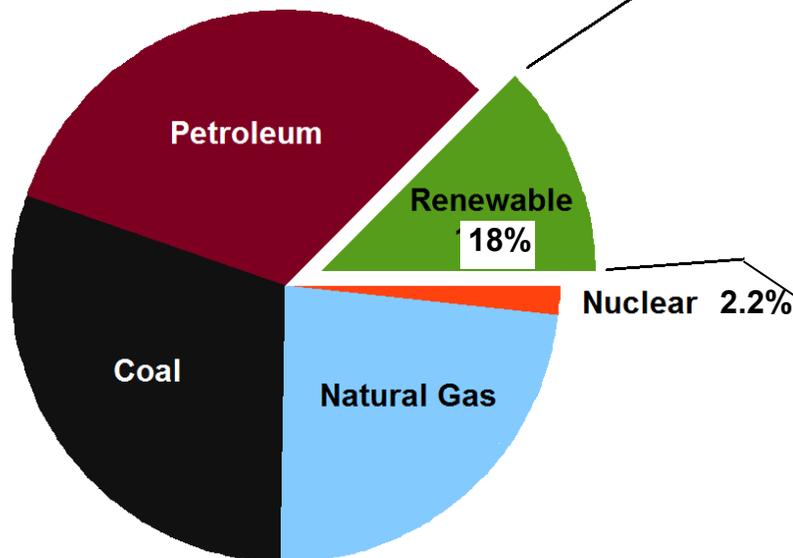
Aufteilung des weltweiten Primärenergiebedarfs



Aufteilung des gesamten weltweiten Primärenergiebedarfs 2020

Gesamt (2020): 600 EJ

Fossil Fuel 79.8%



- **Traditional biomass** 7.4%
Heating, cooking
- **Modern renewables** 10.6%
 - Thermal** 4.1%
 - Biomass
 - Solar
 - Geothermal
 - Electricity** 3.5%
 - Hydropower
 - Electricity** 2.0%
 - Wind
 - Solar
 - Biomass
 - Geothermal
 - Ocean power
 - Biofuels** 1.0%
 - Transport

Quelle: REN21.net, 2019 Global Status Report [online]

→ **Biomasse** ca. 9.5% (2020):
Hat große Bedeutung für den weltweiten Energiebedarf



R12.4 Potenzial der Biomassennutzung Energetisches Potential in *Deutschland*



- Nutzbare Menge und energetisches Potenzial von Biomasse in *Deutschland*

	Nutzbare Menge in Mt	Energetisches Potenzial in PJ/a
Halmgutartige Biomasse (Stroh, Gräser)	10 ... 11	140 ... 150
Holz und Holzreststoffe	38 ... 40	590 ... 622
Biogassubstrate (Biomasseabfälle und -rückstände)	20 ... 22	148 ... 180
Klär- und Deponiegas	2	22 ... 24
Energiepflanzenmix	22	298
Summe Biomassepotenzial	92 ... 97	1198 ... 1274

Quelle: V. Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme*

Primärenergieverbrauch *Deutschland* (2021) 12.1 EJ/a: $1200 \text{ PJ} / 12100 \text{ PJ} = \text{ca. } 0.1 = 10 \%$

