



ZUKUNFT

MI **8. MAI** 2019
18 UHR

WOLFGANG BAUER

MICHIGAN STATE UNIVERSITY, USA,
UND FRANKFURT INSTITUTE FOR
ADVANCED STUDIES

ERNEUERBARE ENERGIEN: WAS IST MÖGLICH, WAS IST ERSCHWINGLICH?



5. JUNI
18 UHR
MARTIN BREITER
UNIVERSITÄT AARHUS, DÄNEMARK
ANPIFF ZUR ZWEITEN HALFTE
DER ENERGIEWENDE:
GRUNDLEGENDE GEDANKEN AUS
DEN NATUR- UND
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

MI 12. JUNI
18 UHR
ERNST ULRICH V. WEIZSÄCKER
EMMENDINGEN
NACHHALTIGE ENERGIE HEISST
WENIGER ENERGIE,
ABER MEHR WOHLSTAND

DOCKENHOF 181 PAUL
VERANSTALTUNGSPARTNER UNI CAMPUS BIEBERG
OTTO-STARCK-ZENTRUM, RUTH-MUFFANG-STRASSE 2
60438 FRANKFURT AM MAIN

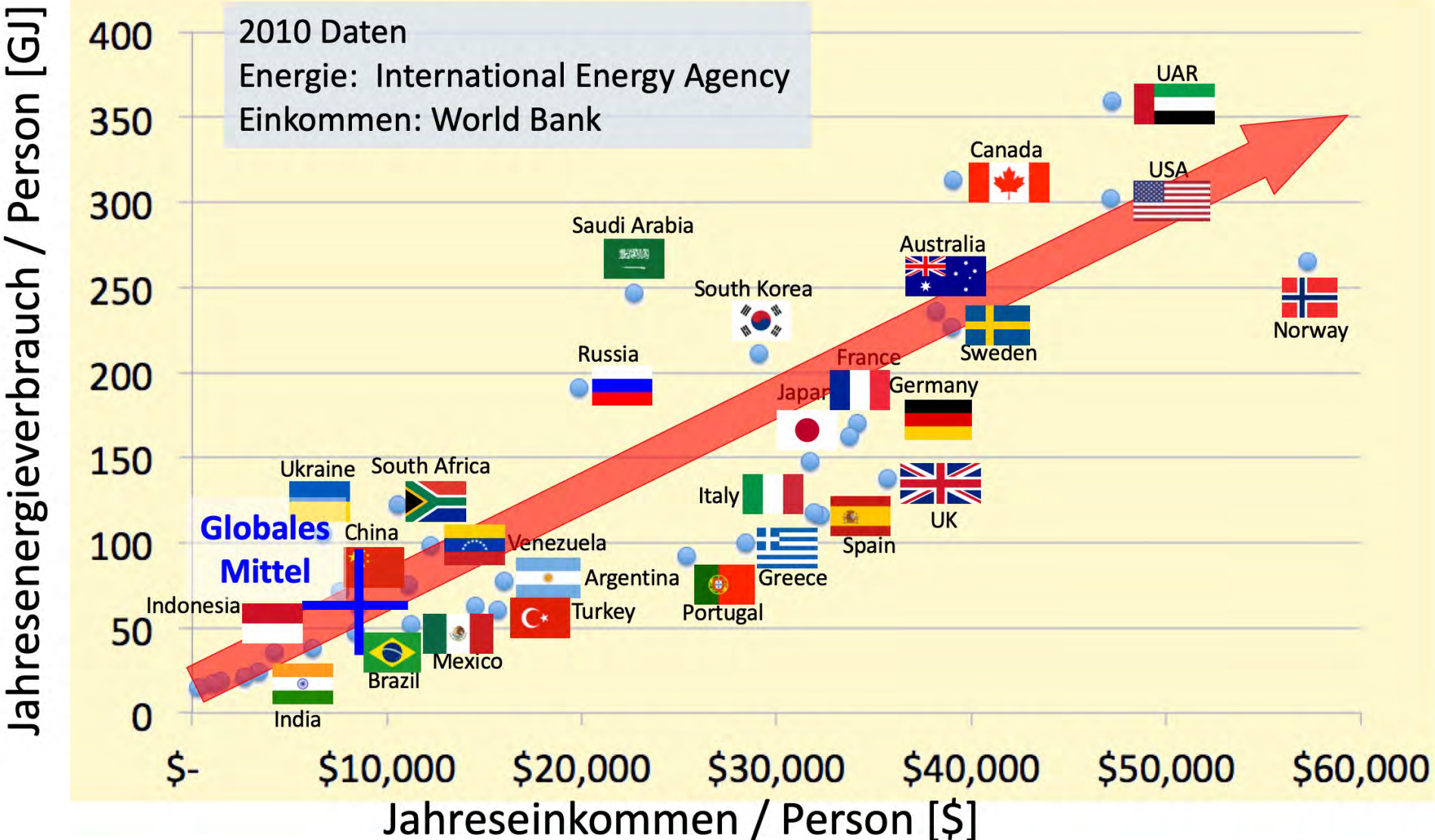
KONZEPTION UND ORGANISATION:
WOLFGANG BAUER, DIRK H. BISCHKE
VERANSTALTER GOETHE-UNIVERSITÄT FRANKFURT

Prolog

- Die wichtigste Formel des heutigen Abends

$$E = \text{€}$$

Energieverbrauch & Wohlstand



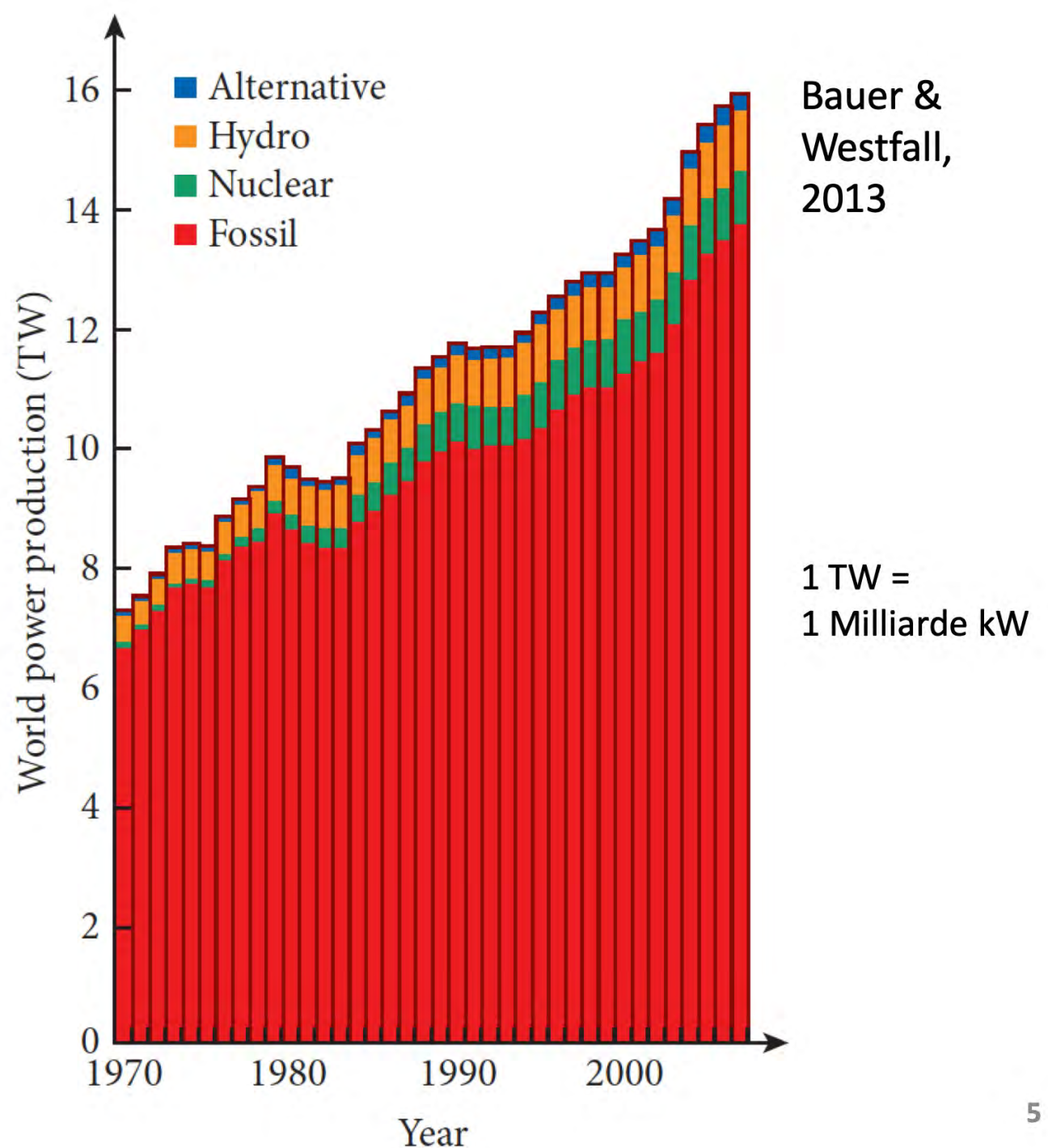
Gegendarstellung:

MI **12. JUNI** 2019
18 UHR

ERNST ULRICH V. WEIZSÄCKER
EMMENDINGEN
**NACHHALTIGE ENERGIE HEISST
WENIGER ENERGIE,
ABER MEHR WOHLSTAND**

Weltleistungs- Produktion

- Wächst linear mit der Zeit
- Zu >80% durch fossile Brennstoffe gedeckt
- ~~• Größtes Problem der Welt~~
- **Größte Chance unserer Zeit**





Globaler CO₂ Haushalt 2006-2015

(in Milliarden Tonnen Kohlenstoff pro Jahr)

Fossile Brennstoffe, Industrie
9.3 ± 0.5

Atmosphärischer Netto-Zuwachs
4.5 ± 0.1

~ 25x Gewicht der Erdbevölkerung

Landnutzungs-Veränderung
1.0 ± 0.5

Landsenke
3.1 ± 0.9

Ozeansenke
2.6 ± 0.5

© Global Carbon Project 2014
Designed by the IGBP

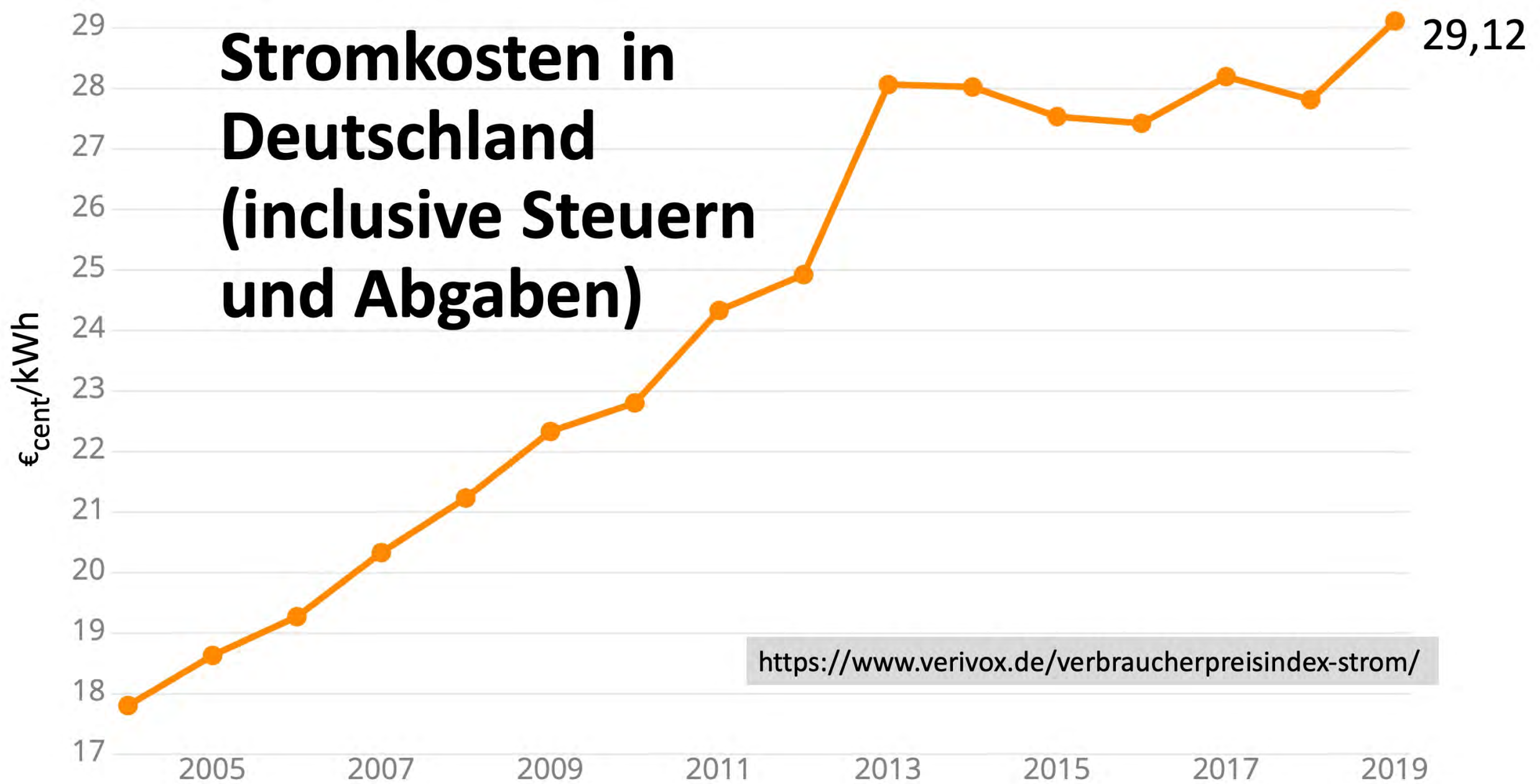
Geologische Vorräte

1 kg C → 3.664 kg CO₂

... zurück zu

***E* = €**

Stromkosten in Deutschland (inclusive Steuern und Abgaben)



