

## B Bedarf und Wachstum

### B1 Mathematische Beschreibung von Wachstum

#### B1.1 Differentialgleichungen und Wachstum

Gewöhnliche Differentialgleichungen beschreiben die Änderung einer Funktion  $x(t)$  in Abhängigkeit einer Variablen  $t$  (hier die Zeit). Die Änderung  $dx/dt$  (B1.1-1) ist dabei die **Wachstumsrate (Änderungsrate)**:

a)  $\frac{d}{dt} x(t) < 0$ : Abnahme, b)  $\frac{d}{dt} x(t) = 0$ : keine Änderung, c)  $\frac{d}{dt} x(t) > 0$ : Zunahme.

Die Änderungsrate einer beliebigen Funktion  $x(t)$  ist i. A. NICHTLINEAR abhängig von der Zeit  $t$  und dem Funktionswert  $x$ , beschrieben durch die (beliebige) Funktion  $f(\cdot, \cdot)$ .

$$\frac{d}{dt} x(t) = f(x(t), t) \quad (\text{B1.1-1})$$

Es ist bereits ein (häufiger) Sonderfall, wenn das System sich nicht direkt mit der Zeit  $t$  ändert, sondern nur indirekt in Abhängigkeit des Funktionswerts  $x(t)$  gemäß (B1.1-2).

$$\frac{d}{dt} x(t) = f(x(t)) \quad (\text{B1.1-2})$$

Beispiel B1.1-1: Exponentielles Wachstum: Die Funktion  $f(x(t)) = \alpha \cdot x(t)$  ist linear.

$$\frac{d}{dt} x(t) = \alpha \cdot x(t) \quad (\text{B1.1-3})$$

#### B1.2 Exponentielles Wachstum

Das exponentielle Wachstum beruht auf der Annahme (Bsp. B1.1-1), dass die zeitliche Veränderung  $dx/dt$  der betrachteten Größe (Population)  $x(t)$  über einen konstanten Faktor  $\alpha$  proportional zum aktuellen Bestand  $x(t)$  ist. Dabei meint „Population“ eine Fortpflanzungsgemeinschaft in einem abgrenzbaren Gebiet.

Beispiel B1.2-1:

Die Anzahl der Geburten/Jahr in einem bestimmten Gebiet ist proportional zur Anzahl der zu dieser Zeit dort lebenden zeugungsfähigen Menschen (z. B. als Paare „Mann“ und „Frau“).

(B1.1-3) ist eine lineare gewöhnliche Differentialgleichung 1. Ordnung mit konstantem Koeffizienten  $\alpha$ , welche homogen ist, da die rechte Seite „Null“ ist (B1.2-1)!

$$\frac{d}{dt} x(t) = \alpha \cdot x(t) \Rightarrow \frac{dx(t)}{dt} - \alpha \cdot x(t) = 0 \quad (\text{B1.2-1})$$

In (B1.2-1) ist  $x(t)$  die Population zum Zeitpunkt  $t$  und  $\alpha$  die Wachstumsrate. Ohne Anfangsbedingung ist die Differentialgleichung unvollständig formuliert, denn um die Differentialgleichung für  $x(t)$  lösen zu können, muss neben der Wachstumsrate  $\alpha$  auch der Anfangswert (= die Anfangspopulation  $x(0) = x_0$ ) gegeben sein:  $x_0 = x(t=0)$ . Lineare gewöhnliche homogene Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten werden durch die Exponentialfunktion gelöst, wobei die Ordnung der Differentialgleichung (= höchste Ableitung) die Anzahl voneinander unabhängiger Exponentialfunktionen bestimmt, welche linear überlagert die Lösungsfunktion ergeben (Details zur Lösungsmethodik: siehe [Dir], [Dir]). Bei dieser Differentialgleichung 1. Ordnung ist nur eine Exponentialfunktion Lösungsfunktion, wobei deren Parameter  $C$  und  $\lambda$  noch bestimmt werden müssen (B1.2-2).