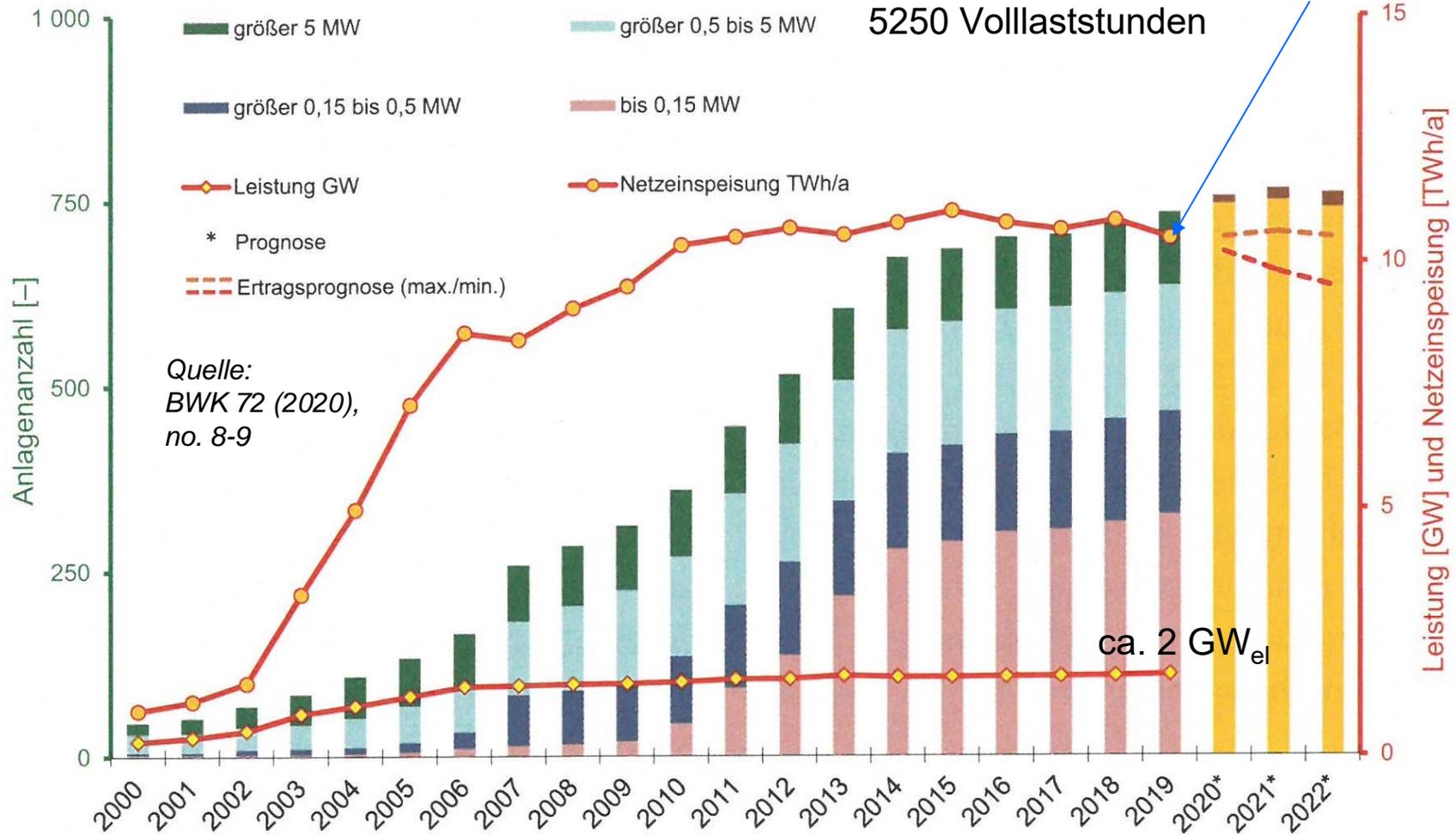
- Selbst bei Umsetzung umfangreicher Energiesparmaßnahmen lässt sich in *Deutschland* **nur ein kleiner Teil** des Primärenergiebedarfs **durch Biomasse decken**.



