

Energietechnik



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Kapitel B Bedarf und Wachstum

Technische Universität Darmstadt
Institut für Elektrische Energiewandlung

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



B Bedarf und Wachstum



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**



B Bedarf und Wachstum

B1. Math. Beschreibung von Wachstum



1. Math. Beschreibung von Wachstum
2. Bevölkerungswachstum
3. Energiebedarfsentwicklung
4. Globale Erwärmung



B1 Math. Beschreibung von Wachstum

Übersicht



1. Differentialgleichungen und Wachstum
2. Exponentielles Wachstum
3. Logistisches Wachstum



B1 Math. Beschreibung von Wachstum

B1.1 Differentialgleichungen und Wachstum

- **Gewöhnliche** Differentialgleichungen beschreiben die Änderung einer Funktion $x(t)$ in Abhängigkeit einer Variablen t (Zeit)
- Die Änderung dx/dt ist die **Wachstumsrate (Änderungsrate)**

Abnahme	$\frac{d}{dt} x(t) < 0$
Keine Änderung	$\frac{d}{dt} x(t) = 0$
Zunahme	$\frac{d}{dt} x(t) > 0$

- Die Änderungsrate einer beliebigen Funktion $x(t)$ ist i. A. **NICHTLINEAR** abhängig von Zeit t und Funktionswert x

$$\frac{d}{dt} x(t) = f(x(t), t)$$

- **Sonderfall:**
Das System ändert sich **nicht direkt mit der Zeit t** , sondern nur **indirekt** in Abhängigkeit des Funktionswerts $x(t)$:

$$\frac{d}{dt} x(t) = f(x(t))$$

- **Beispiel:**
Exponentielles Wachstum

$$\frac{d}{dt} x(t) = \alpha \cdot x(t)$$

B1 Math. Beschreibung von Wachstum

B1.2 Exponentielles Wachstum



- **Annahme:** Zeitliche Veränderung dx/dt der Population $x(t)$ über konstanten Faktor α proportional zum aktuellen Bestand $x(t)$
Anschaulich: Die Anzahl der „Geburten/Jahr“ ist proportional zur Anzahl der zur Zeit lebenden (zeugungsfähigen) „Menschen“ (z. B. als Paare „Mann“ und „Frau“)
- Lineare gewöhnliche Differentialgleichung 1. Ordnung mit konstantem Koeffizienten α :
Homogene Gleichung, da rechte Seite „Null“!

$$\frac{d}{dt} x(t) = \alpha \cdot x(t) \Rightarrow \frac{dx(t)}{dt} - \alpha \cdot x(t) = 0 \quad \begin{array}{l} x(t) \text{ Population zum Zeitpunkt } t \\ \alpha \text{ Wachstumsrate} \end{array}$$

- **Anfangsbedingung:**
Um die Differentialgleichung für $x(t)$ zu lösen, muss neben der Wachstumsrate α auch der Anfangswert (= die Anfangspopulation $x(0) = x_0$) gegeben sein:

- Lösung: $x(t) = x_0 \cdot e^{\alpha \cdot t}$ $x_0 = x(t = 0)$

Lösungsweg: Ansatz: $x(t) = C \cdot e^{\lambda \cdot t} \Rightarrow \dot{x}(t) - \alpha \cdot x(t) = \lambda \cdot C \cdot e^{\lambda \cdot t} - \alpha \cdot C \cdot e^{\lambda \cdot t} = 0 \Rightarrow \lambda = \alpha$

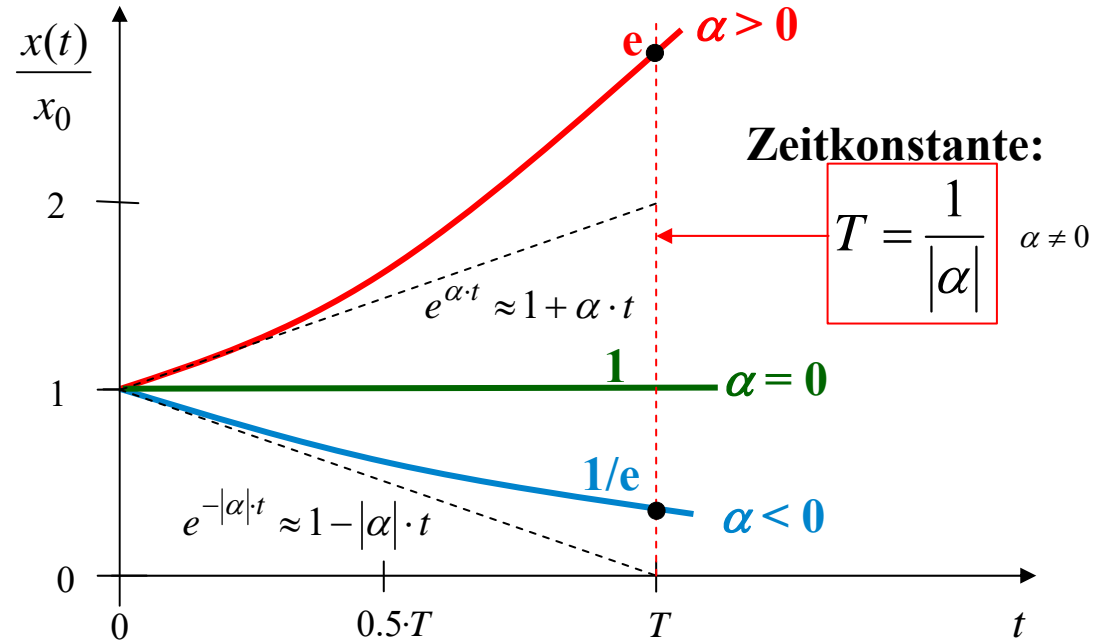
Anfangsbedingung: $x(0) = C \cdot e^{\alpha \cdot 0} = C = x_0 \Rightarrow x(t) = x_0 \cdot e^{\alpha \cdot t}$



B1.2 Exponentielles Wachstum

Exponentielle Abhängigkeit

Abnahme $\alpha < 0$	$\frac{d}{dt} x(t) < 0$
Keine Änderung $\alpha = 0$	$\frac{d}{dt} x(t) = 0$
Zunahme $\alpha > 0$	$\frac{d}{dt} x(t) > 0$



▪ Beispiele:

- Kapitalzuwachs mit Zinseszins
- Nukleare Zerfallsreaktionen („Halbwertszeit“); siehe Kapitel „Grundlagen“
- Schneeballsysteme (Geschäftsmodell), Kettenbriefe, ...

▪ ABER:

- Wachstum ohne Grenzen ist nicht mit endlichen Ressourcen vereinbar:
Exponentielles Modell passt dafür nicht!

B1 Math. Beschreibung von Wachstum

B1.3 Logistisches Wachstum

Logistisches Wachstum:

- Einführung einer **Schranke** $s > 0$, über die das Wachstum nicht hinaus geht

$$\frac{d}{dt} x(t) = \alpha \cdot x(t) \cdot \left(1 - \frac{x(t)}{s}\right) \Rightarrow \dot{x} - \alpha \cdot x + (\alpha / s) \cdot x^2 = 0$$

Nichtlinearität

- **Anschaulich:**

Die Anzahl der „überlebenden Geburten/Jahr“ dx/dt ist proportional

- a) zur Anzahl der zur Zeit lebenden (zeugungsfähigen) „Menschenpaare“ x ,
- b) zur Menge an „Nahrungsmitteln“. Deren (begrenzter) Vorrat $1 - x/s$ ist um so kleiner, je mehr „essende Menschen“ x leben.