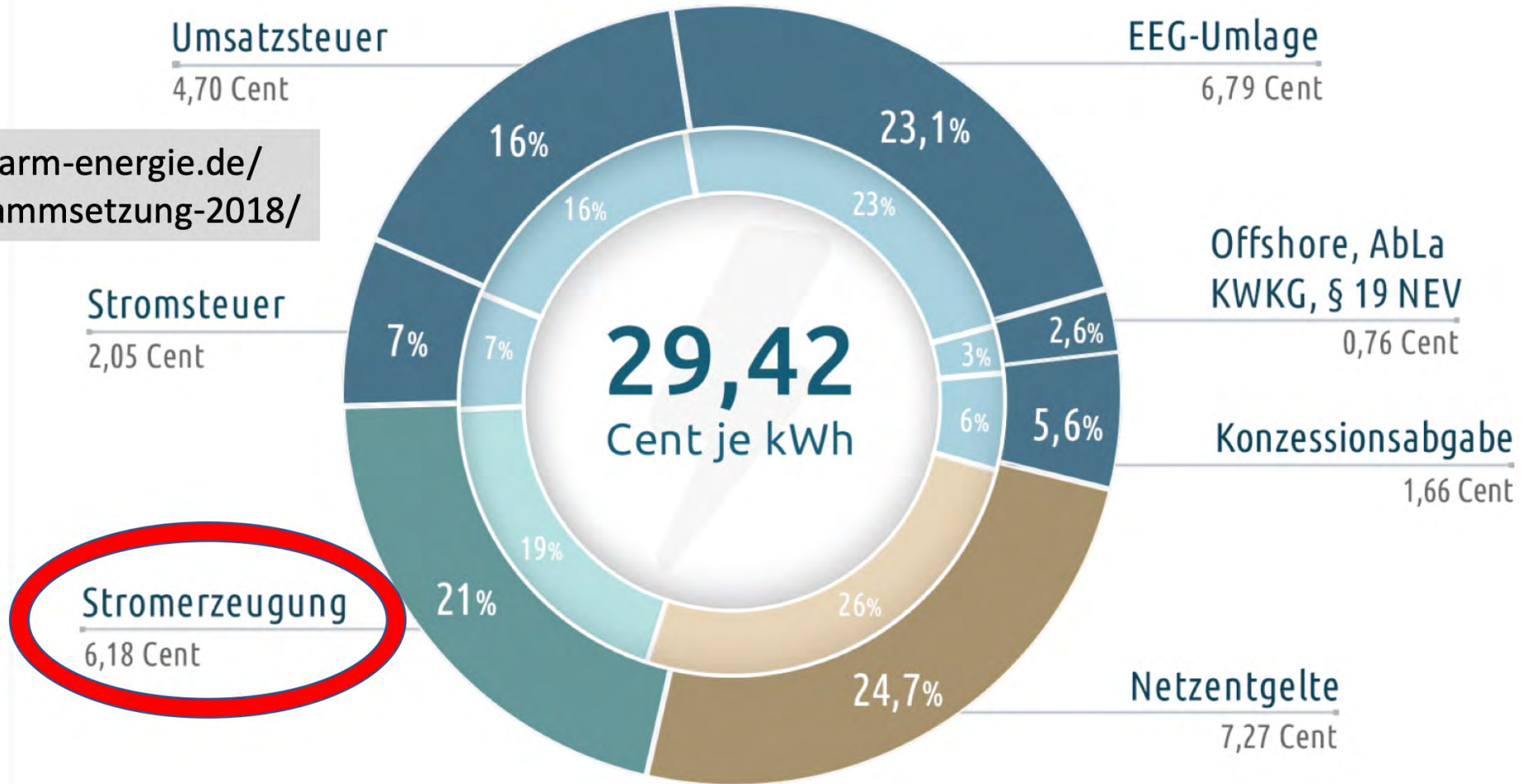
Durchschnittlicher Strompreis bei einem Jahresverbrauch von 4.000 kWh

Quelle: Verivox

STROMPREISZUSAMMENSETZUNG 2018

Durchschnittlicher Strompreis für Haushaltskunden in Deutschland*

<https://www.garm-energie.de/strompreiszusammensetzung-2018/>



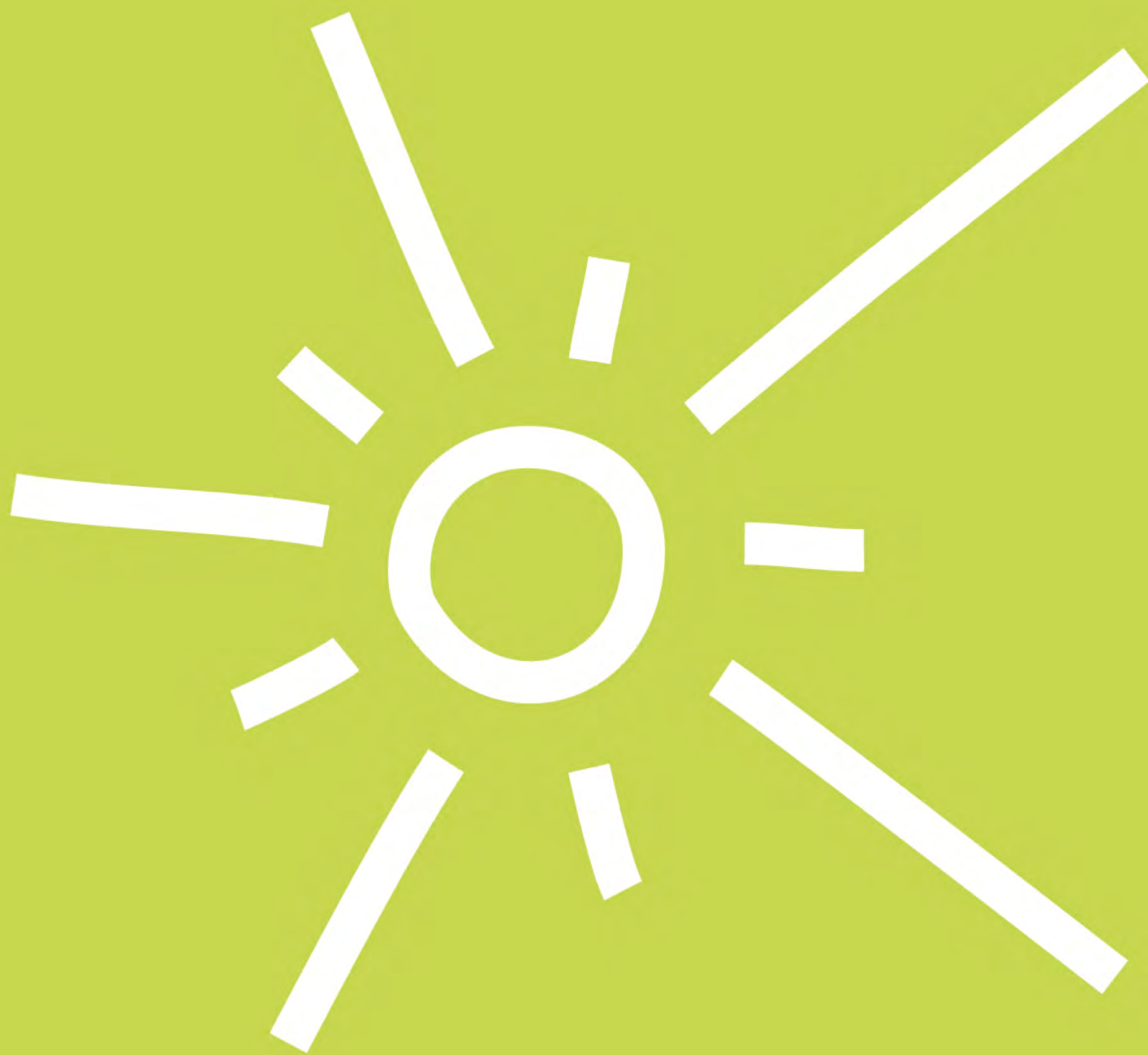
*3.500 kWh Jahresverbrauch [3-Personen]

Steuern & Abgaben 2018 [blau] 54,3% | Äußerer Ring: 2018 | Innerer Ring: 2017

Stromerzeugungskosten (LCOE)

- $LCOE$ = (Anfangsinvestition I_0 + jährliche Kosten A_t) /
gesamte erzeugte Strommenge M_t
 t = Jahr 1 bis n , der Gesamtlebensdauer des Kraftwerks
 A_t = Brennstoffe, Wartung, Reparaturen
- Unter Berücksichtigung des Zinssatzes i :

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1+i)^t}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right]$$



- Strahlungsleistung = 4×10^{26} W
- Energiequelle: Kernfusion von Wasserstoff zu Helium
- 600 Millionen Tonnen pro Sekunde
- Reicht noch für etwa 5 Milliarden Jahre



Vorschau, nächster Vortrag:

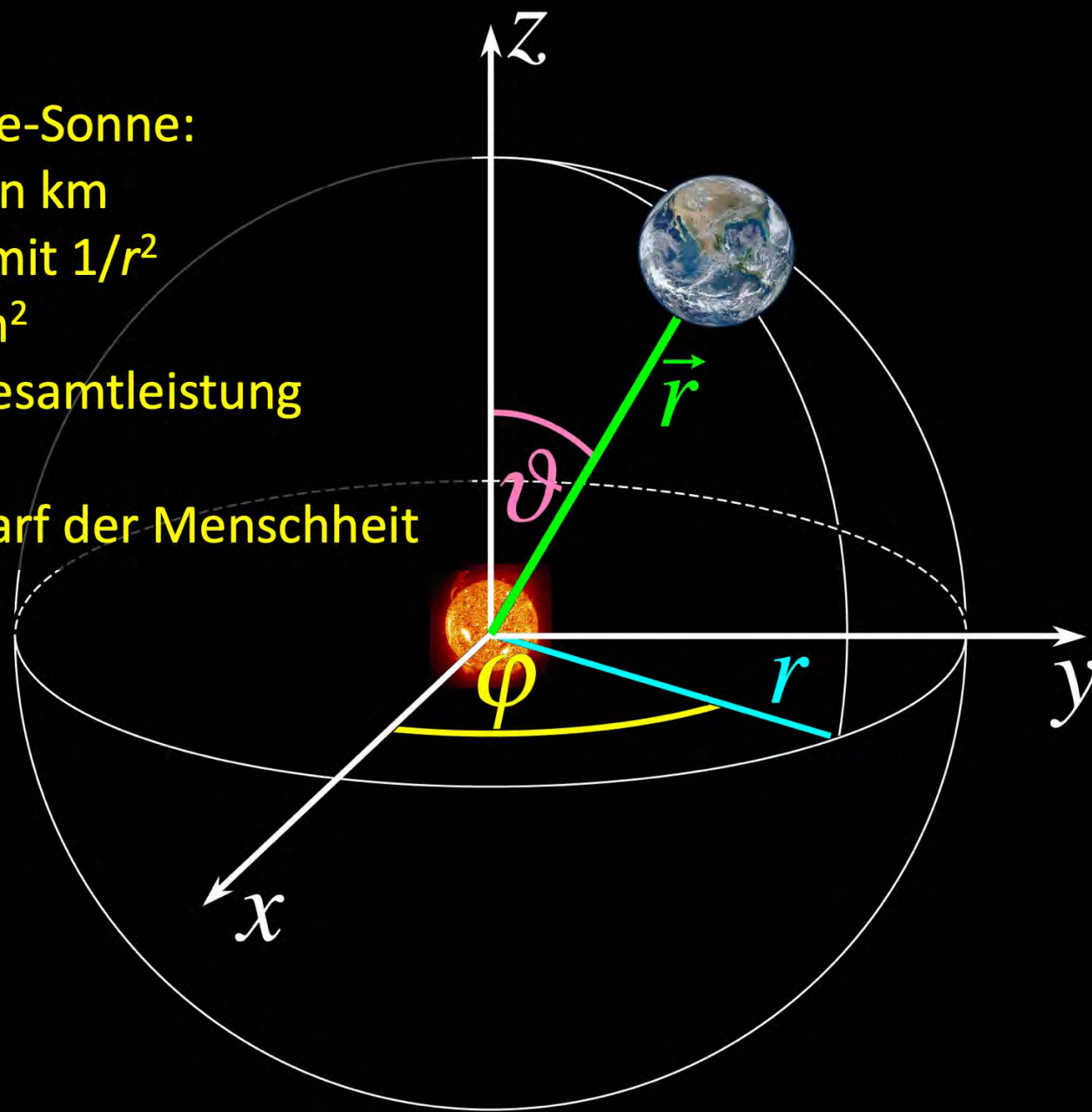
MI **22. MAI** ²⁰¹⁹
18 UHR

THOMAS KLINGER

MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR PLASMAPHYSIK, GREIFSWALD,
UND UNIVERSITÄT GREIFSWALD

**FUSION VON WASSERSTOFF:
ENERGIE DER ZUKUNFT ODER
EWIGER TRAUM?**

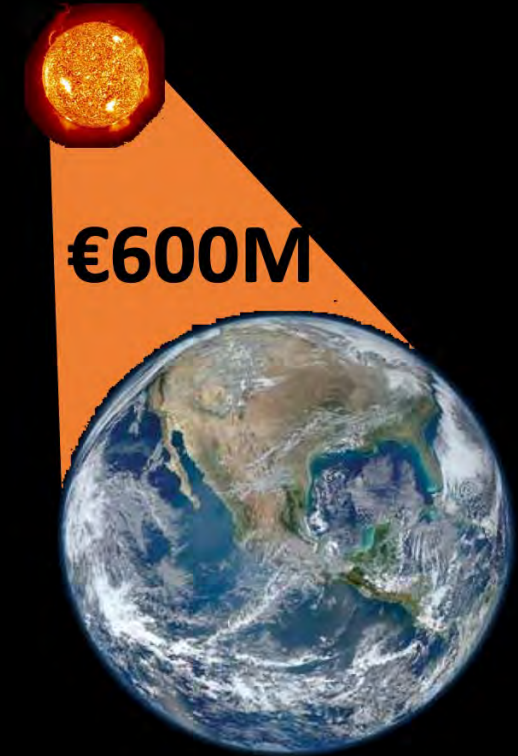
- Entfernung Erde-Sonne:
 $r = 150$ Millionen km
- Intensität fällt mit $1/r^2$
- Erde: $1,4 \text{ kW/m}^2$
- Empfangene Gesamtleistung
 $180,000 \text{ TW}$
 $= 10,000 \text{ x Bedarf der Menschheit}$