$$x(t) = C \cdot e^{\lambda \cdot t} \Rightarrow \dot{x}(t) - \alpha \cdot x(t) = \lambda \cdot C \cdot e^{\lambda \cdot t} - \alpha \cdot C \cdot e^{\lambda \cdot t} = 0 \Rightarrow \lambda = \alpha \quad (\text{B1.2-2})$$

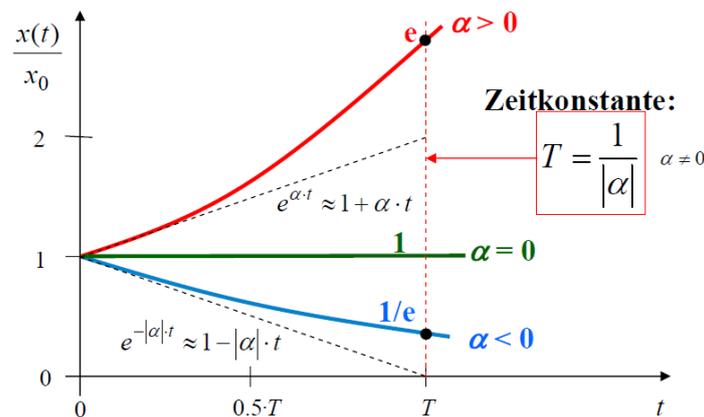
Mit der Anfangsbedingung werden  $C$  und damit die Lösung  $x(t)$  bestimmt:

$$x(0) = C \cdot e^{\alpha \cdot 0} = C = x_0 \Rightarrow x(t) = x_0 \cdot e^{\alpha \cdot t} \quad (\text{B1.2-3})$$

Die Lösung

$$x(t) = x_0 \cdot e^{\alpha \cdot t} \quad (\text{B1.2-4})$$

ist in Bild B1.2-1 dargestellt. Nach der Zeitkonstante  $T = 1/|\alpha|$  hat  $x$  um den Faktor  $e$  zugenommen ( $\alpha > 0$ ) bzw. um den Faktor  $1/e$  abgenommen ( $\alpha < 0$ ). Dabei schneidet im zweiten Fall die Tangente an die Kurve  $x(t)$  im Punkt  $x(0)$  die Abszisse bei  $t = T$ .



**Bild B1.2-1:** Exponentielle Änderungen von  $x$  über der Zeit  $t$ , beginnend mit dem Startwert  $x_0$  mit den drei Fällen: **Abnahme**  $\alpha < 0$ , **keine Änderung**  $\alpha = 0$ , **Zunahme**  $\alpha > 0$ .

**Beispiele** für exponentielles Wachstum sind u. A. der Kapitalzuwachs mit Zinseszins und „Schneeballsysteme“ wie das Prinzip des Kettenbriefs, die theoretisch grenzenlos wachsen können. Exponentielle Abnahme findet z. B. bei den nuklearen Zerfallsreaktionen statt, wobei dort die „Halbwertszeit“ und nicht die Zeitkonstante verwendet wird (siehe Kapitel „Grundlagen“). In der Realität findet aber Wachstum ohne Grenzen nicht statt, denn dies ist auf Grund der endlichen Ressourcen (Kap. R) nicht möglich. Deshalb passt für reale Wachstumsprozesse das exponentielle Modell nur für begrenzte Zeitabschnitte, aber nicht generell. Eine einfache Erweiterung ist das „logistische“ Wachstumsmodell.

### B1.3 Logistisches Wachstum

Beim „**logistischen**“ (= **nicht unbegrenzten**) **Wachstumsmodell** wird eine Schranke  $s > 0$  eingeführt, über die das Wachstum von  $x(t)$  nicht hinaus gehen kann. Damit soll die Endlichkeit der Ressourcen, die für das Wachstum zur Verfügung stehen, berücksichtigt werden. Als Beispiel ist die Anzahl der pro Jahr neu hinzukommenden Menschen in einem bestimmten Gebiet als die „überlebenden Geburten/Jahr“  $dx/dt$  proportional

a) zur Anzahl der zu dieser Zeit lebenden (zeugungsfähigen) „Menschenpaare“  $x$  mit dem Parameter  $\alpha$  wie in Abschnitt B1.2 und

b) zur Menge an „Nahrungsmitteln“ (Ressourcen).