- **Nichtlineare** homogene gewöhnliche Differentialgleichung 1. Ordnung mit konstanten Koeffizienten α, s

Lösung:

$$x(t) = \frac{x_0 \cdot s}{x_0 + e^{-\alpha \cdot t} \cdot (s - x_0)}$$

Anfangsbedingung: $x_0 = x(t = 0)$

s „Schranke“ ($s \rightarrow \infty$: Exponentielles Wachstum)

α Proportionalitätskonstante

x_0 Anfangswert der Population

B1.3 Logistisches Wachstum

Herleitung



Lösungsweg für logistisches Wachstum

- Nichtlineare Differentialgleichung ERSTER Ordnung: „Trennung der Veränderlichen x und t “

$$\frac{dx(t)}{dt} = \alpha \cdot x(t) \cdot \left(1 - \frac{x(t)}{s}\right) \Rightarrow \frac{dx}{x \cdot \left(1 - \frac{x}{s}\right)} = \alpha \cdot dt \Rightarrow \int \underbrace{\frac{dx}{x \cdot \left(1 - \frac{x}{s}\right)}}_{\text{nur } x} = \underbrace{\int \alpha \cdot dt}_{\text{nur } t} = \alpha \cdot t + C$$

$$\int \frac{dx}{x \cdot \left(1 - \frac{x}{s}\right)} = \int \frac{dx}{x} + \int \frac{dx/s}{1 - x/s} = \ln x - \ln(1 - x/s) = \ln\left(\frac{x}{1 - x/s}\right) = \alpha \cdot t + C$$

- Anfangsbedingung: $\ln\left(\frac{x_0}{1 - x_0/s}\right) = \alpha \cdot 0 + C = C \Rightarrow e^C = \frac{s \cdot x_0}{s - x_0}$

$$\frac{x}{1 - x/s} = e^{\alpha \cdot t + C} \Rightarrow x \cdot \left(e^{-\alpha \cdot t} + \frac{e^C}{s}\right) = e^C \Rightarrow x = \frac{e^C}{e^{-\alpha \cdot t} + \frac{e^C}{s}} = \frac{x_0 \cdot s}{(s - x_0) \cdot e^{-\alpha \cdot t} + x_0}$$

$$x(t) = \frac{x_0 \cdot s}{x_0 + e^{-\alpha \cdot t} \cdot (s - x_0)}$$



B1.3 Logistisches Wachstum

Logistische Wachstumsfunktion

$$x(t) = \frac{x_0 \cdot s}{x_0 + e^{-\alpha \cdot t} \cdot (s - x_0)}$$

- **Grenzwertbetrachtung:**

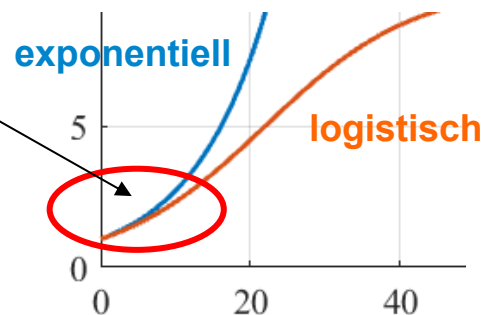
a) Kleine Zeiten: $t \ll 1/|\alpha|$

$$x(t) = \frac{x_0 \cdot s}{x_0 + e^{-\alpha \cdot t} \cdot (s - x_0)} = \frac{x_0 \cdot s \cdot e^{\alpha \cdot t}}{x_0 \cdot e^{\alpha \cdot t} + (s - x_0)} \approx \frac{x_0 \cdot s \cdot e^{\alpha \cdot t}}{x_0 \cdot 1 + (s - x_0)} = x_0 \cdot e^{\alpha \cdot t}$$

Für **kleine Zeiten** $t/T \ll 1$ scheint die logistische Wachstumsfunktion ebenfalls exponentiell zu wachsen!

b) Große Zeiten: $t \gg 1/|\alpha|$

$$x(t \rightarrow \infty) = \frac{x_0 \cdot s}{x_0 + e^{-\infty} \cdot (s - x_0)} = s$$

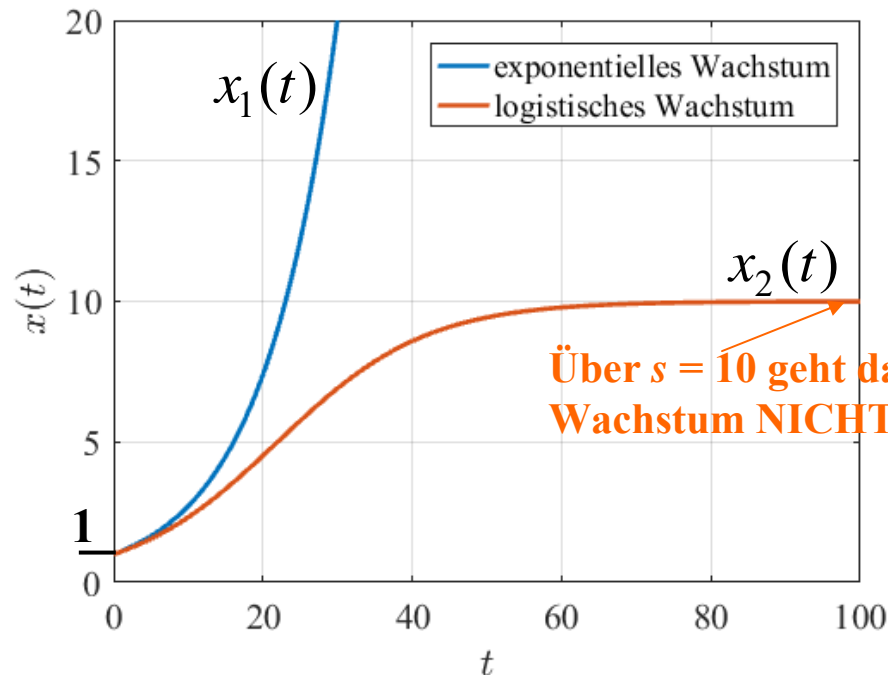


Für **große Zeiten** $t/T \gg 1$ zeigt die logistische Wachstumsfunktion, dass das Wachstum **nicht** über die Schranke s zunimmt!

B1.3 Logistisches Wachstum

Beispiele zum logistischen Wachstum

- **Beispiele:** Beschreibung von
 - Populationen von Lebewesen, die sich jederzeit (= kontinuierlich) vermehren können! („Population“: Fortpflanzungsgemeinschaft in einem abgrenzbaren Gebiet)
 - Quasi-kontinuierliche Ausbreitung von Seuchen
 - Lernprozesse (sind i. A. kontinuierlich), ...



Parameter: $x_0 = 1$, $\alpha = 0.1$, $s = 10$

Exponentielles Wachstum: $x_1(t) = e^{0.1t}$

Logistisches Wachstum: $x_2(t) = \frac{10}{1 + 9 \cdot e^{-0.1t}}$

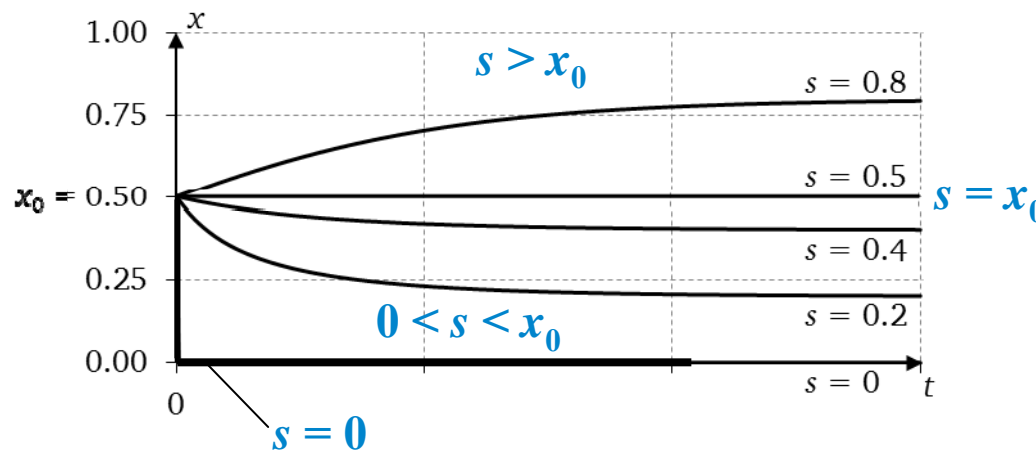
$x_1(t \rightarrow \infty) \rightarrow \infty$ $x_2(t \rightarrow \infty) = s = 10$

B1.3 Logistisches Wachstum

Logistische Wachstumsfunktion - Parametervariation s



Beispiel: $\alpha = 0.015 > 0$, $x_0 = 0.5$:



$$x(t) = \frac{x_0 \cdot s}{x_0 + e^{-\alpha \cdot t} \cdot (s - x_0)}$$

$$\frac{d}{dt} x(t) = \alpha \cdot x(t) \cdot \left(1 - \frac{x(t)}{s}\right)$$

a) $s = 0$: Wachstumsrate bei $t = 0$ negativ unendlich groß
 \Rightarrow Population sinkt sofort auf Null, bleibt dann Null!

$$\lim_{s \rightarrow 0} x(t) = \frac{x_0 \cdot 0}{x_0 + e^{-\alpha \cdot t} \cdot (0 - x_0)} = 0, \quad t > 0$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} x(t = 0) = \frac{x_0 \cdot s}{x_0 + (s - x_0)} = x_0 \cdot \frac{s}{s} = x_0, \quad t = 0$$

b) $s = x_0$: Wachstumsrate = 0;
 \Rightarrow Population konstant!