Empfangene Gesamtleistung: 180,000 TW

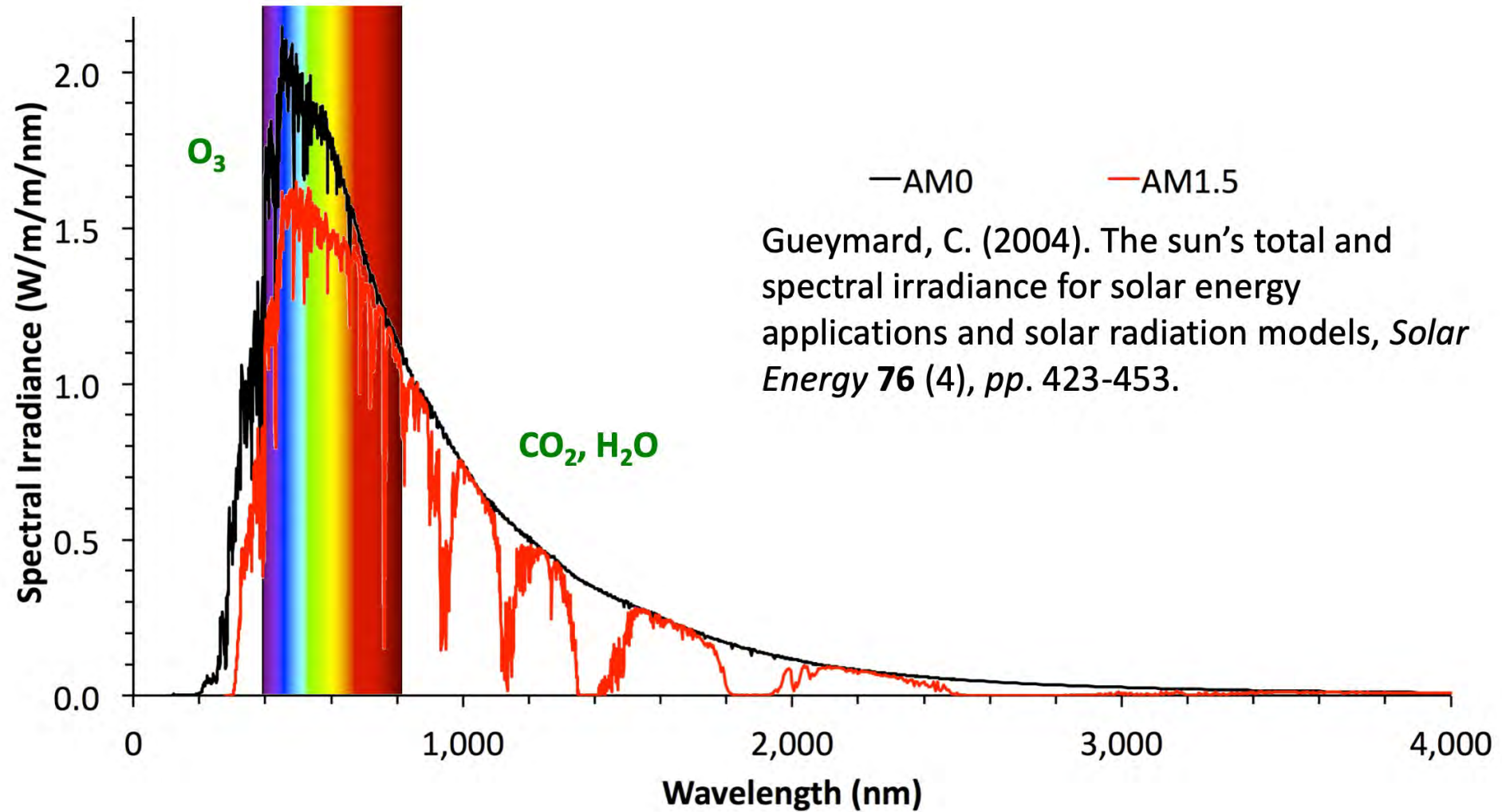
Kleine Nebenrechnung:

- Sonnenstrahlung kann mit ~20% Wirkungsgrad in Elektrizität verwandelt werden
- kWh Elektrizität kostet 6 €-cent
- Jede ***Sekunde*** kommen auf der Erde potentielle **€ 600 Millionen** Sonnenstrom an!



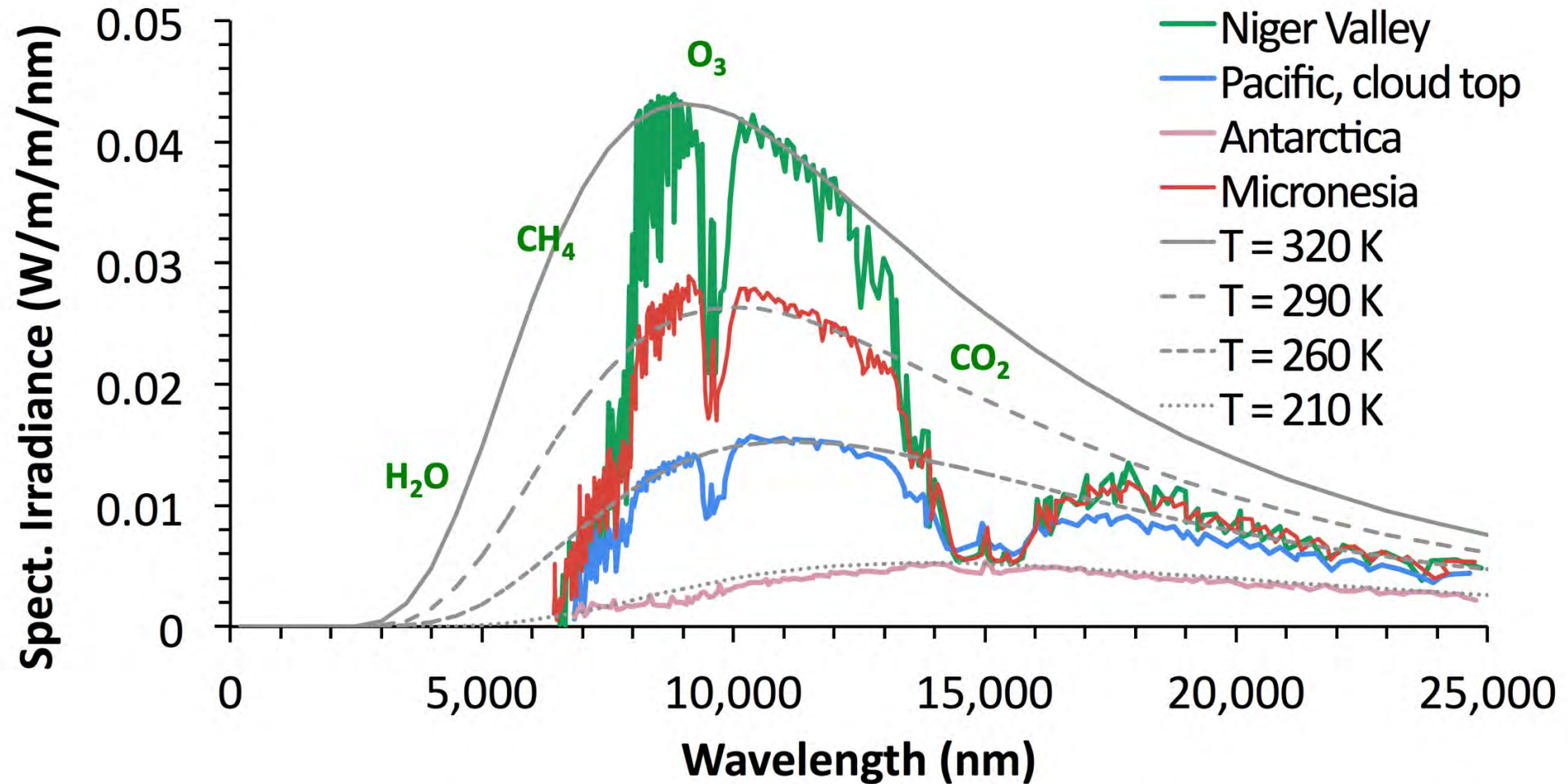
Sonnenspektrum

W. Bauer (2016)



Erdspektrum

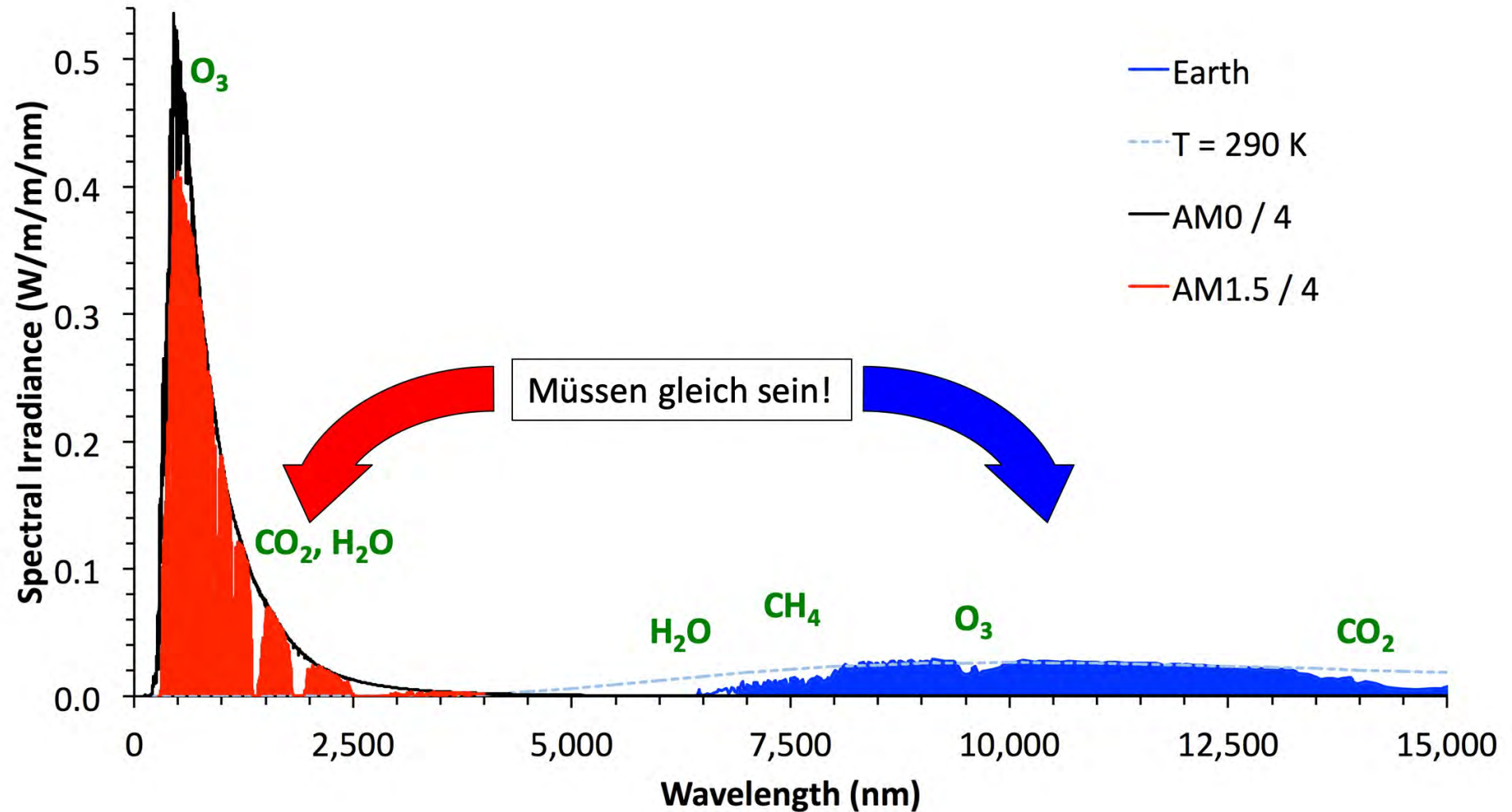
W. Bauer (2016)



Data from: Hanel, R. A., Conrath, B. J., Kunde, V. G., Prabhakara, C., Revah, I., Solomonson, V. V., and Wolfrod, G. (1972). The Nimbus 4 Infrared Spectroscopy Experiment, 1. Calibrated Thermal Emission Spectra, *Journal of Geophysical Research* **77**, pp. 2629-2641.

Strahlungsgleichgewicht

W. Bauer (2016)



Rolle der Atmosphäre

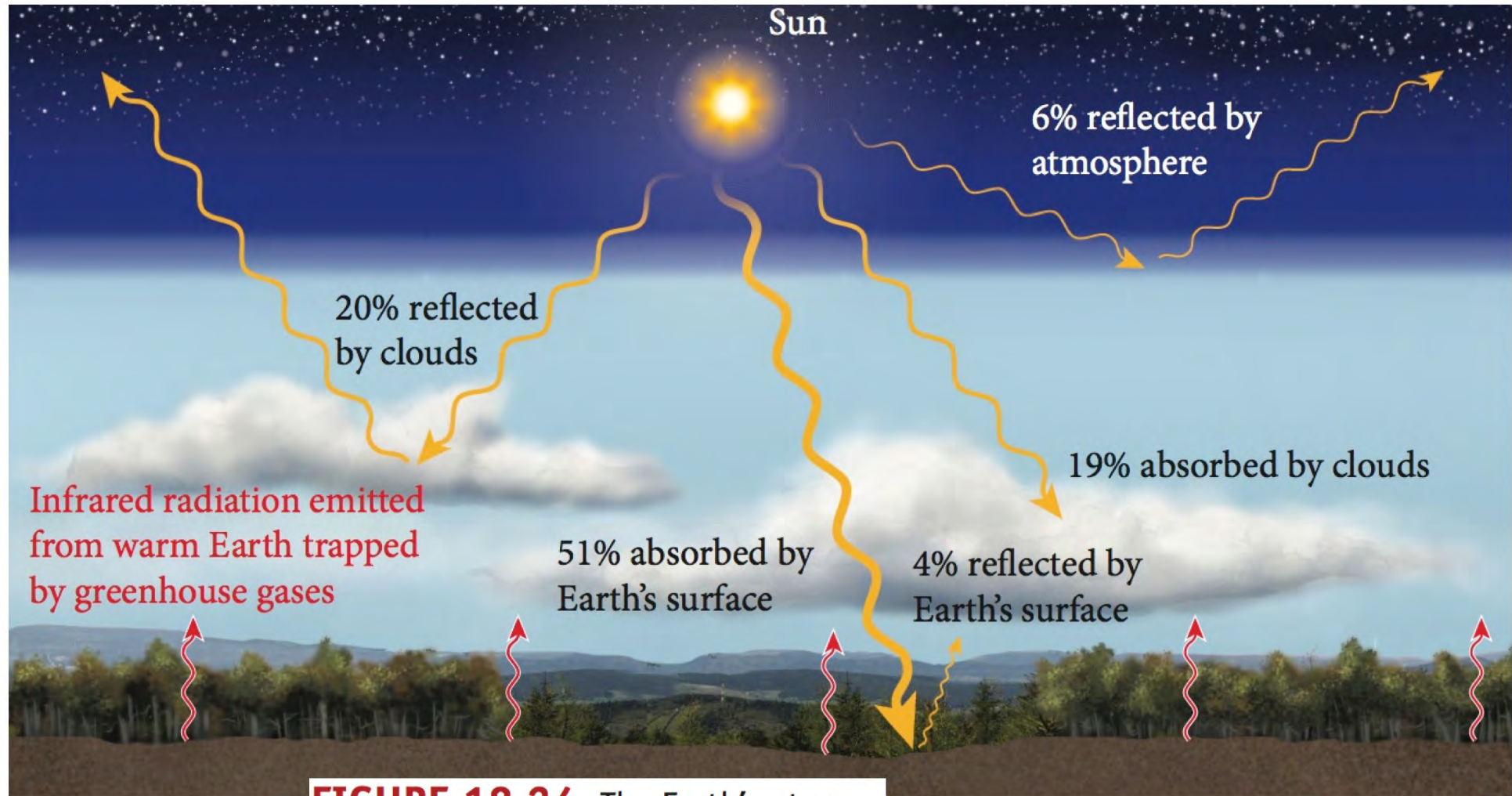


FIGURE 18.24 The Earth's atmosphere strongly affects the amount of energy absorbed by the Earth from the Sun.