Deren begrenzter Vorrat, bezogen auf den Ausgangswert pro Jahr als 1, ist mit  $1 - x/s$  um so kleiner, je mehr „essende Menschen“  $x$  leben, wobei  $s$  angibt, wie viel jeder dieser Menschen im Mittel isst.

$$\frac{d}{dt} x(t) = \alpha \cdot x(t) \cdot \left(1 - \frac{x(t)}{s}\right) \Rightarrow \dot{x} - \alpha \cdot x + (\alpha/s) \cdot x^2 = 0 \quad (\text{B1.3-1})$$

Dies führt auf eine homogene gewöhnliche, wegen  $x^2$  nichtlineare Differentialgleichung 1. Ordnung (B1.3-1) mit konstanten Koeffizienten  $\alpha$ ,  $s$  mit dem Anfangswert (= die Anfangspopulation  $x(0) = x_0$ ). Solche nichtlinearen Differentialgleichungen 1. Ordnung lassen

sich fallweise analytisch mit der Methode der „Trennung der Veränderlichen  $x$  und  $t$ “ lösen (Details zur Lösungsmethodik: siehe [Dir], [Dir]). Dies ist auch hier möglich.

$$\frac{dx(t)}{dt} = \alpha \cdot x(t) \cdot \left(1 - \frac{x(t)}{s}\right) \Rightarrow \frac{dx}{x \cdot \left(1 - \frac{x}{s}\right)} = \alpha \cdot dt \Rightarrow \int \frac{dx}{x \cdot \left(1 - \frac{x}{s}\right)} = \int \alpha \cdot dt = \alpha \cdot t + C \quad (\text{B1.3-2})$$

In (B1.3-2) werden alle Terme mit explizitem  $x$  auf die linke Seite und alle Terme mit explizitem  $t$  auf die rechte Seite der Gleichung gebracht, so dass die Veränderlichen  $x$  und  $t$  getrennt jeweils links und rechts auftreten. Dann werden linke und rechte Seite analytisch unbestimmt integriert, so dass auch eine Integrationskonstante  $C$  auftritt. Im Fall (B1.3-2) sind sowohl Trennung als auch Integration möglich.

$$\int \frac{dx}{x \cdot \left(1 - \frac{x}{s}\right)} = \int \frac{dx}{x} + \int \frac{dx/s}{1 - x/s} = \ln x - \ln(1 - x/s) = \ln\left(\frac{x}{1 - x/s}\right) = \alpha \cdot t + C \quad (\text{B1.3-3})$$

Über die Anfangsbedingung wird  $C$  bestimmt, indem  $t = 0$  und  $x = x_0$  eingesetzt werden.

$$\ln\left(\frac{x_0}{1 - x_0/s}\right) = \alpha \cdot 0 + C = C \Rightarrow e^C = \frac{s \cdot x_0}{s - x_0} \quad (\text{B1.3-4})$$

Dieser Ausdruck für  $C$  wird in der Lösung (B1.3-3) eingesetzt,

$$\frac{x}{1 - x/s} = e^{\alpha \cdot t + C} \Rightarrow x \cdot \left(e^{-\alpha \cdot t} + \frac{e^C}{s}\right) = e^C \Rightarrow x = \frac{e^C}{e^{-\alpha \cdot t} + \frac{e^C}{s}} = \frac{x_0 \cdot s}{(s - x_0) \cdot e^{-\alpha \cdot t} + x_0} \quad (\text{B1.3-5})$$

und damit als Lösung (B1.3-6) die „logistische Wachstumsfunktion“ (B1.3-6) erhalten.

$$x(t) = \frac{x_0 \cdot s}{x_0 + e^{-\alpha \cdot t} \cdot (s - x_0)} \quad (\text{B1.3-6})$$