$$\frac{d}{dt} x(0) = \alpha \cdot x(0) \cdot \underbrace{\left(1 - \frac{x(0)}{x(0)}\right)}_0 = 0$$

$$x(t) = x_0 \quad t \geq 0$$



B Bedarf und Wachstum

B1. Math. Beschreibung von Wachstum



Zusammenfassung

- **Kontinuierliche** und **diskrete** Wachstumsmodelle, je nach Anwendungsfall:
 - a) Vermehrung der Menschen ist quasi-kontinuierlich
 - b) Vermehrung in der Tier- und Pflanzenwelt häufig im Jahresrhythmus (diskontinuierlich)
- Wachstum auf Grund **begrenzter Ressourcen** nicht exponentiell unbeschränkt, sondern selbst beim einfachsten „logistischen“ Modell **beschränkt**
- **Realer Wachstumsverlauf** wesentlich **komplizierter** auf Grund vieler Einflussparameter
- Selbst beim einfachen nichtlinearen Wachstumsmodellen (z. B. VERHULST-Modell) treten ab einem kritischen Wert bestimmter Wachstumsparameter **„chaotische“ Eigenschaften** (= „unvorhersehbare“, besser: **unerwartete Eigenschaften**) des Wachstums auf Grund der **großen Nichtlinearität** auf
- **Periodische Schwankungen** der Populationen auf Grund großer Rückwirkungen der Population auf die Ressourcen möglich



B Bedarf und Wachstum

B2. Bevölkerungswachstum



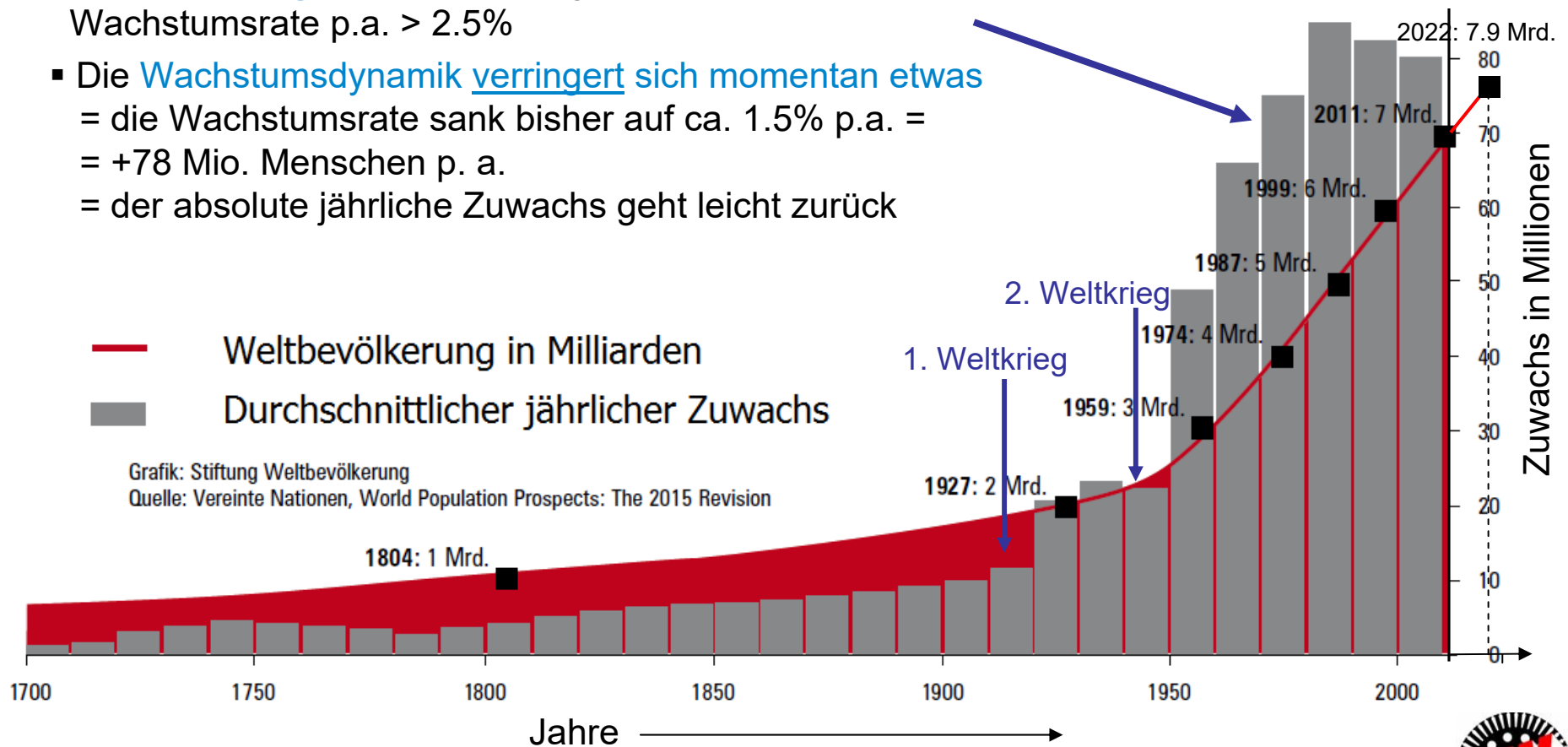
1. Math. Beschreibung von Wachstum
2. Bevölkerungswachstum
3. Energiebedarfsentwicklung
4. Globale Erwärmung



B2 Bevölkerungswachstum

Entwicklung von 1700 bis 2022

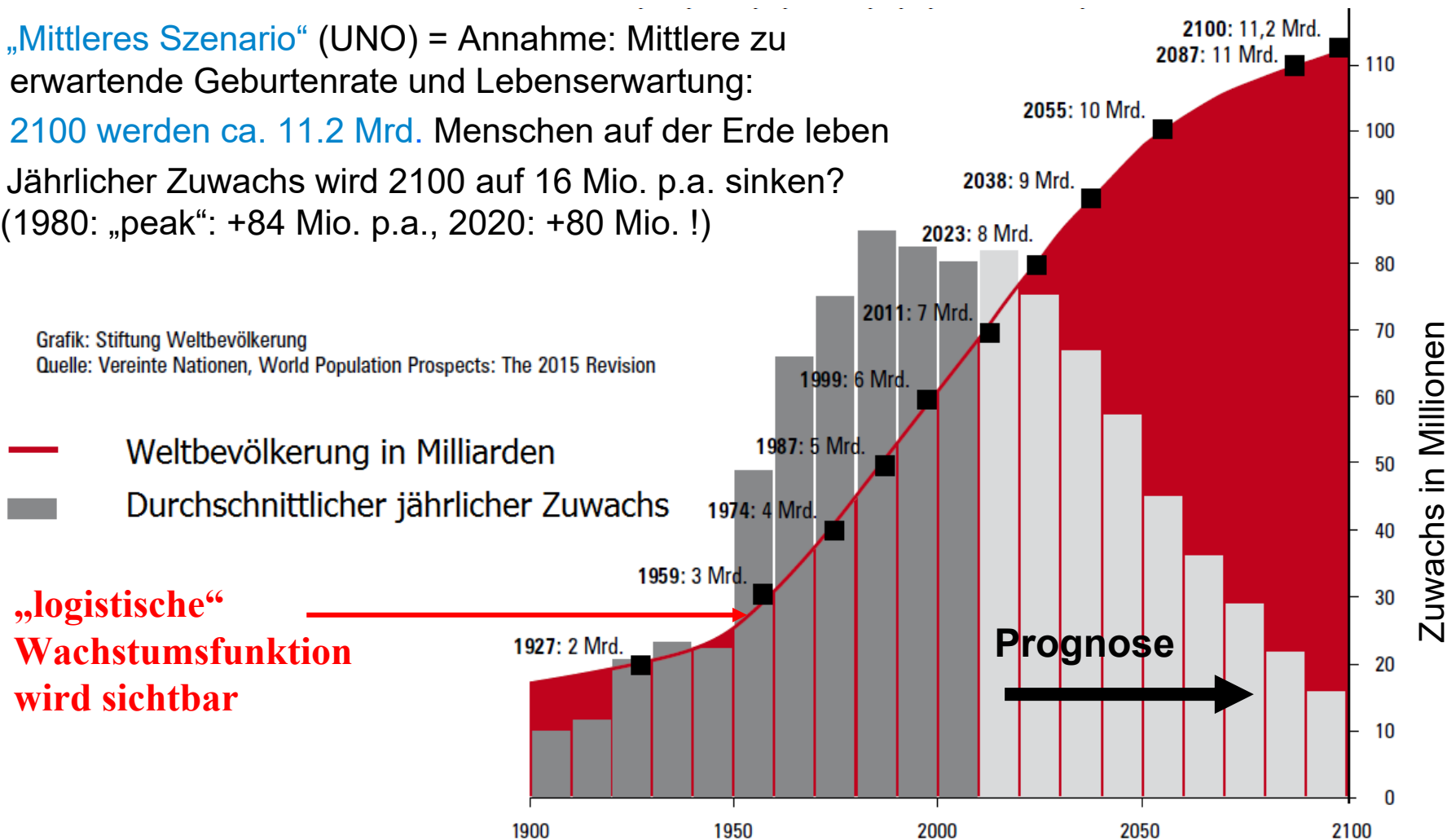
- Im Mai 2022 leben über 7.9 Mrd. Menschen auf der Erde
- „Bevölkerungsexplosion“ begann Mitte des 20. Jahrhunderts:
Wachstumsrate p.a. > 2.5%
- Die Wachstumsdynamik verringert sich momentan etwas
= die Wachstumsrate sank bisher auf ca. 1.5% p.a. =
= +78 Mio. Menschen p. a.
= der absolute jährliche Zuwachs geht leicht zurück