Rolle des Wassers

Zwei Haupteffekte:

- Wasserdampf ist ein Treibhausgas (H_2O ist ein elektrischer Dipol)
 - Konzentration von Wasser in der Atmosphäre ist getrieben durch Oberflächentemperatur (Ozeane und Landmassen)
- Schnee und Eis reflektieren Sonnenstrahlung
 - Schneedecke ist sehr sensitive auf Temperatur der Atmosphäre

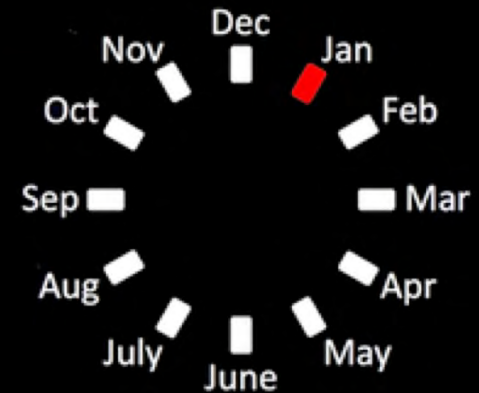
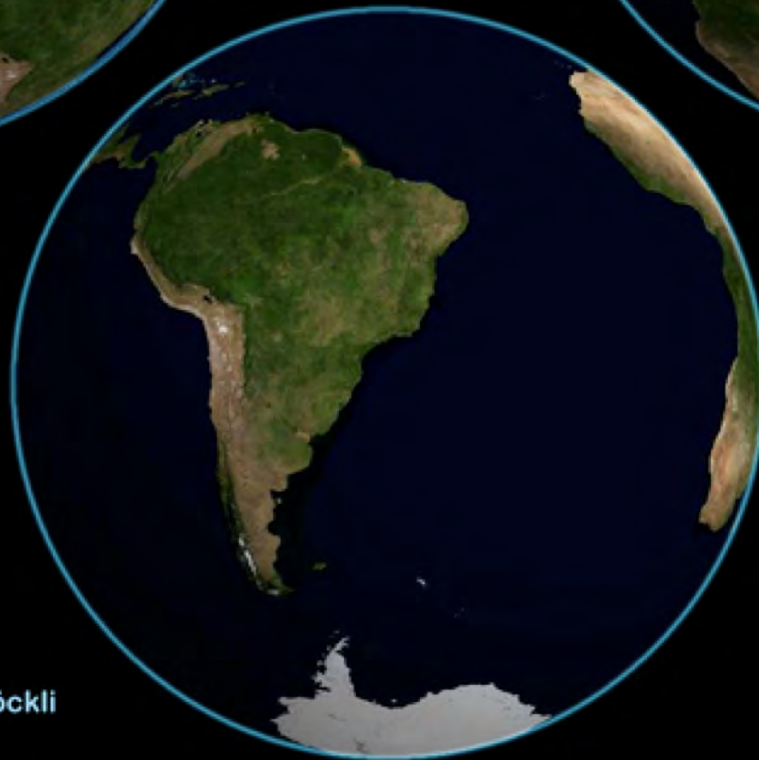
Feedback-Loop:

- Verstärkt den Effekt von anderen Treibhausgasen (CO_2 , CH_4 , ...)

2014

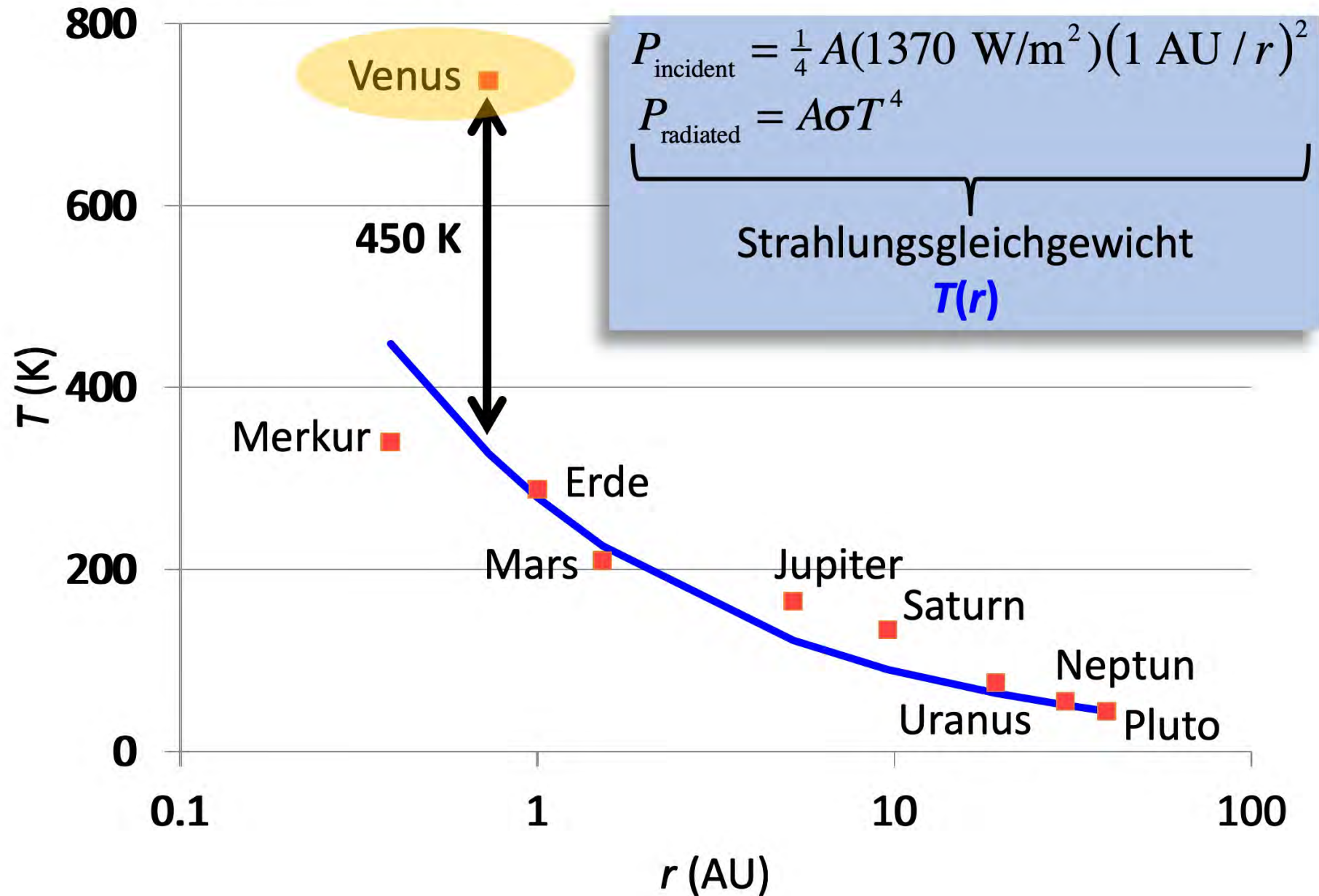


January



Animation: W. Bauer, 2015
Image credit: Blue Marble, Reto Stöckli

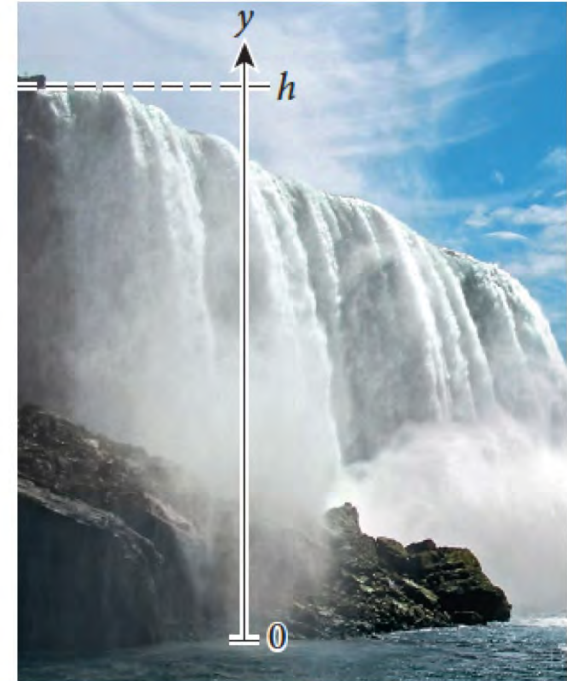
Oberflächentemperatur der Planeten





Leistung der Niagarafälle

- Flussvolumen
~ 3 Millionen Liter/Sekunde
- Höhe $h = 50$ m
- *Leistung* = mgh/t
= 1.5 GW



Staudämme

Beispiel: Three Gorges Dam

- Bauende 2008
- Kosten: \$26 Milliarden (¥180 Milliarden)
- Kapazität: 18.2 GW
- $LCOE \sim 3 \text{ €}_{\text{cent}}$





Wind



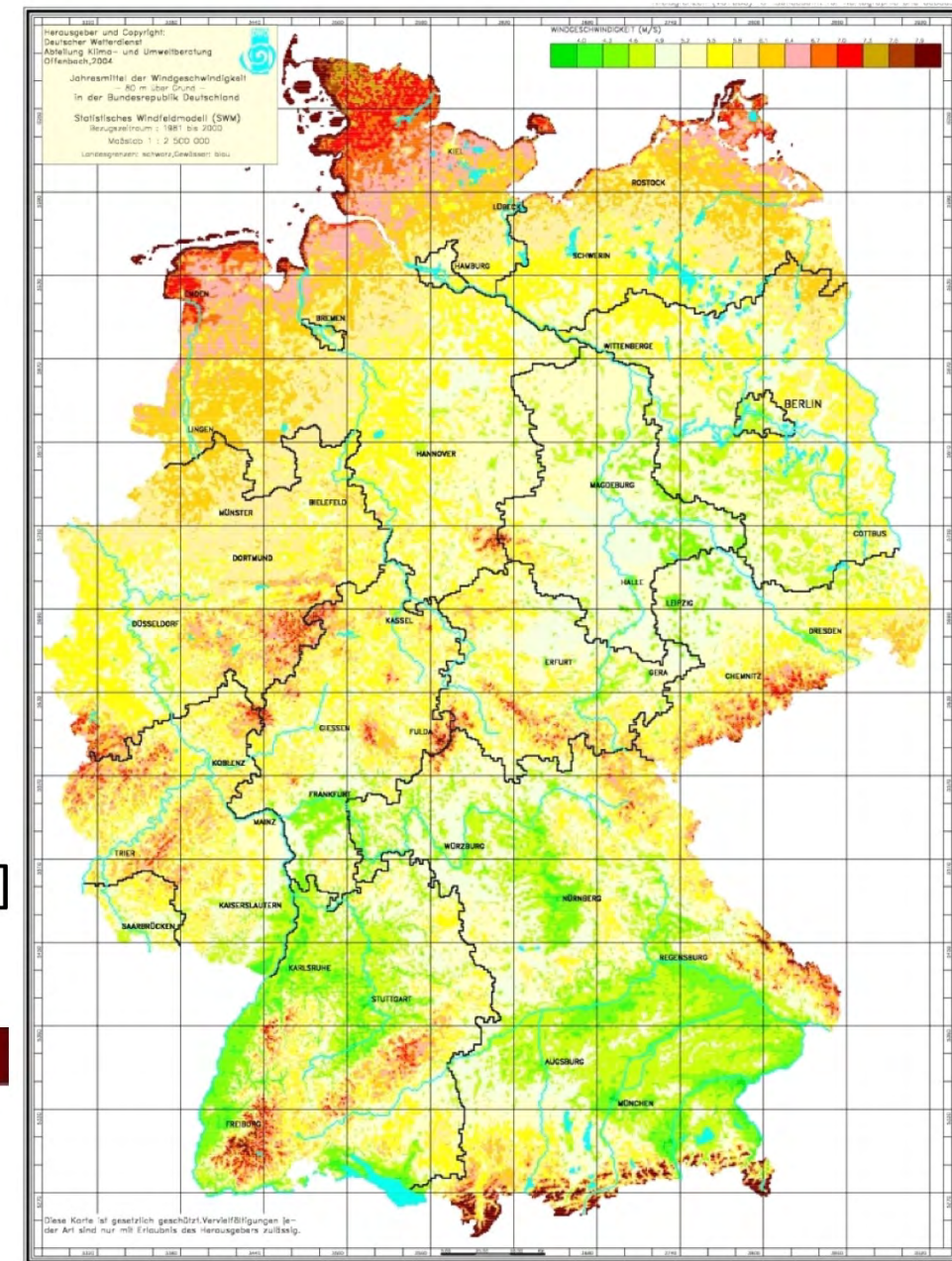


Wind

Turbinen können bis zu 59.3%
der kinetischen Energie des
Windes in Elektrizität
umsetzen (Betz Limit)

$$P_{\text{wind}} \propto v^3$$

Windgeschwindigkeit 80 m über Grund [m/s]



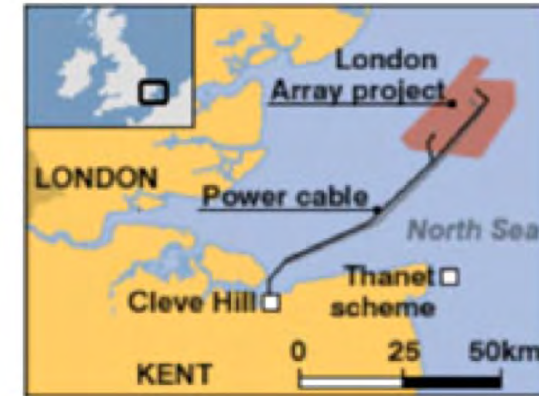
https://www.dwd.de/DE/leistungen/windkarten/deutschland_und_bundeslaender.html