R12.4 Potenziale der Biomassennutzung

El. Energiegewinnung aus biogenen Festbrennstoffen, D

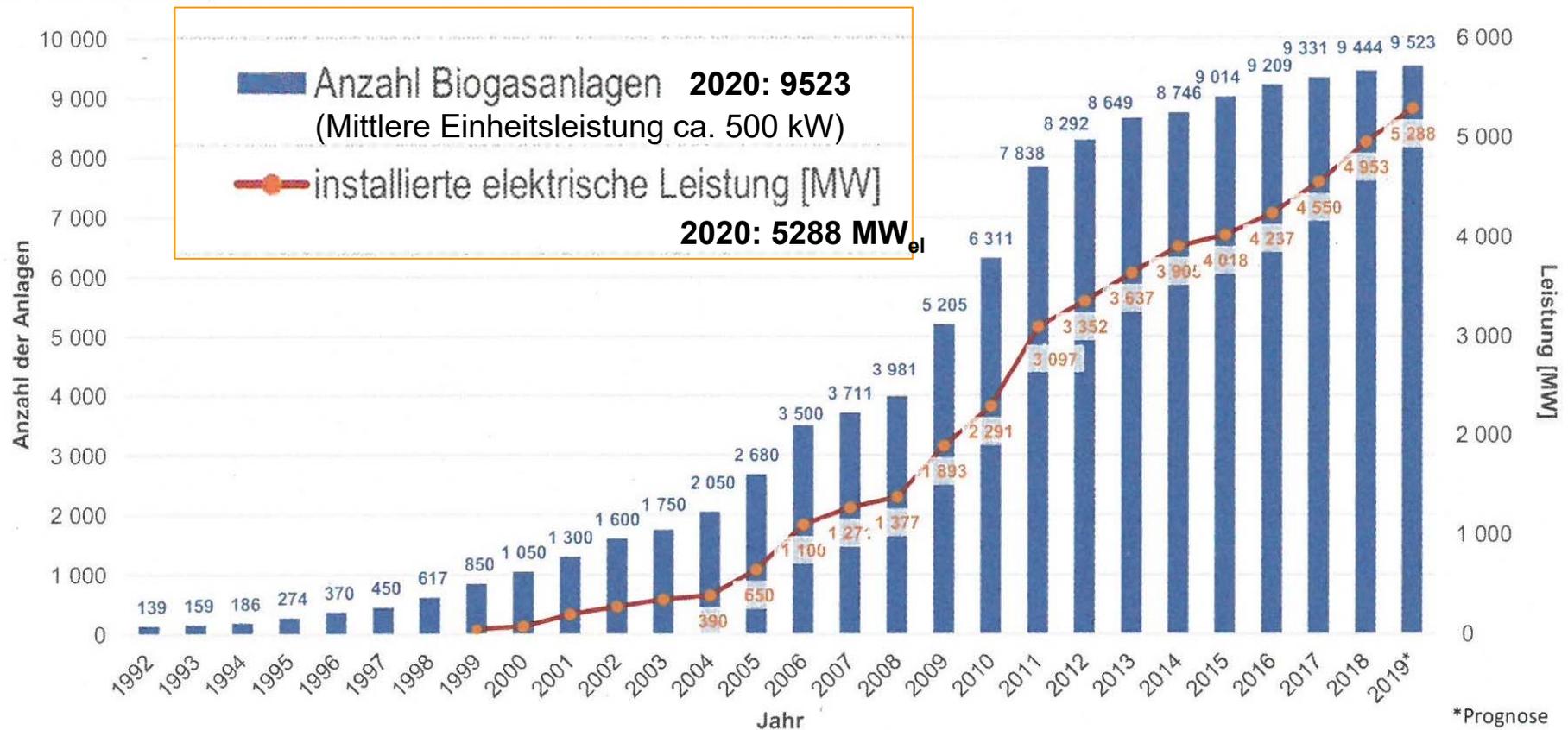
- El. Energie aus Verbrennung von Holz, Papier, Zellstoff, Klärschlamm: 2020: 10.5 TWh_{el}



R12.4 Potenzial der Biomassennutzung

Biogasanlagen und installierte el. Leistung, D

- 2020: 33.9 TWh_{el}, 5.3 GW_{el}, 6400 Volllaststunden



Quelle: BWK 72 (2020), no. 8-9

R12.4 Potenzial der Biomassennutzung

Energetische Bedeutung in *Deutschland* 2020



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Biogas-Anlagen: 33.9 TWh
 - Biogene Festbrennstoffe: 10.5 TWh
- } 44.4 TWh + biogen. Abfall, ...: 51 TWh = 8.8 %
der el. Brutto-Stromerzeugung D 579.1 TWh (2021)
- **Energetische Bedeutung der Biomasse-Energie in *Deutschland*:**
 - 8.8 % des deutschen Stromverbrauchs (el. Energienutzung)
 - 12 % des deutschen Wärmeenergiebedarfs (Gebäude)
 - 5.5 % des deutschen Kraftstoffverbrauchs (Verkehr)