B2 Bevölkerungswachstum

Bevölkerungsexplosion von 1950 bis 2000

- „Mittleres Szenario“ (UNO) = Annahme: Mittlere zu erwartende Geburtenrate und Lebenserwartung:
2100 werden ca. 11.2 Mrd. Menschen auf der Erde leben
- Jährlicher Zuwachs wird 2100 auf 16 Mio. p.a. sinken?
(1980: „peak“: +84 Mio. p.a., 2020: +80 Mio. !)



B2 Bevölkerungswachstum

Gründe für Bevölkerungsexplosion ab 1950



- **Begriffe:**

Fertilitätsrate: Gibt an, wie viele Kinder eine Frau durchschnittlich im Laufe des Lebens hätte

Geburtenrate: Gibt an die Anzahl der Lebendgeborenen pro Jahr, bezogen auf 1000 Einwohner

- **Gründe für Bevölkerungsexplosion ab 1950:**

a) „**Grüne Revolution**“:

In den 1960er Jahren werden moderne landwirtschaftliche Hochertragsorten in Entwicklungsländern verbreitet \Rightarrow Mehr Nahrungsmittel \Rightarrow Höhere Überlebenschance

b) Im 20. Jh.: Dank besserer **medizinischer Versorgung**

- steigt weltweit die **Lebenserwartung**,
- sinkt die **Kindersterblichkeit**.

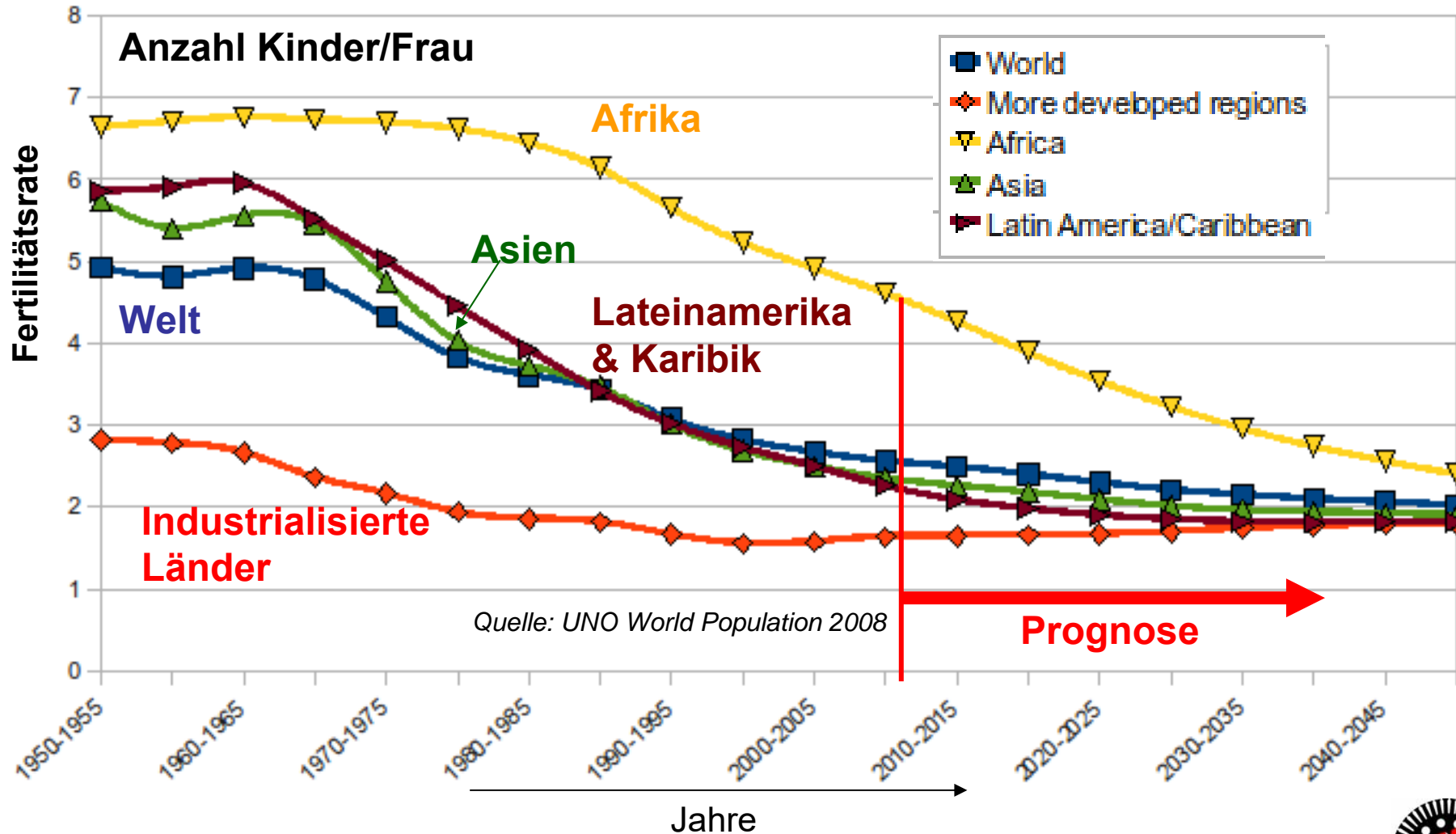
c) Keine Änderung der Fortpflanzungs-Gewohnheiten in Afrika und weiten Teilen Asiens (Ausnahme VR China: „Ein-Kind-Politik“ bis 2015, jetzt: „Zwei-Kind-Politik“)

- Die Anzahl der durchschnittlich geborenen Kinder pro Frau (**Fertilitätsrate**) geht in den industrialisierten Ländern auf **ca. 1 Kind/Frau** zurück.
- In weniger industrialisierten Ländern ist die **Fertilitätsrate deutlich höher: 2 ... 7 Kinder/Frau**



B2 Bevölkerungswachstum

Fertilitätsrate ab 1950 nach Regionen



B Bedarf und Wachstum

B2. Bevölkerungswachstum



Zusammenfassung

- **Weltbevölkerung:**
Anzahl der Menschen, die auf der Erde leben bzw. zu einem bestimmten Zeitpunkt gelebt haben (oder leben werden).
- **Demografie und Bevölkerungsgeografie:**
Untersuchung des Stands, der historischen Entwicklung, der räumlichen Verteilung, der Dynamik der Weltbevölkerung; Prognosenerstellung
- Weltbevölkerung: Mai **2021** ca. **7.8 Milliarden Menschen**
- 2015 ... 2020: Bevölkerungswachstum ca. 80 Mio. Menschen pro Jahr.
- **Prognose: 2050: ca. 9.7 Milliarden Menschen**
2100: ca. 11.2 Milliarden Menschen
- **(Mögliche) Auswirkungen:**
Globale Wanderbewegungen, Verstädterung & Vermassung, „Internationalisierung“, Verknappung der Ressourcen, weltweite Konflikte, ...



B Bedarf und Wachstum

B3. Energiebedarfsentwicklung



1. Math. Beschreibung von Wachstum
2. Bevölkerungswachstum
3. Energiebedarfsentwicklung
4. Globale Erwärmung



B3 Energiebedarfsentwicklung

Vorbemerkungen

- Energiebedarfsentwicklung maßgeblich abhängig von:
 - Bevölkerungsentwicklung,
 - Wirtschaftswachstum,
 - Klimaschutzzielen:
6°C, 4°C oder 2°C Erderwärmung, bezogen auf vorindustrielle Zeit,
 - Wandel im Verbraucherverhalten: „Nachhaltiger“ Umgang mit Ressourcen.
 - Bedarfsentwicklung nur im Kontext von **Gesamtszenarien** möglich
 - Hier:
Beschränkung auf „**Business-As-Usual Scenario**“ des BP „**Energy Outlook 2022**“
 - a) Festlegung des Zukunftshorizonts auf **2050** *)
 - b) Vergleich mit **Gegenwart**
- *) Zunehmende Unsicherheiten lassen keine aussagekräftigen längerfristigen Prognosen zu!