London Array



Wind

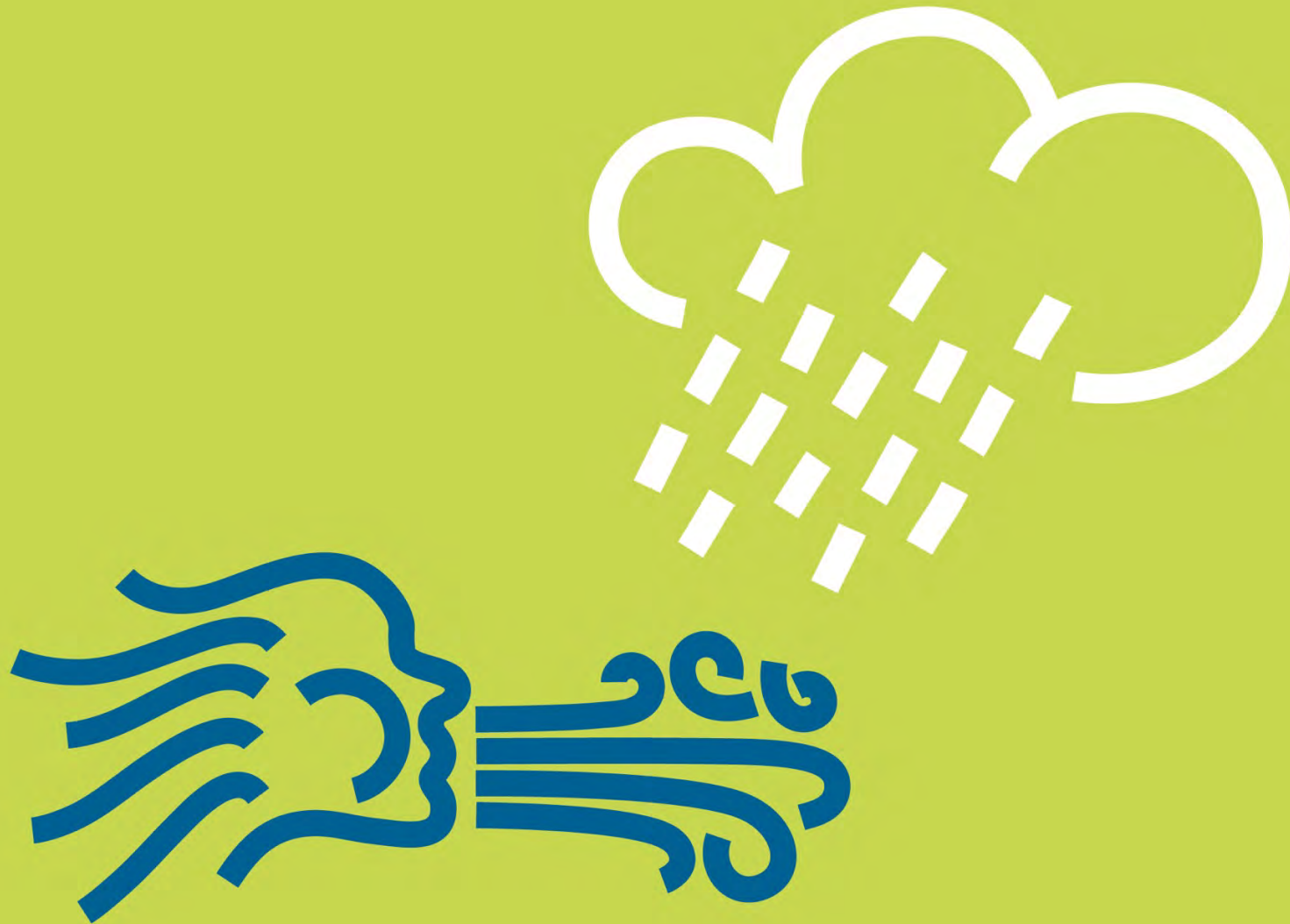
- Beispiel: London Array
 - Bauende 2012
 - Kosten: €2.2 Milliarden
 - Spitzenleistung: 630 MW



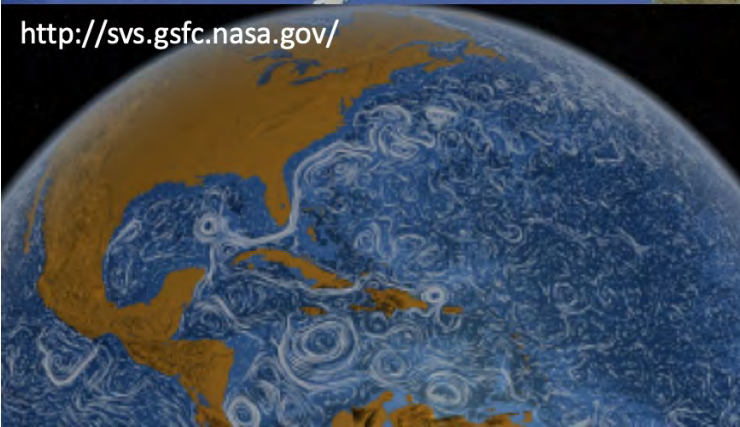
Dänemark: $\frac{1}{4}$ der Elektrizität vom Wind, ~ 4 GW.
Zeitliche Schwankungen getilgt durch Norwegische
Pumpkraftwerke



Middelgrunden offshore wind farm nahe Kopenhagen, Dänemark
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:DanishWindTurbines.jpg>



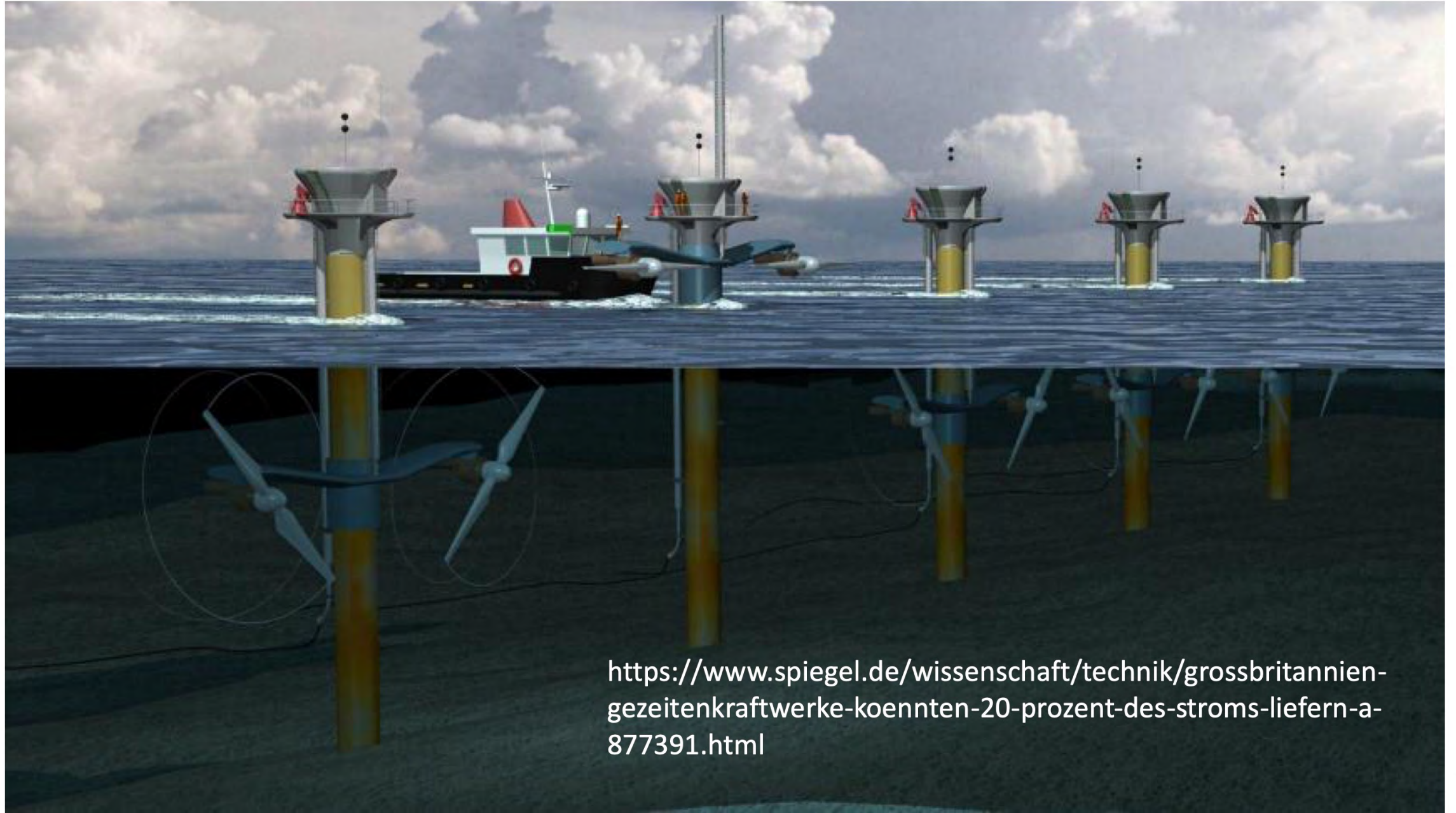
Meeresströmungen



- Sound of Islay, Orkney Inseln
- HS1000 Unterwasserturbine
- 1 MW
- Kosten: €10M
- Höhere Dichte
- Kleinere Geschwindigkeit
- Weniger zeitliche Schwankungen



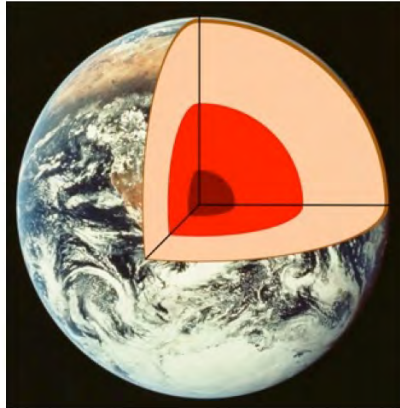
Gezeitenkraftwerk



<https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/grossbritannien-gezeitenkraftwerke-koennten-20-prozent-des-stroms-liefern-a-877391.html>



Erdwärme



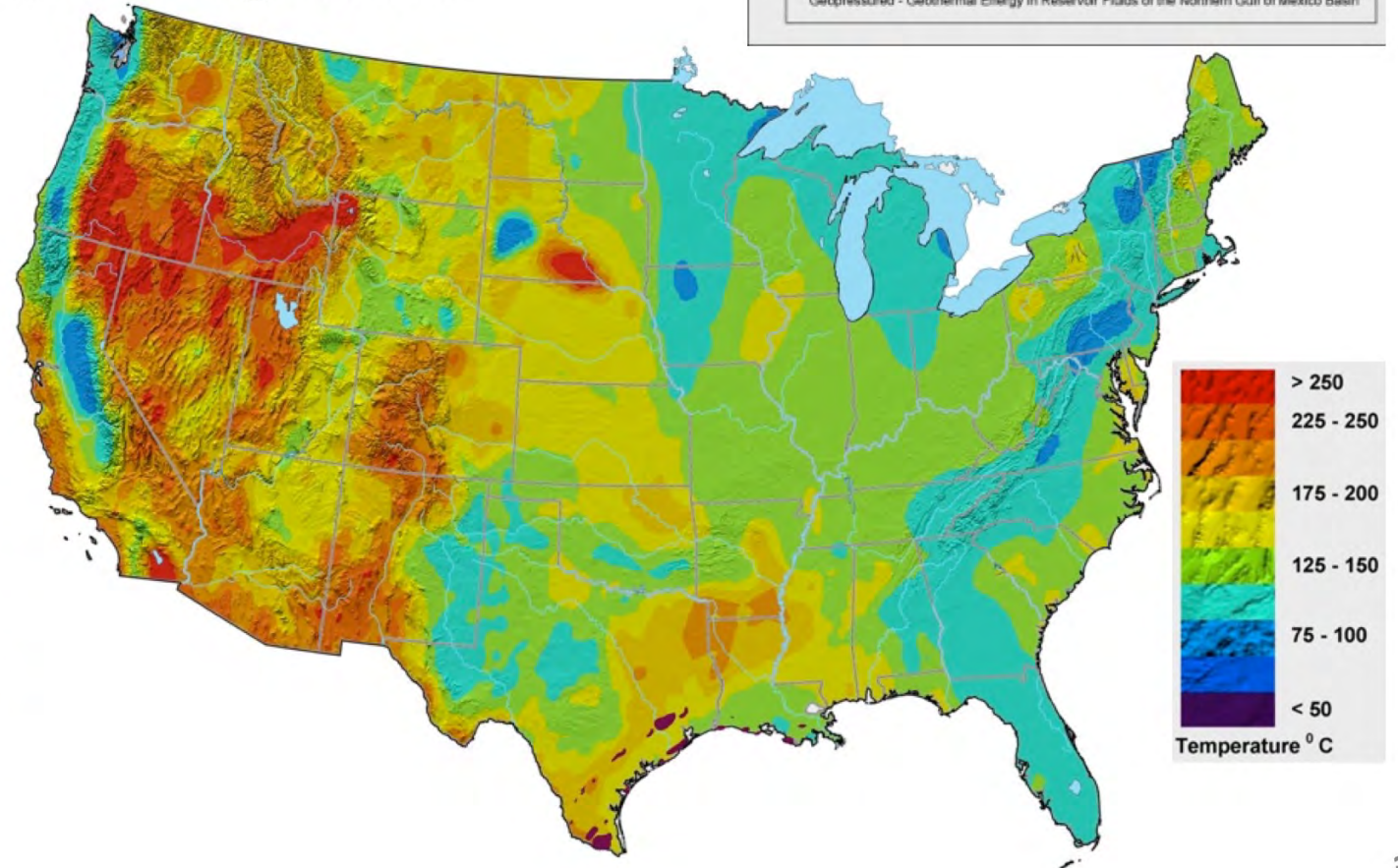
Erdwärme $\sim 10^{31}$ J

Wärmeflussdichte: 0.1 W/m^2

Gesamtwärmeleistung: 44 TW



FIGURE 18.32 Nesjavellir Geothermal Power Station in Southwest Iceland, which generates 120 MW of electrical power.