*Quelle: Agentur für erneuerbare Energien
Berlin [online]*



R Ressourcen

R12. Biomasse



Zusammenfassung

- Nutzung der Biomasse weltweit ca. **9.5% der Primärenergiebedarfs** (meist Brennholz)
- *Deutschland*: Selbst bei intensiver Nutzung der Biomasse nur ca. **10% des deutschen Primärenergiebedarfs**
- Vorteil: **CO₂-neutrale** Energienutzung
- Energetische Nutzung landwirtschaftlicher Abfälle ist langfristig ein sinnvoller („nachhaltiger“) Beitrag zum Klimaschutz
- Aber: Verbrennung: Schadstoffe (Stickoxide, Feinstaub ... „Hausbrand“) ⇒ Filter!
- **Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion** („Bio-Treibstoff versus Grundnahrungsmittel“)



R Ressourcen

R13. Energieströme



1. **Energieträger: Reserven und Ressourcen**
2. **Sonnenenergie**
3. **Wasserkraft**
4. **Windkraft**
5. **Meeresenergie**
6. **Erdöl**
7. **Erdgas**
8. **Steinkohle**
9. **Braunkohle**
10. **Kernbrennstoffe**
11. **Erdwärme**
12. **Biomasse**
13. **Energieströme**



R13 Energieströme

Übersicht



1. Transportströme
2. Flussdiagramme der Energieströme



R13.1 Transportströme

Transport von Primär- u. Sekundärenergieträgern



▪ Notwendigkeit des Transports:

Räumlicher Unterschied zwischen **Verfügbarkeit** und **Bedarf** an Energie:
global,
national,
anwendungsbezogen.

▪ Transportwürdigkeit eines Energieträgers:

- a) Energetische Transportverluste vs. massenbezogene Energiedichte
- b) Ziel: Niedriger Transportkostenanteil an den Energiegestehungskosten

Beispiele: Primärenergieträger-Transport:

Braunkohle: Transport in D **unwirtschaftlich**, da Energiedichte zu gering, 8 MJ/kg (feucht),
daher: Braunkohlekraftwerke in der Nähe des Tagebaureviere

Erdöl: Transport weltweit **wirtschaftlich**, da hohe Energiedichte, 44 MJ/kg
⇒ Nutzung von Tankschiffen und Pipelines



R13.1 Transportströme

Transport von Primärenergieträgern

- Frachtschiffe & Tankschiffe, Pipelines, Güterzüge, Frachtflugzeuge, LKWs

- **Beispiel:**

Welthandelsflotte ca. 56 000 Großschiffe mit 1970 Mio. Tonnen (DWT) Traglast;
ca. 35 000 t/Schiff
(DWT: dead weight ton)

Quelle: vdi-nachrichten 27.11.2020

43.2% Massengut *)
26.6% Rohöl
13.9% Container
6.2% Chemikalien
6.0% Stückgut
3.7% Flüssiggas
0.4% Personen

} 100%

*) Erze, Kohle, Holz, Stahl, ...



Kommerzieller Supertanker *AbQaiq* (gebaut 2002),
2 Mio. barrels Rohöl

Quelle: U.S. Navy photo, K. H. Tierney

R13.1 Transportströme

Flüssigerdgas LNG (liquified natural gas)

- Wirtschaftl. Transport von gasförm. Erdgas nur in Rohrleitungen, da Volumen zu groß!
- **Verflüssigtes Erdgas:** Abkühlung auf $-161 \dots -164 \text{ °C}$: 1/600 des Volumens
- Energiebedarf für Verflüssigung: 10 ... 25 % des Gas-Energieinhalts
- LNG-Transport in wärmeisolierten Dewar-Gefäßen, ab Distanz $> 2500 \text{ km}$ wirtschaftlich!
- Bei $< 2500 \text{ km}$: Erdgas-Pipeline mit verdichtetem Erdgas (CNG, Compressed Natural Gas) energetisch wirtschaftlicher (75 ... 84 bar, Nachverdichtung alle 150 km nötig)!
- Bei langer Pipeline zu große Reibungsverluste und Nachkompressionsenergiebedarf!