B3 Energiebedarfsentwicklung

Bruttoinlandsprodukt



- **Bruttoinlandsprodukt (BIP)** gibt den Gesamtwert aller Güter (= Waren und Dienstleistungen) an, die innerhalb eines Jahres innerhalb der Landesgrenzen einer Volkswirtschaft als Endprodukte hergestellt wurden, nach Abzug aller Vorleistungen.
- Das BIP ist ein **Maß für die wirtschaftliche Leistung einer Volkswirtschaft** in dem bestimmten Zeitraum „1 Jahr“
- Die **Veränderungsrate des realen BIP**
 - dient als **Messgröße für das Wirtschaftswachstum** der Volkswirtschaften,
 - ist die **wichtigste Größe** der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung



B3 Energiebedarfsentwicklung

OECD



- **Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung:**
(OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development, seit 1961)
Internationale Organisation aus z. Zt. 35 Mitgliedstaaten aus fast allen Regionen der Erde, die sich
 - a) der Demokratie und b) freier Marktwirtschaft verpflichtet fühlen sollten.
- Die meisten OECD-Mitglieder sind Ländern mit hohem Pro-Kopf-Einkommen auf Grund hoher wirtschaftlicher Entwicklung
- Alle Mitgliedsstaaten zusammen umfassen
 - a) ein Gebiet von 36.2 Mio. km² (24% der weltweit bewohnbaren Fläche) und
 - b) 1.3 Mrd. Menschen (17% der Weltbevölkerung).

Mitglieder (2022):

Australien, Belgien, Chile, Dänemark, [Deutschland](#), Estland, Finnland, [Frankreich](#), Griechenland, Irland, Island, Israel, Italien, [Japan](#), Kanada, Lettland, Luxemburg, Mexiko, Neuseeland, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, [Südkorea](#), Tschechien, Türkei, Ungarn, [USA](#), [UK](#)



B3 Energiebedarfsentwicklung

Wachstumstrend, Weltbevölkerung, Wirtschaft



- Weltbevölkerung und Welteinkommen steigen weiter
- Prognose: 2050:
 - 1) 9.6 Mrd. Menschen (+24%) leben auf der Erde
 - 2) Wachstum des Welt-BIP bis 2050 um den Faktor 2.3:
 - a) 21% der Zunahme durch das Bevölkerungswachstum
 - b) 79% der Zunahme durch Steigerung der Produktivität
- China und Indien sind dabei die wichtigsten Treiber der Weltwirtschaft
- Sie erwirtschaften 50% des zu erwartenden BIP-Wachstums bis 2050
- In Afrika steigt die Bevölkerung weiterhin stark an, aber das BIP steigt nur unterproportional

Quelle: BP Energy Outlook



B3 Energiebedarfsentwicklung

Primärenergieverbrauch nach Regionen



- Prognose: 2022 ... 2050:
 - Ca. 25% Steigerung des Primärenergieverbrauchs
 - Davon ca. 2/3 durch *China, Indien, Fernost-Asien*
 - 75% der Steigerung durch Industrie & Gebäudenutzung
- Entwicklungs- und Schwellenländer sind die **Treiber dieser Steigerung**: „Energiehunger“
 - a) als Nachholbedarf,
 - b) durch große Bevölkerungszunahme
- Die **Steigerungsraten beim Primärenergieverbrauch** werden weltweit **sinken** von ca. 2.2% p.a. (bis ca. 2020) auf 0.85% p.a. (bis ca. 2050)
- Der dominierende Einfluss von *China* auf die Wachstumsrate des Primärenergieverbrauchs geht **graduell zurück**.

Quelle: BP Energy Outlook



B Bedarf und Wachstum

B3. Energiebedarfsentwicklung



Zusammenfassung (1)

- Energieprognose z. B. von *BP* (*British Petrol*, „*Energy Outlook*“, jedes Jahr aktualisiert):
- Ein „mittleres“ Szenario wird angenommen, das klarerweise unvorhergesehene Ereignisse (z. B. Pandemie) nicht berücksichtigen kann!
- a) Das Welt-BIP erhöht sich voraussichtlich in 30 Jahren um den Faktor 2.3 durch die schnell wachsenden Wirtschaftsräume in *China*, *Indien* und *Fernost*
- b) Dadurch steigt der Energiebedarf, aber nicht um den Faktor 2.3, sondern wegen steigender Effizienz voraussichtlich nur um ca. 25%
- c) Erdöl, Erdgas und Kohle bleiben voraussichtlich die dominanten Energiequellen
- d) 2050 werden allerdings regenerative Energien, große Wasserkraftwerke und Kernkraft (Fission) ca. 23% des gestiegenen Bedarfs CO₂-neutral abdecken
- e) Erdgasnutzung wächst voraussichtlich prozentual stärker als Erdölnutzung (auch wegen der US-Schiefergasförderung)



B Bedarf und Wachstum

B3. Energiebedarfsentwicklung



Zusammenfassung (2)

- *China* bleibt der am stärksten wachsende Markt für Energie
- **Regenerative Energienutzung** wird sich innerhalb 20 Jahren weltweit voraussichtlich **vervierfachen**
- Etwa 50% (nach anderen Quellen 65%) des Zuwachses an Primärenergienutzung wird voraussichtlich für die wachsende Nutzung **elektrischer Energie** verwendet
- CO₂-Emissionen nehmen **LEIDER** weiter zu, aber voraussichtlich **nur mit einem Drittel** der bisherigen Wachstumsrate, so dass die bestehenden Klimaziele **vermutlich nicht erreicht** werden



B Bedarf und Wachstum

B4. Klimaerwärmung



1. Math. Beschreibung von Wachstum
2. Bevölkerungswachstum
3. Energiebedarfsentwicklung
4. Globale Erwärmung



B4 Klimaerwärmung

Treibhauspotential GWP



- **Treibhauspotential** (Global warming potential GWP)
= CO₂-Äquivalent CO_{2e} einer chemischen Verbindung:
Gibt als Maßzahl an, wie viel eine festgelegte Masse (z. B. 1 kg) eines Treibhausgases (z. B. Methan CH₄) zur globalen Erwärmung beiträgt.
- Bezugswert ist das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid: CO_{2e} (equivalent)
- **Beispiel:** Wirkung von 1 kg Methangas in der Atmosphäre für 100 Jahre:
CO₂-Äquivalent GWP = 28:
Ein Kilogramm Methan trägt innerhalb der ersten 100 Jahre nach der Freisetzung 28-mal so stark zum Treibhauseffekt bei wie ein Kilogramm CO₂.
- **IPCC** („Weltklimarat“): **Inter-governmental Panel on Climate Change** =
Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen der Vereinten Nationen
- IPCC gibt GWP-Werte für „Zeithorizont“ 20, 100 und 500 Jahren an.
- Langer Zeithorizont bevorzugt für die Eindämmung der langfristigen Folgen der globalen Erwärmung



B4 Klimaerwärmung

CO₂ je kWh (thermisch) im Vergleich

- CO₂- Bildung je kWh thermisch:

CO₂: Molmasse: $\text{CO}_2 = {}^{12}\text{C} + 2 \cdot {}^{16}\text{O} \rightarrow (12 + 2 \cdot 16) \cdot m_u \cdot L' = 0.044 \text{ kg/mol}$

CO₂-Masse je 1 kWh:

a) C-Verbrennung: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 - 394 \text{ kJ/mol} \rightarrow \frac{1 \text{ kWh}}{394 \text{ kJ/mol}} \cdot 0.044 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 0.402 \text{ kg}$

b) Rohöl-Verbrennung: $2\text{C}_n\text{H}_{2n+2} + (3n+1) \cdot \text{O}_2 \rightarrow 2 \cdot (n+1) \cdot \text{H}_2\text{O} + 2n \cdot \text{CO}_2 - 2n \cdot 650 \text{ kJ/mol}$

$$\rightarrow \frac{1 \text{ kWh}}{650 \text{ kJ/mol}} \cdot 0.044 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 0.244 \text{ kg}$$

c) Naturgas-Verbrennung: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 - 802 \text{ kJ/mol} \rightarrow$

$$\rightarrow \frac{1 \text{ kWh}}{802 \text{ kJ/mol}} \cdot 0.044 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 0.197 \text{ kg}$$

$$(1 m_u = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, L' = 6.022 \cdot 10^{23} / \text{mol})$$