Estimated Temperatures at 6 Kilometers

Legend

Rivers Lakes Geopressure Zones



Map Prepared by the Idaho National Laboratory Geothermal Technologies Program and Idaho National Laboratory Geospatial Science & Engineering
Temperature data provided by Southern Methodist University Geothermal Laboratory as of 4/12/2005 <http://www.smu.edu/geothermal>
Geopressured potential data from U.S.G.S. Circular 790 Map "Geopressured - Geothermal Energy in Reservoir Fluids of the Northern Gulf of Mexico Basin"

Tiefe Geothermie

Enhanced Geothermal System

- 2 oder mehr Bohrlöcher
- Hydraulic fracturing
- Kosten: ~ \$20 Millionen
- Kapazität: 4 MW
- Risiken:
 - Erdbeben
 - Grundwasser-Kontamination



GSA Topical Session, Denver 2010

Warren Wood

Wolfgang Bauer

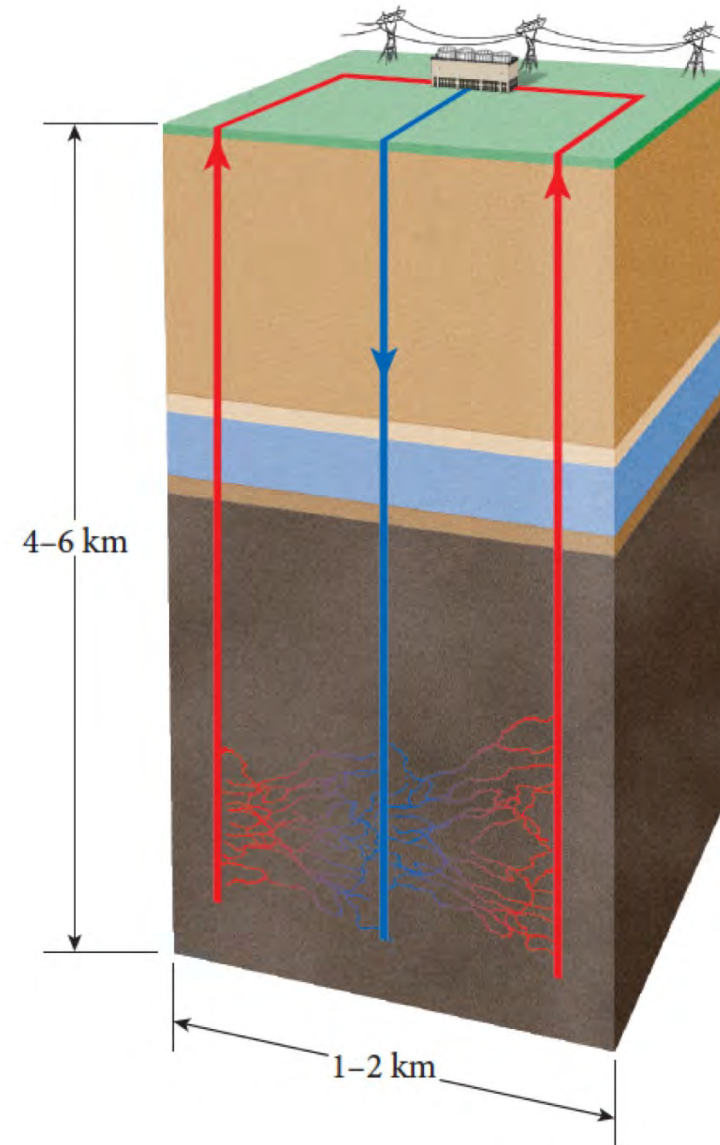


FIGURE 18.33 Diagram of an enhanced geothermal system.

Biogaskraftwerk



Grundprinzip

- Pflanzen verwandeln Sonnenschein, Wasser und CO_2 aus der Atmosphäre in Biomasse
- Wir zerhacken und fermentieren die Pflanzen um Methan zu erzeugen, welches wir dann in Motoren verbrennen um die Sonnenenergie zurückzugewinnen
- Kohlenstoff-neutrale Energie- „Produktion“



MW-Biogaskraftwerk



- Anfangsinvestition: ~ €3-5 Millionen
- Land: 150 Hektar
- 6.200 MWh Elektrizität/Jahr
- 6.500 MWh thermische Energie/Jahr
- Zeitlich konstante Leistung, kann auch zur Fluktuationstilgung anderer erneuerbarer Energieträger verwendet werden.

Abwärmeverwendung

- Schwimmbäder
- Trocknungsanlagen
- Fernheizung
- Gärtnereien



Fermentierschlamm



- Jährliche Produktion $\sim 10.000 \text{ m}^3$
- Organischer Dünger
- Keine Geruchsbelästigung
- Kein Run-off



MSU Anaerobic Digester

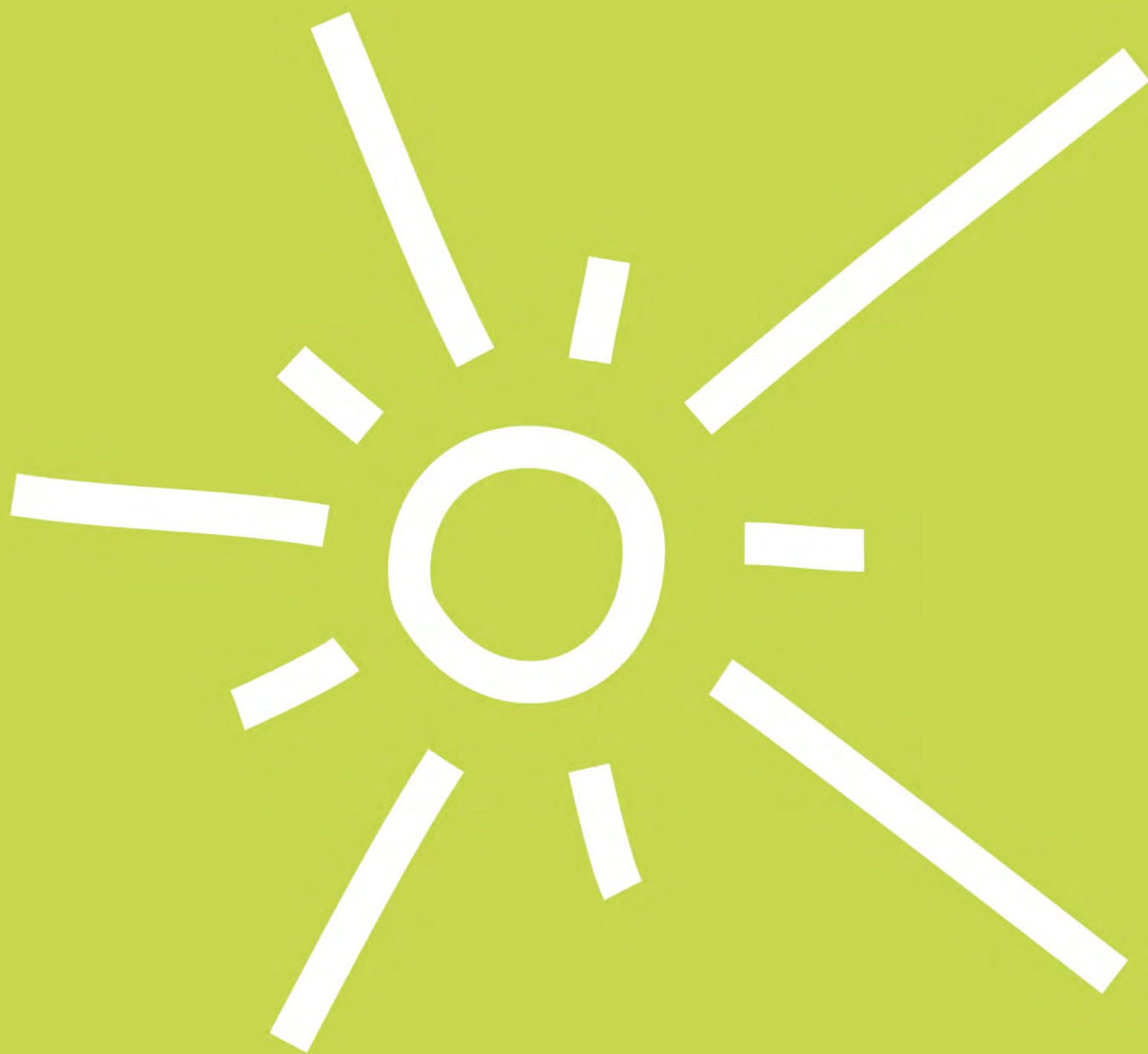
- Fertigstellung: Sep. 2013
- 22.000 Tonnen Lebensmittelabfälle/Jahr verwertet



Biogasreinigung

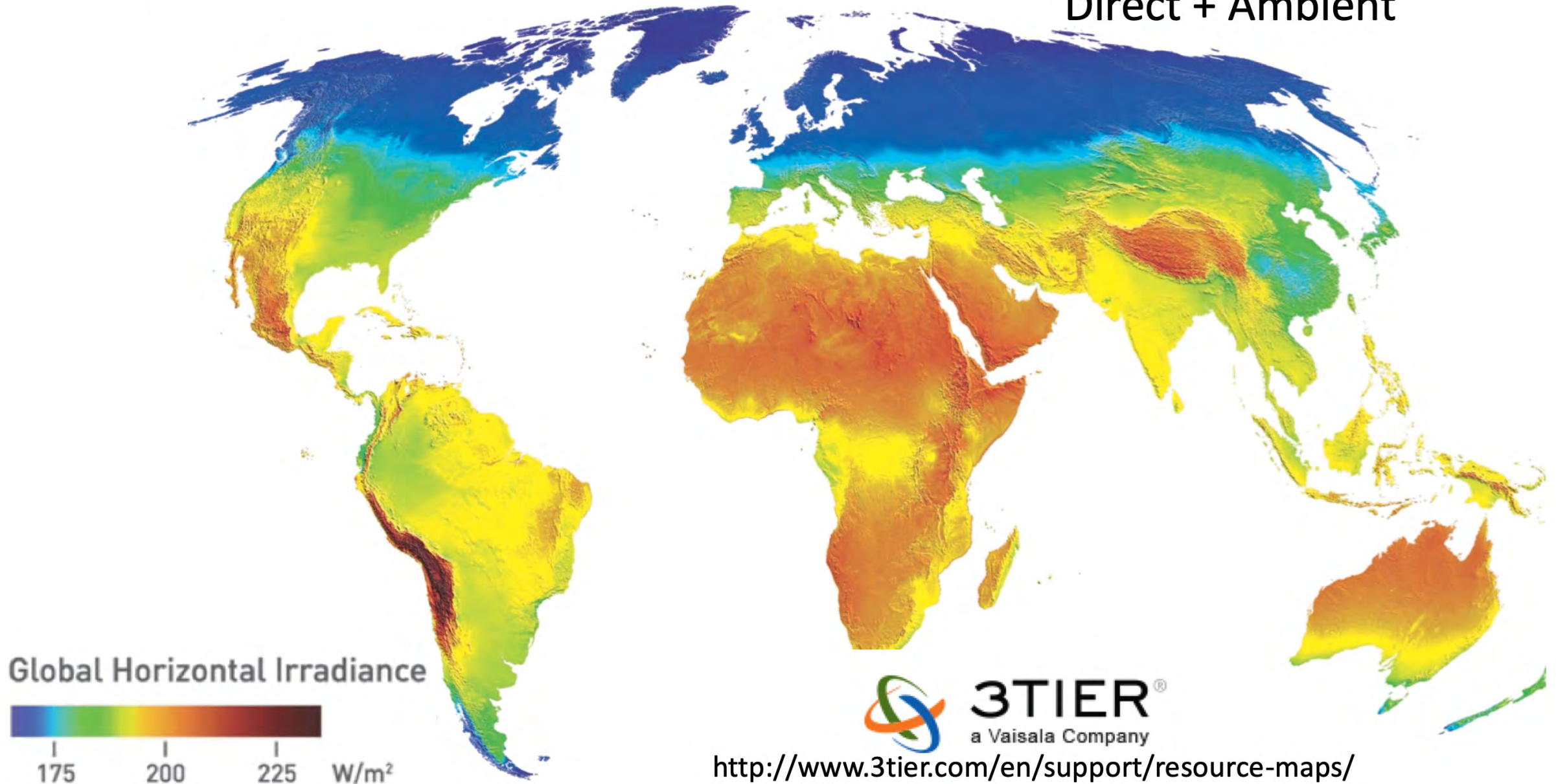
- Entfernen von CO_2 und HS mittels Wasser-Jets
- 99% sauberes CH_4
- Verbraucht $\sim \frac{1}{4}$ des Biogas Energieinhalts
- Erneuerbarer Treibstoff für Ottomotoren
 - $\sim 3x$ höherer Ertrag/Hektar als bei Bioethanol