Gastanker *LNG Rivers*
mit Kugeltanks

Quelle: [Wikipedia.de](https://de.wikipedia.org/wiki/LNG_Rivers)



R13.1 Transportströme

Transport von Sekundärenergieträgern



- Nur wenige sekundäre Energieformen sinnvoll transportierbar !
- **Elektrische Energie** (Freileitungen & Kabel):
Übertragungsverluste sinken mit steigender el. Spannungshöhe U bei $P = \text{konst.}$
- **Chemische Energie** (z.B. raffinierte Erdölprodukte über Pipelines):
Reibungsverluste bei Übertragung abhängig von
 - a) der Viskosität des Transportguts,
 - b) Oberflächen-Beschaffenheit der Rohre,
 - c) Fluidgeschwindigkeit.
- **Thermische Energie** (Heißwasser 80 ... 130°C bis ca. 25 bar, Fernwärme):
Nur wenige Kilometer Reichweite wegen der unvermeidlichen Wärmeverluste!



R13.1 Transportströme

Beispiel: Heißwassertransport für Fernwärme



Quelle: BWK 69 (2017) no. 10 &
Mainova, Frankfurt

- Verlegung von Fernwärmerohren (Vor- und Rücklauf) in der Baugrube
- Heißwassertemperatur bis zu 130°C unter Überdruck > 1 bar, daher weiterhin flüssig

R13.1 Transportströme

Verluste verschiedener Transporttechniken

- „Transportaufwand“ χ (Einheit: 1/m):
Prozentualer Energieverlust ΔW der transportierten Energiemenge W
längs der Wegstrecke l

$$\chi = \frac{1}{l} \cdot \frac{\Delta W}{W}$$

- **Typische Werte für den Transportaufwand:**

- **Alaska-Pipeline** (Länge: 1287 km, Durchfluss CH_4 : 120 000 m^3/d): $\chi = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1}$
- Dieselbetriebenes Kohle-**Frachtschiff** mit 200 000 BRT:
(Bruttoregister-tonne: 1 BRT = 2.83 m^3) $\chi = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1}$
- Hochspannungs-Gleichstromübertragung (**HGÜ**), z. B. 600 kV DC: $\chi = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1}$
- **Güterzug** (1000 t), Steinkohletransport: $\chi = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$
z. B. 40 zweiachsige Güterwaggons je 25 Tonnen, Achslast 12.5 t < 22.5 t (max.)
- **Fernwärme-Heißwasser-Rohrleitung** < 100°C:
Sternförmiges Leitungsnetz (Einzellängen < 30 km) $\chi = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$
- **Flugzeug** (Großraumjet, z.B.: Tankflugzeug): $\chi = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$
- **LKW** (Tankwagen, 20 t): z. B. 5-achsig, Achslast 4 t < 11.5 t (max.) $\chi = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$

χ
steigt

Quelle: P. Dietrich, *Die Zukunft unserer Energieversorgung*, Springer, 2010

R13.1 Transportströme

Beispiele: Verluste verschiedener Transporttechniken



▪ Beispiele:

- **Alaska-Erdgas-Pipeline:** Länge: $l = 1287 \text{ km}$, $\chi = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1}$

$$\chi = \frac{1}{l} \cdot \frac{\Delta W}{W} = 10^{-9} / \text{m} \rightarrow \frac{\Delta W}{W} = l \cdot \chi = 1287 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9} = 1.3 \cdot 10^{-3} = 0.13\%$$

- **Fernwärme-Heißwasser-Rohrleitung** $< 100^\circ\text{C}$: $\chi = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$

Sternförmiges Leitungsnetz (Einzellänge $l < 30 \text{ km}$)

$$\chi = \frac{1}{l} \cdot \frac{\Delta W}{W} = 2 \cdot 10^{-7} / \text{m} \rightarrow \frac{\Delta W}{W} < l \cdot \chi = 30 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-7} = 6 \cdot 10^{-3} = 0.6\%$$

Quelle: P. Dietrich, *Die Zukunft unserer Energieversorgung*, Springer, 2010



R13.2 Flussdiagramme der Energieströme

SANKEY-Diagramm: Energiefluss 2020 Deutschland

- Primärenergieverbrauch: 3 306 TWh = 11 899 PJ
- Bereitgestellte Endenergie: 2 317 TWh = 8 341 PJ
- Endenergieverbrauch je Einwohner (83.2 Mio.):
 $2\,317\text{ TWh} / 83\,200\,000 = \underline{27\,853\text{ kWh pro Jahr}}$