B4 Klimaerwärmung

CO₂ je kWh (elektrisch) im Vergleich



CO₂- Bildung je kWh im Vergleich:

a) thermisch

b) elektrisch

Lt. UNFCCC, FCCC/SBSTA, 1998:

Kraftwerkswirkungsgrad

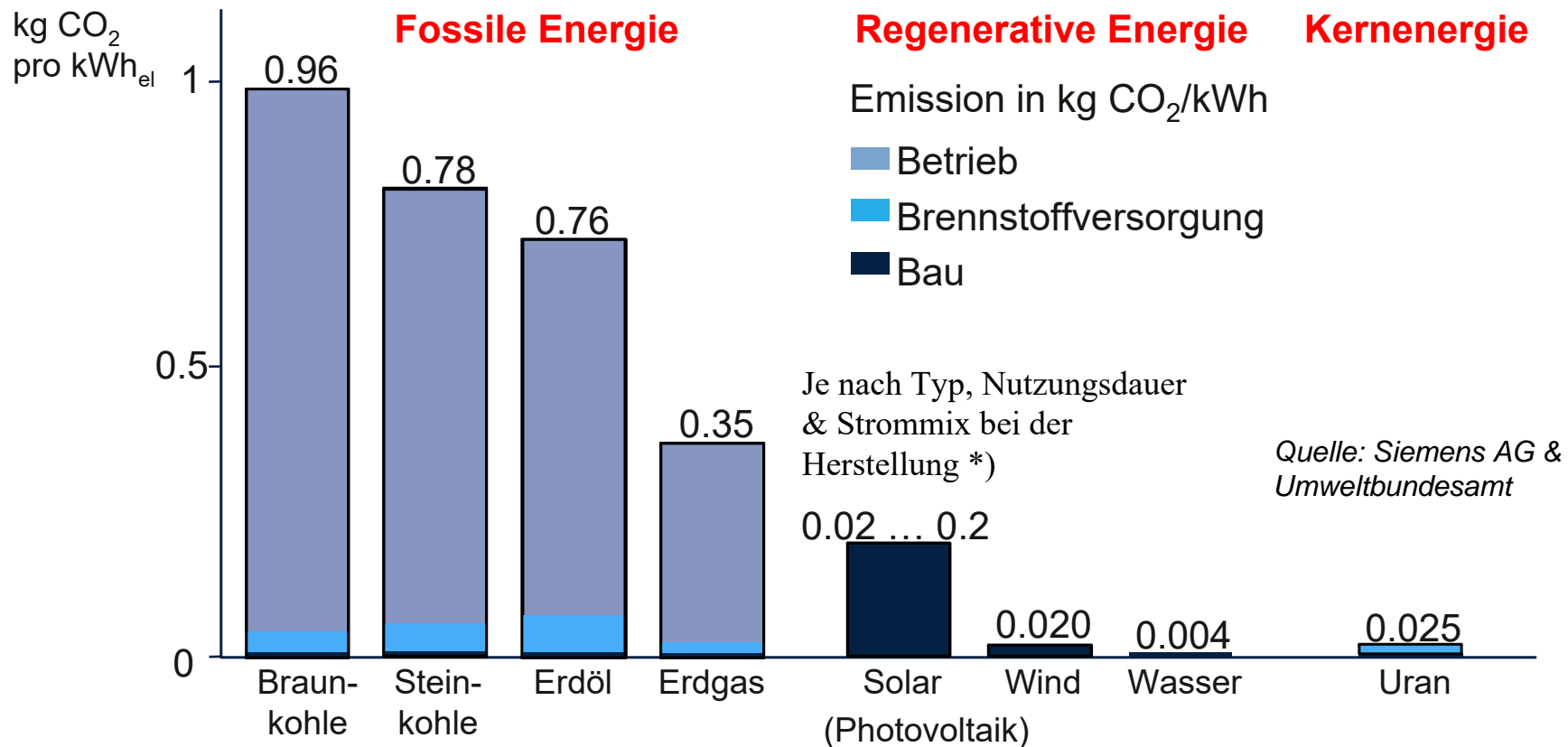
- Braunkohle	0.36 kg/kWh _{th}	43%	0.84 kg/kWh _{el}
- Steinkohle	0.34 kg/kWh _{th}	46%	0.74 kg/kWh _{el}
- Rohöl	0.26 kg/kWh _{th}	45%	0.58 kg/kWh _{el}
- Naturgas	0.20 kg/kWh _{th}	60% (GuD)	0.33 kg/kWh _{el}



B4 Klimaerwärmung

CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung

- CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung in verschiedenen Kraftwerkstypen



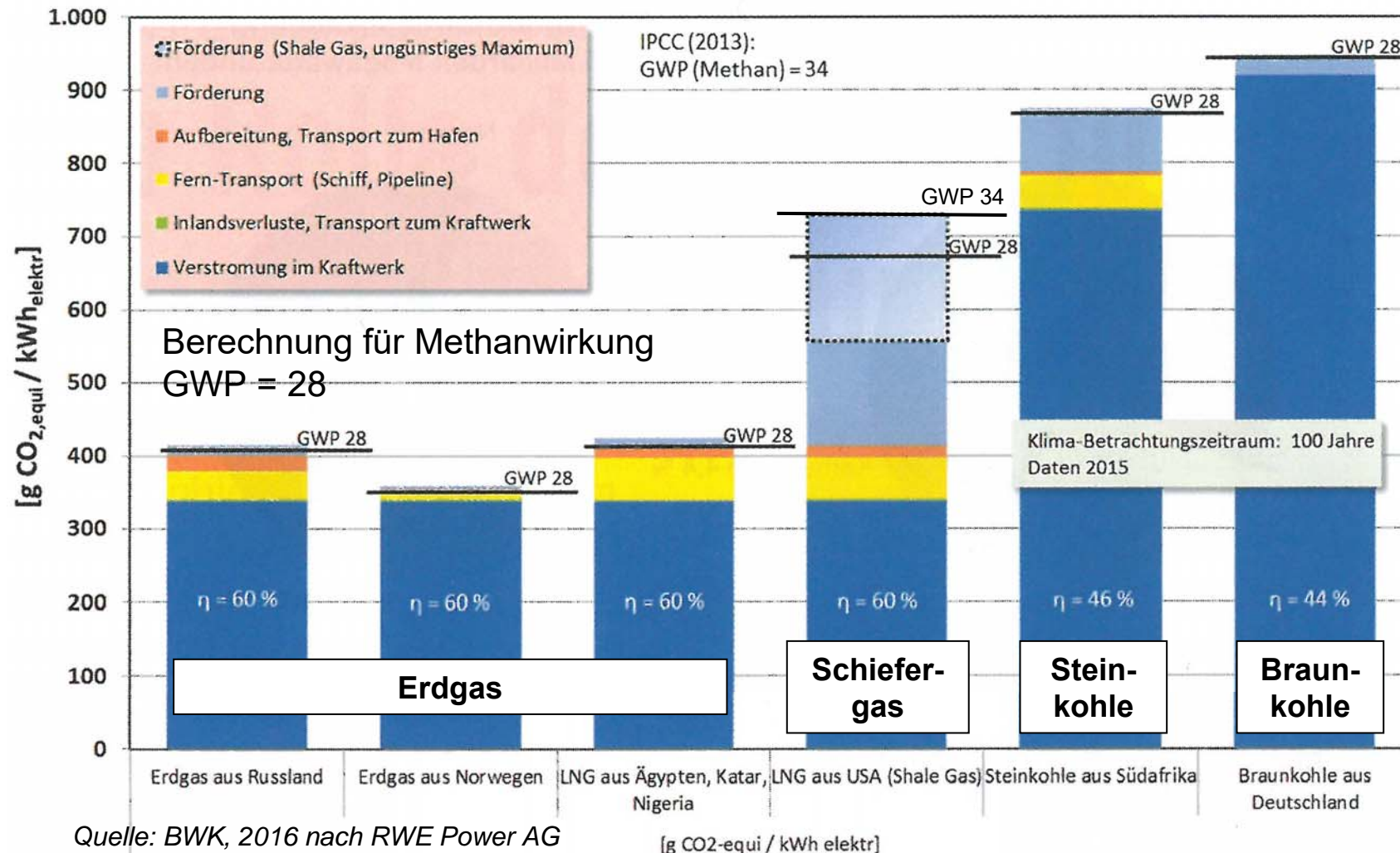
*) Monokristallines Si-Modul, 30 Jahre Nutzungsdauer, deutscher Strommix: 50 g CO₂/kWh_{el}