Nutzbare Sonnenstrahlung

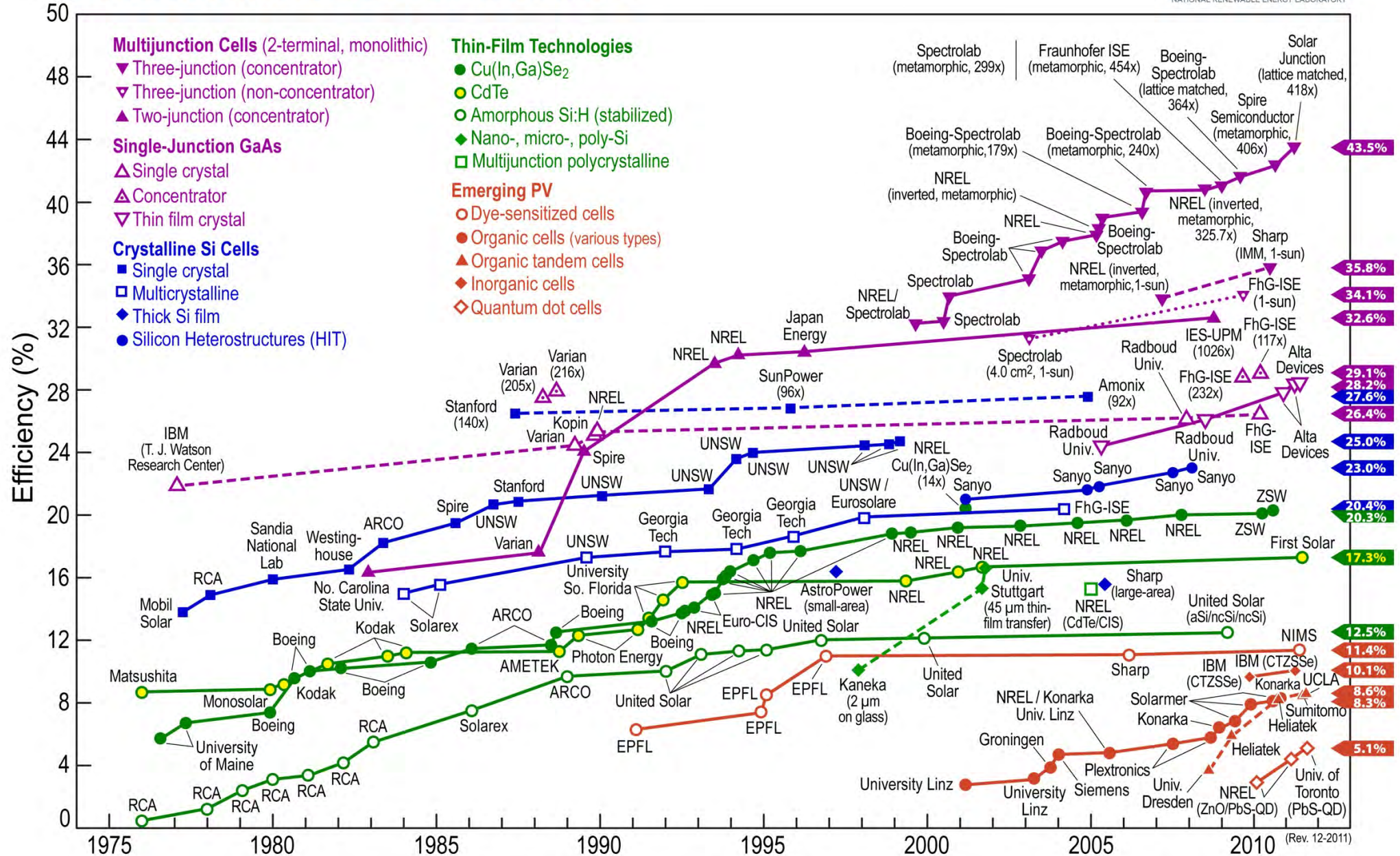
Direct + Ambient



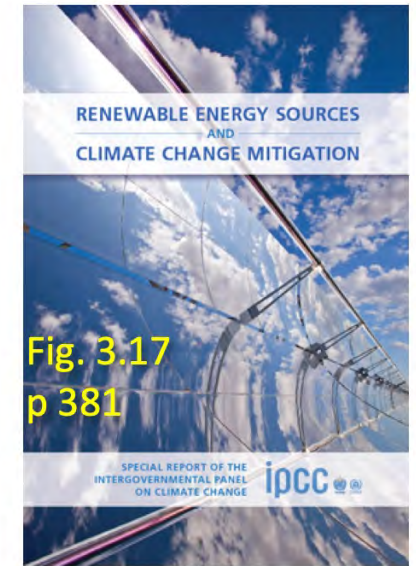
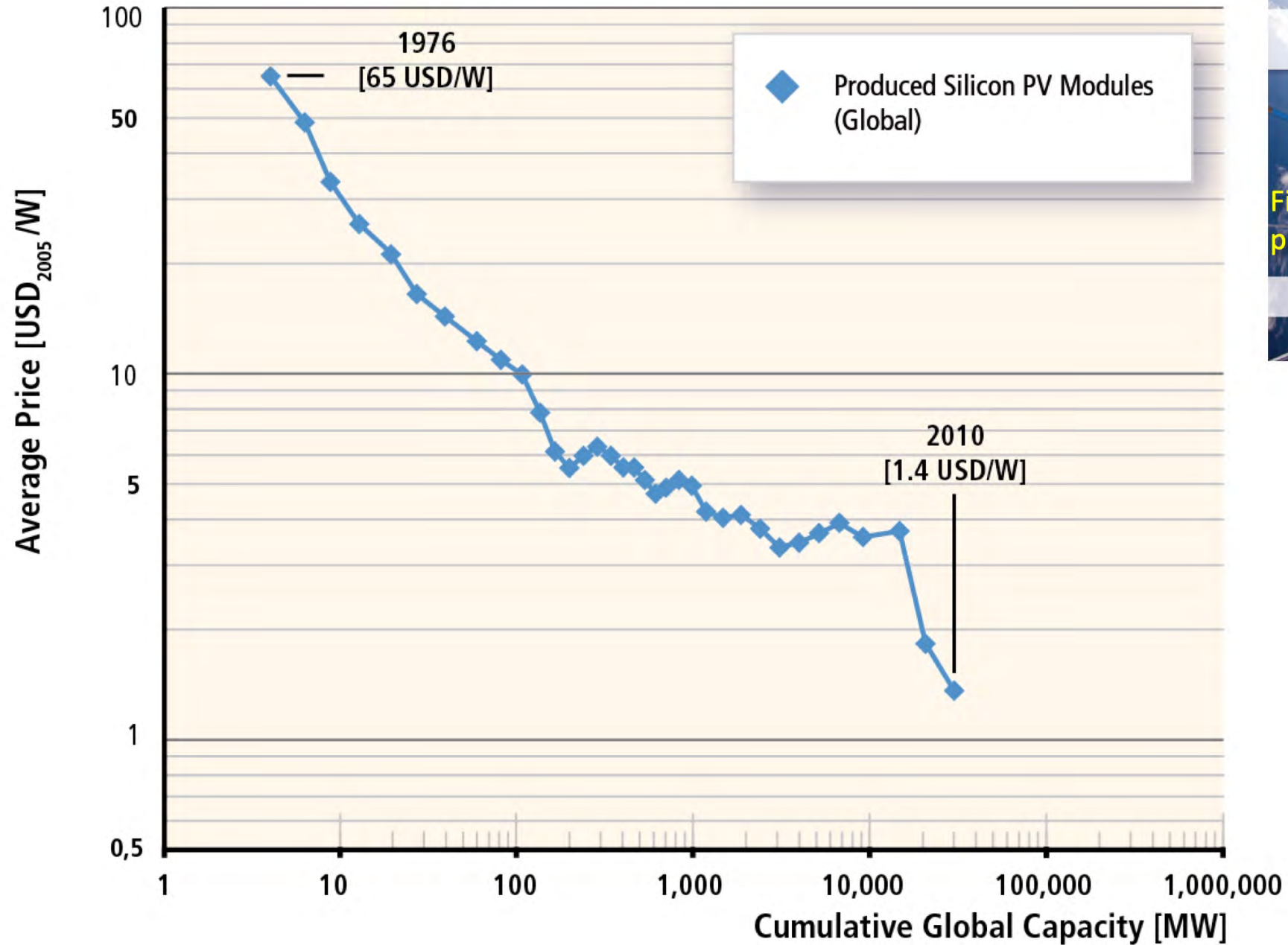
<http://www.3tier.com/en/support/resource-maps/>

PV solar... wird immer effizienter

Best Research-Cell Efficiencies



... und billiger



Solar-Thermal

<http://trends.directindustry.com/news-trends/the-worlds-largest-solar-thermal-plant-opens-amidst-doubts/>

Ivanpah Solarthermal Plant

- \$2,2 Milliarden
- 1.200 Hektar
- 347.000 Spiegel
- 377 MW peak (net)

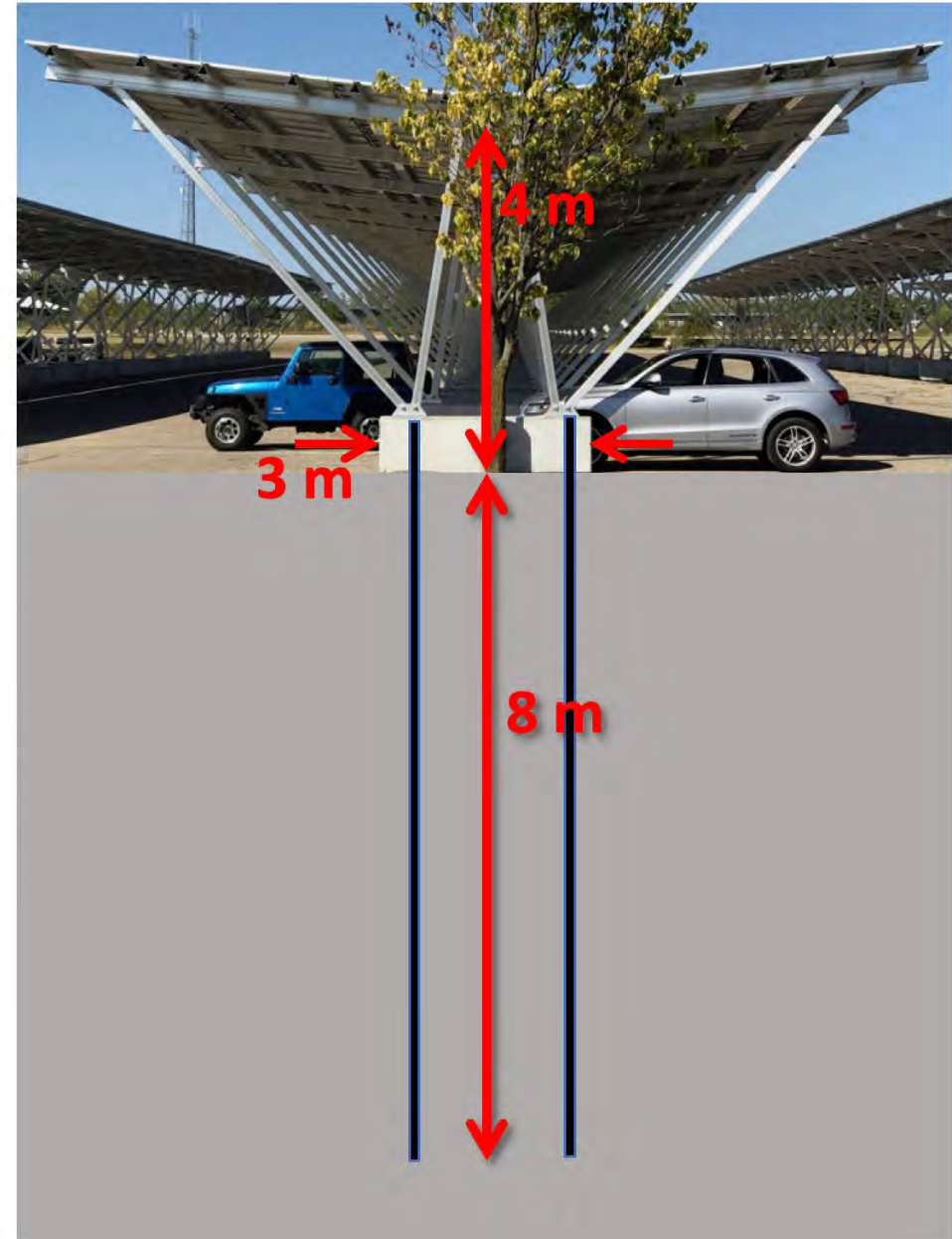


Solarparkplätze bei Michigan State University



Dimensionen

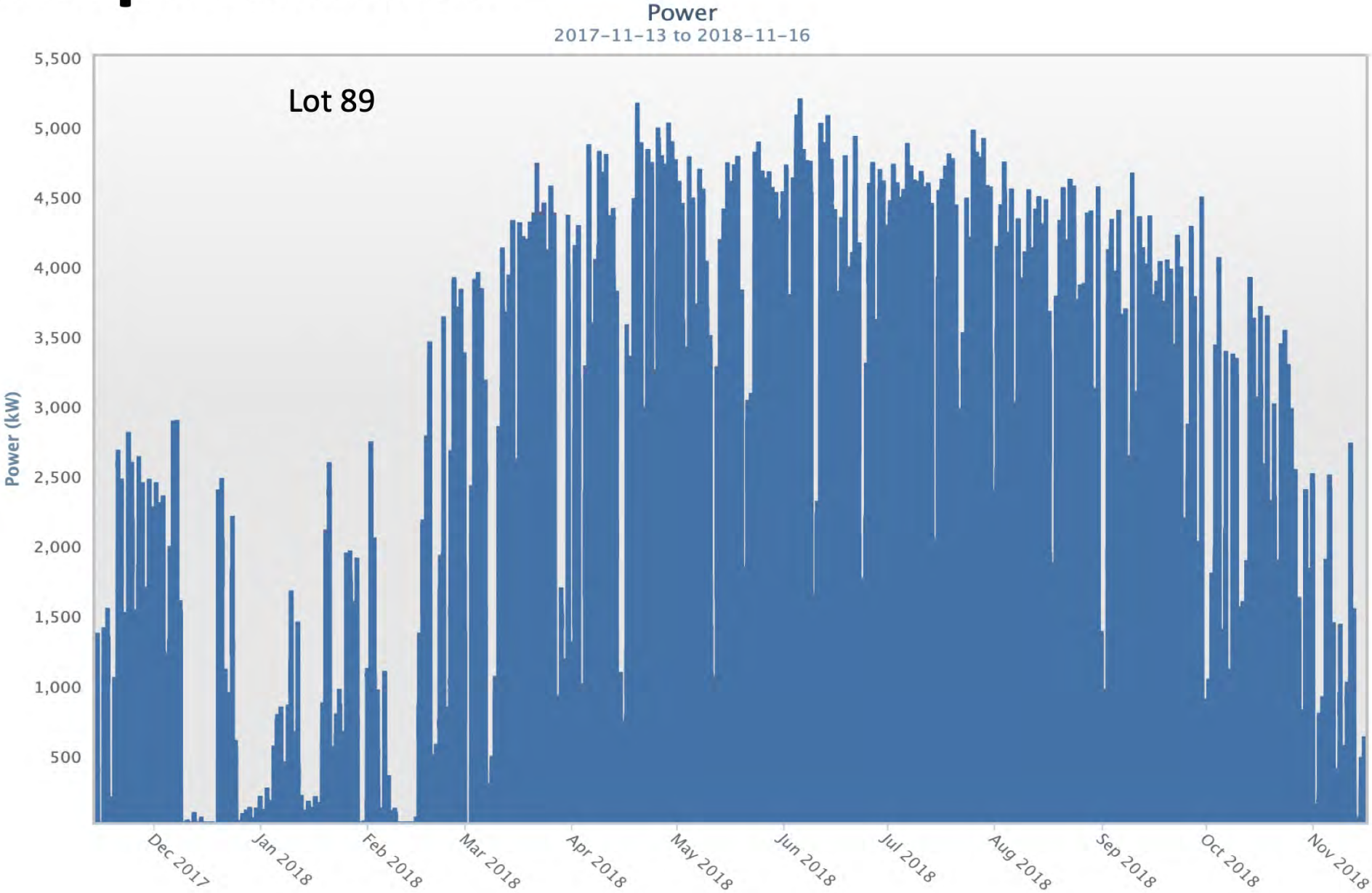
- 5.000 Parkplätze
- 15 Hektar
- 40.000 Solarzellen
- 13,4 MW dc Spitzenleistung
- 10,5 MW ac Spitzenleistung
- 15.000 MWh/Jahr Energie
 - Genug für die Versorgung von 4.000 deutschen Haushalten