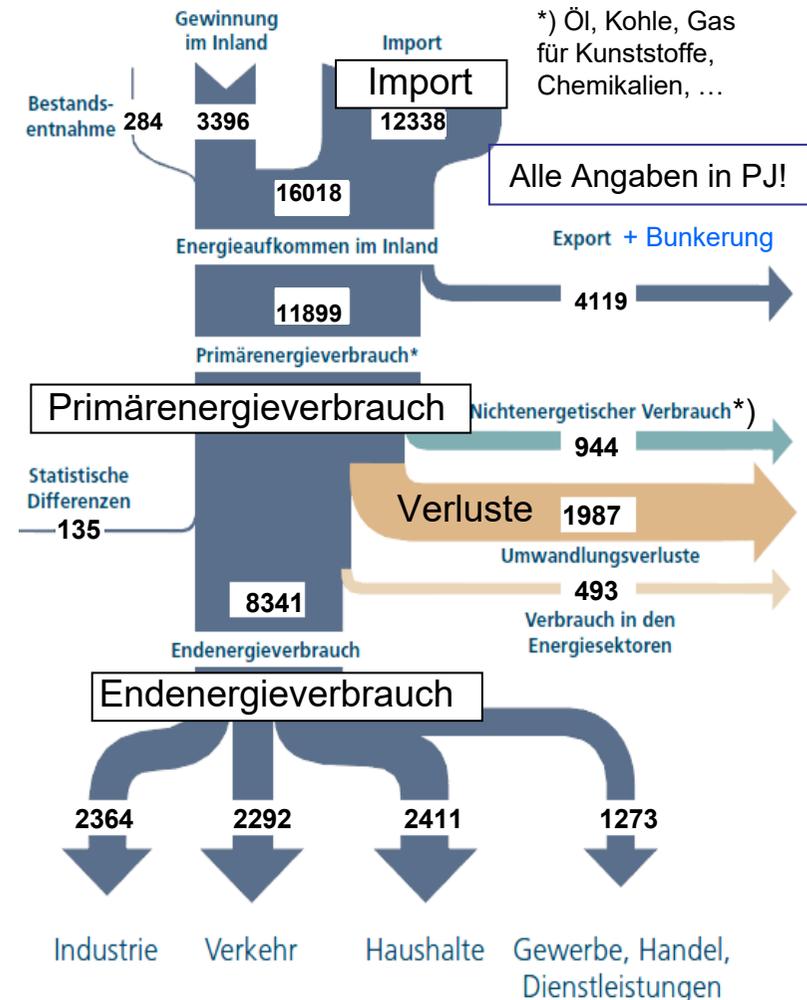
2 317 TWh Endenergieverbrauch in Deutschland

Haushalt	28.9 %
Verkehr	27.5 %
Industrie	28.3 %
Gewerbe/Handel/Dienstleistungen	15.3 %

DAVON 21.1 % (488 TWh) Netto-Stromverbrauch !

1 TWh = 1 Tera-Wattstunde = 1000 Milliarden Wh

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2022 [online]



R13 Energieströme

Zusammenfassung



- Energiequellen und Verbraucher **an unterschiedlichen geographischen Orten**:
Energietransport wesentlicher Bestandteil der Energietechnik
- Transport von
 - a) Primärenergieträgern oder
 - b) „umgeformter“ Energie (z. B. elektrisch) als **Sekundärenergieträger**
- Minimierung der Transportverluste wesentlich
- Weltweite Energietransportrouten werden nicht nur nach **wirtschaftlichen**,
sondern ggf. auch nach **politischen** Gesichtspunkten festgelegt (z. B. „Suez“-Krise 1956, ...)
- Umwelteinflüsse durch Energietransport,
z. B. Öltanker-Havarie \Rightarrow Ölteppich \Rightarrow Meer-Verschmutzung (z. B. „Exxon Valdez“ 1989, ...)
- **Ziel**: Hohe Energiedichte des Transportguts \Leftrightarrow minimaler „Transportaufwand“