B4 Klimaerwärmung

CO₂-äquivalente Treibhausgasemission (CO_{2e} in Gramm) je produzierte kWh el. Energie



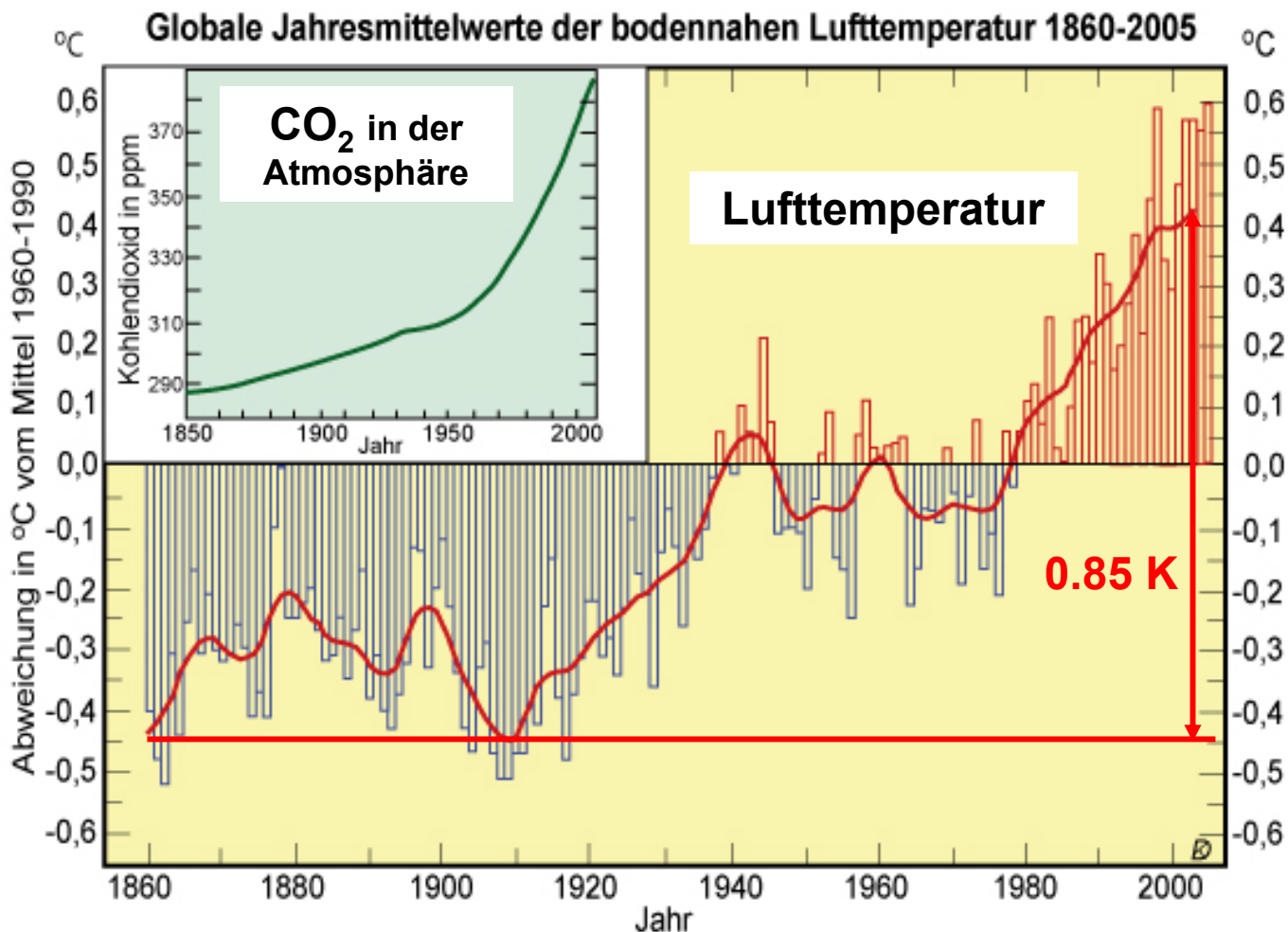
CO_{2e} bzw. CO_{2,eq}



B4 Klimaerwärmung

Lufttemperatur-Anstieg

- Weltweiter Lufttemperatur- und CO₂-Anstieg seit Beginn der industriellen Revolution



a)
Korrelation zum
CO₂-Anstieg in der
Atmosphäre legt
„Glashauseffekt“ als
Ursache nahe

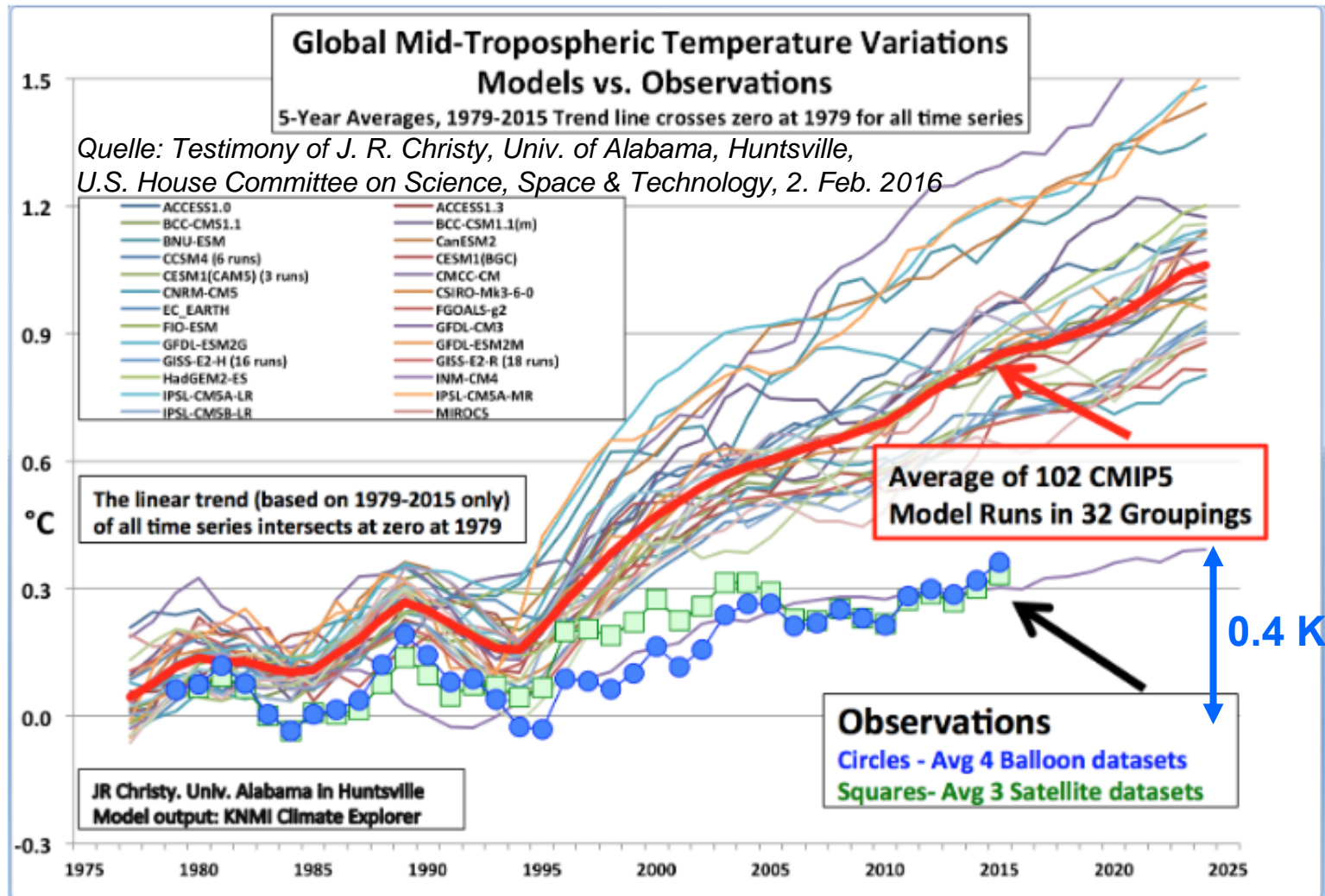
b)
ca. 1.1 °C Zunahme
seit 1860 ... 2021

1 ppm =
= 1 parts per million =
= 1/1 000 000

Quelle: Hamburger
Bildungsserver [online]