18% der benötigten elektrischen Campus Spitzenleistung



Jahresproduktion



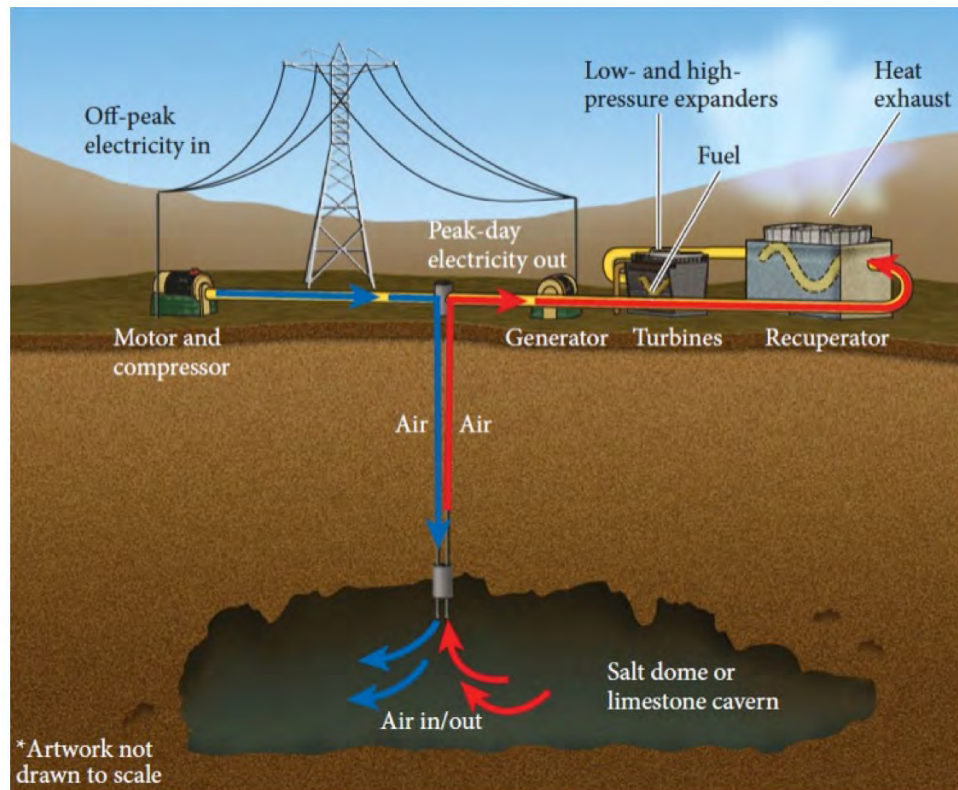


Energiezwischenlagerung



Makroskopische Speicher zum Überbrücken zeitlicher Schwankungen

- Wasserpumpspeicher
- Druckluftspeicher
- Salze mit hoher Schmelzwärme



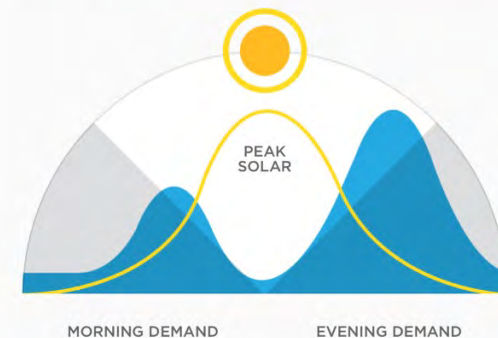
8 MWh Kapazität
www.transheat.de

Energiezwischenlagerung

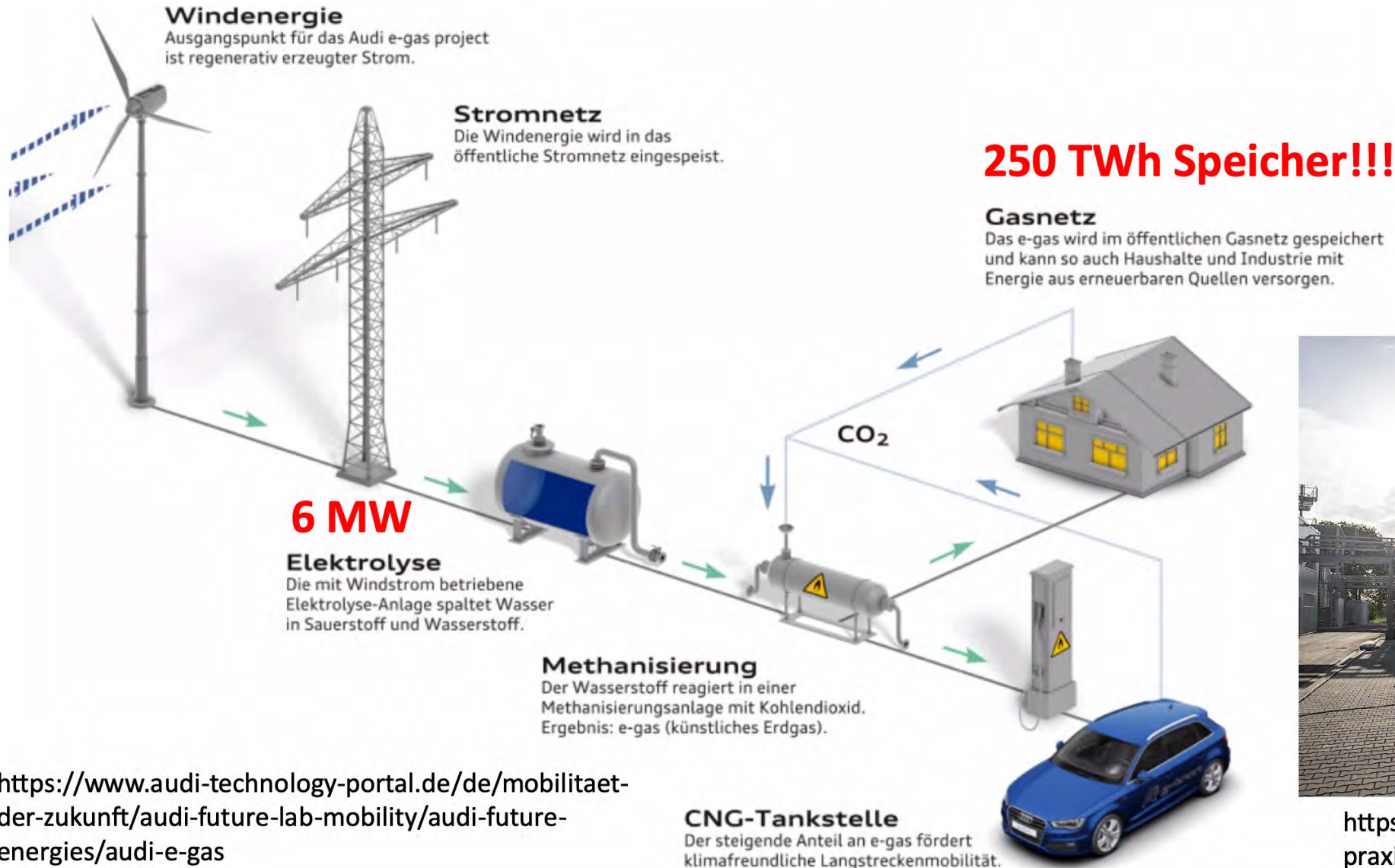
<http://www.teslamotors.com/powerwall>



- Tesla lithium ion Powerwall
 - 10 kWh Batterie
 - \$3.500



Energiezwischenlagerung



250 TWh Speicher!!!



<https://www.energie-wasser-praxis.de/technik/artikel/mit-power-to-gas-klimafreundlich-auto-fahren/>

<https://www.audi-technology-portal.de/de/mobilitaet-der-zukunft/audi-future-lab-mobility/audi-future-energies/audi-e-gas>

Vorschau, übernächster Vortrag:

DI **4. JUNI** ²⁰¹⁹
18 UHR

DIETER ZETSCHKE
DAIMLER AG, STUTTGART
ZUKUNFT DER MOBILITÄT

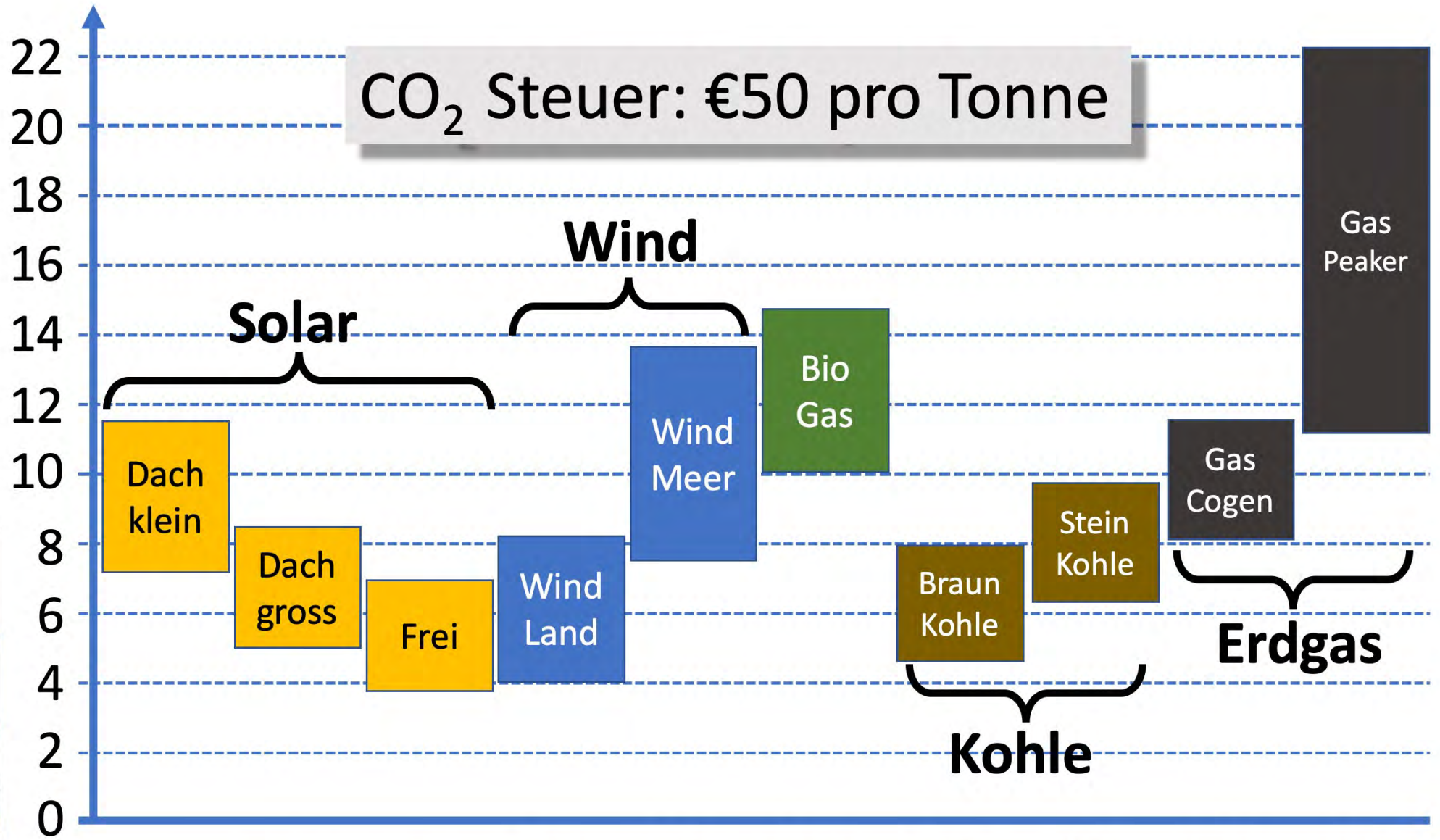
Zur Erinnerung / Zusammenfassung ...

- Die wichtigste Formel des heutigen Abends

$$E = \text{€}$$

LCOE
 €_{cent}/kWh

Daten: (März 2018)



Angenommene Laufzeiten:	1800 – 3200 h/a	3200 – 4500 h/a	5000 – 7000 h/a	6450 – 7450 h/a	5350 – 6350 h/a	3000 – 4000 h/a	500 – 2000 h/a



ZUKUNFT DER ENERGIE

- Mi 24. APRIL^{19H}** **STEFAN RAHMSTORF**
POTSDAM-INSTITUT
FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG
**NACH PARIS:
WIE BEKOMMEN WIR DIE KLIMAKRISE
NOCH IN DEN GRIFF?**
- Mi 8. MAI^{19H}** **WOLFGANG BAUER**
MICHIGAN STATE UNIVERSITY, USA,
UND FRANKFURT INSTITUTE FOR
ADVANCED STUDIES
**ERNEUERBARE ENERGIEN:
WAS IST MÖGLICH,
WAS IST ERSCHWINGLICH?**
- Mi 22. MAI^{19H}** **THOMAS KLINGER**
MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR PLASMAPHYSIK, GREIFSWALD,
UND UNIVERSITÄT GREIFSWALD
**FUSION VON WASSERSTOFF:
ENERGIE DER ZUKUNFT ODER
EWIGER TRAUM?**
- Di 4. JUNI^{19H}** **DIETER ZETSCHKE**
DAIMLER AG, STUTTGART
ZUKUNFT DER MOBILITÄT
- Mi 5. JUNI^{19H}** **MARTIN GREINER**
UNIVERSITÄT AARHUS, DÄNEMARK
**ANPFIH ZUR ZWEITEN HÄLFTE
DER ENERGIEWENDE:
GRUNDLEGENDE GEDANKEN AUS
DEN NATUR- UND
TECHNIKWISSENSCHAFTEN**
- Mi 12. JUNI^{19H}** **ERNST ULRICH V. WEIZSÄCKER**
EMMENDINGEN
**NACHHALTIGE ENERGIE HEISST
WENIGER ENERGIE,
ABER MEHR WOHLSTAND**

DER EINTRITT IST FREI!

VERANSTALTUNGSORT UNI CAMPUS BIEBERG
OTTO-STARCK-ZENTRUM, RUTH-MUFANG-STRASSE 2
60428 FRANKFURT AM MAIN

KONZEPTION UND ORGANISATION
WOLFGANG BAUER, DIRK H. RISCHKE

VERANSTALTER GOETHE-UNIVERSITÄT FRANKFURT