B4 Klimaerwärmung

Lufttemperatur-Anstieg: Modelle vs. Messung



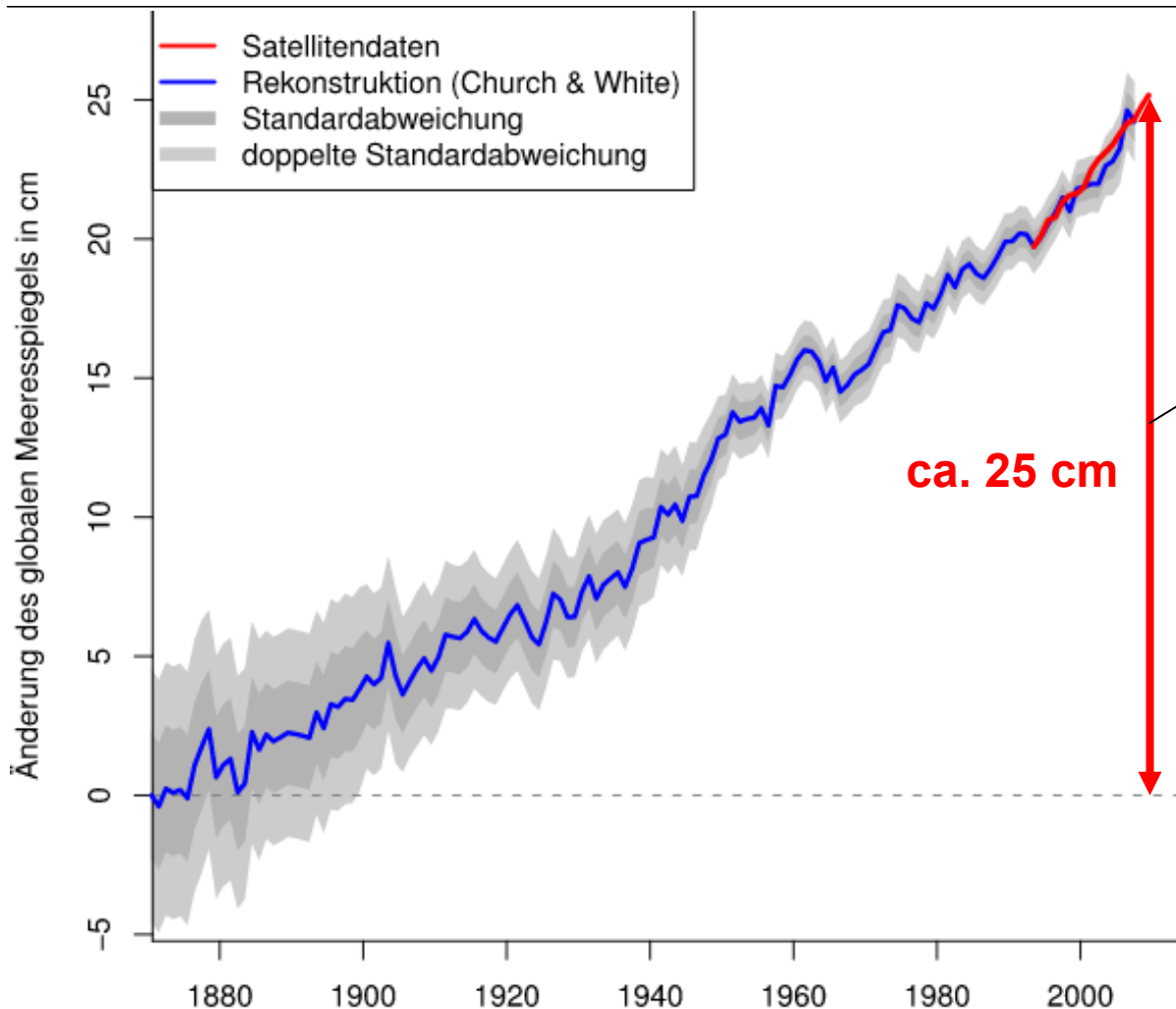
B4 Klimaerwärmung

Auswirkungen der Klimaveränderung

- **Weltweiter Temperaturanstieg** seit 1860 ... 2021: 1.1 K lt. IPCC
- **Natürliche** Klimaveränderung vom **anthropogenen Einfluss** überlagert:
 - a) Anreicherung der Atmosphäre mit **Treibhausgasen** (z.B. CO_2),
 - b) Entwaldung = weniger CO_2 -Abbau durch Photosynthese,
 - c) Intensive Land- und Viehwirtschaft = zusätzliche Treibhausgase (vorwiegend **Methan** = 28-faches Treibhauspotenzial von CO_2 !)
- **„Glashauseffekt“** der Atmosphäre: Erhöhung des Rückhaltevermögens für infrarote Wärmestrahlung in der Troposphäre durch Wasserdampf, CO_2 , Methan, (SF_6), ...
- **Folgen:**
 - **Lufttemperaturanstieg** und **Meeresspiegelerhöhung** führen zu klimatischen Ungleichgewichten → Naturkatastrophen (Wirbelstürme, Überflutungen, ...)
 - **Meereserwärmung:** Veränderung der Meeresfauna und –flora
 - **Verschlechterung** der Luft- und Wasserqualität führt zu gesundheitlichen Belastungen

B4 Klimaerwärmung

Globale Meeresspiegelerhöhung



Anstieg des weltweiten Meeresspiegels um ca. 25 cm seit 1880

Globale Meeresspiegel-erhöhung durch

- Ausdehnung des erwärmten Wassers
- Abschmelzen von Gletschereis

Quelle: de.wikipedia [online]

B4 Klimaerwärmung

Emissionshandel



EU-Emissionshandel (European Union Emissions Trading System, EU ETS):

- **EU ab 2005:** Begrenzte Zahl an Emissionsrechten, wird auf einem Markt gehandelt
- Umfasst und begrenzt CO₂-Ausstoß von ca. 11 000 Anlagen in 28 *EU-Staaten*, *Liechtenstein*, *Island*, *Norwegen* bei **Stromerzeugung u. einigen Industriebereichen** (umfasst ca. 45% der EU-Klimagasemissionen).
- Anlagenbetreiber muss für jede Tonne CO₂ **ein gültiges Zertifikat** vorlegen
- **Begrenzte Menge neuer Zertifikaten** pro Jahr (weniger als die tatsächlichen Emissionen):
Anteil A erhalten Anlagenbetreibern kostenlos: ca. 60%,
Anteil B wird versteigert: ca. 40%.
- Mehrjährige Handelsperioden: I: 2005 ... 2007, II: 2008 ... 2012, III: 2013 ... 2020
- Versteigerungspreis schwankt: 2019: 19 ... 28 Euro/Tonne CO_{2e} (äquivalent).



B4 Klimaerwärmung

Brennstoff-Emissionshandel (D)



In *Deutschland*: Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG):

- Brennstoffe für Verkehr u. Gebäude:
Nationaler Zertifikathandel ab 2021 eingeführt: Bis 2025 mit Festpreisen.
- Dem nationalen Brennstoffemissionshandel unterliegen alle In-Verkehr-Bringer von Brennstoffen (Benzin, Diesel, Heizöl, Flüssig- und Erdgas), soweit die jeweiligen Emissionen nicht bereits vom EU-Emissionshandel erfasst sind.
- Festpreis: 2021 ... 2025: 25 ... 55 Euro/Tonne CO_{2e}
- Ab 2026: Versteigerung der Zertifikate regelt Preis
- Ab 2023: Auch Festbrennstoffe einbezogen!



B Bedarf und Wachstum

B4. Klimaerwärmung

Zusammenfassung

- Energiebedarf ist bedingt, um **menschliche Grundbedürfnisse** zu erfüllen:
vor allem: Bereitstellung von **Trinkwasser, Nahrungsmittel**, Wärme, Kraft
- Ebenso wie die **Begrenzung** bestimmter **Energievorräte** ist die eng damit verbundene Begrenzung der **Nahrungsmittel** und des **Trinkwassers** von fundamentaler Relevanz für die Menschheitsfamilie
- Bedingt durch
 - a) die steigende Zahl der Weltbevölkerung und
 - b) unseren steigenden Komfortansprucherfolgt weiterhin die **intensive Nutzung fossiler Energieträger**
(für Wärme, Verkehr, el. Strom, ...)
- Diese Nutzung, aber auch andere Faktoren (z. B. Entwaldung, Massentierhaltung) setzen große Mengen **Treibhausgase** frei, was infolge **globaler Erwärmung** (Luft- und Meereserwärmung) zur **Klimaveränderung** beiträgt.
- Die intensive Nutzung der endlichen Rohstoffvorkommen (z. B. Metalle) zeigt die dringende **Erfordernis** der Nutzung von **Recycling-Verfahren**.