Darin ist  $s$  die „Schranke“,  $\alpha$  die Proportionalitätskonstante und  $x_0$  der Anfangswert der Population  $x(t)$ . Für unbegrenztes Wachstum ist  $s \rightarrow \infty$ , und wir erhalten aus (B1.3-6) das exponentielle Wachstum (B1.3-7).

$$\lim_{s \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{x_0 \cdot s}{x_0 + e^{-\alpha \cdot t} \cdot (s - x_0)} = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{x_0 \cdot s}{e^{-\alpha \cdot t} \cdot s} = x_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (\text{B1.3-7})$$

Als Grenzwertbetrachtung für „kurze“ Zeit nach dem Wachstumsbeginn  $t \ll 1/|\alpha|$  sind logistisches und exponentielles Wachstum gleich.

$$t \ll \frac{1}{|\alpha|} : \frac{x_0 \cdot s}{x_0 + e^{-\alpha \cdot t} \cdot (s - x_0)} = \frac{x_0 \cdot s \cdot e^{\alpha \cdot t}}{x_0 \cdot e^{\alpha \cdot t} + (s - x_0)} \approx \frac{x_0 \cdot s \cdot e^{\alpha \cdot t}}{x_0 \cdot 1 + (s - x_0)} = x_0 \cdot e^{\alpha \cdot t} \quad (\text{B1.3-8})$$

Für sehr große Zeiten nach Wachstumsbeginn  $t \gg 1/|\alpha|$  zeigt die logistische Wachstumsfunktion, dass das Wachstum nicht über die Schranke  $s$  zunimmt!

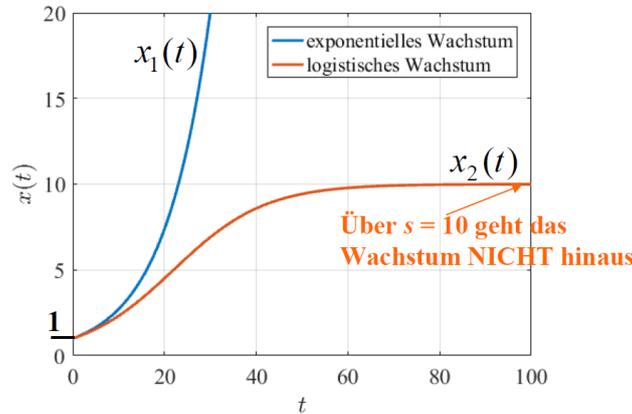
$$x(t \rightarrow \infty) = \frac{x_0 \cdot s}{x_0 + e^{-\infty} \cdot (s - x_0)} = s \quad (\text{B1.3-9})$$

Beispiele zur Verwendung des logistischen Wachstumsmodells sind die Beschreibung von Populationen von Lebewesen, die sich jederzeit (= kontinuierlich) vermehren können, die quasi-kontinuierliche Ausbreitung von Seuchen oder der kontinuierliche Wissenszugewinn bei menschlichen Lernprozessen, der offenbar auch nicht unbegrenzt möglich ist.

#### Beispiel B1.3-1:

Vergleich von exponentiellem und logistischem Wachstum für die Parameter  $x_0 = 1$ ,  $\alpha = 0.1$ ,  $s = 10$ :

a) Exponentielles Wachstum  $x_1(t) = e^{0.1t}$ , b) logistisches Wachstum  $x_2(t) = \frac{10}{1 + 9 \cdot e^{-0.1t}}$ .  
 Während das exponentielle Wachstum wegen  $\alpha > 0$  über alle Grenzen strebt  $x_1(t \rightarrow \infty) \rightarrow \infty$ , ist das logistische Wachstum beschränkt auf  $x_2(t \rightarrow \infty) = s = 10$  (Bild B1.3-1).



**Bild B1.3-1:** Vergleich von exponentiellem Wachstum  $x_1(t)$  und logistischem Wachstum  $x_2(t)$  bei gleichem Parameter  $\alpha$  und Startwert  $x_0$ . Das logistische Wachstum  $x_2(t)$  geht über  $x_2 = s$  nicht hinaus. Für kurze Zeit nach dem Wachstumsstart schmiegt sich  $x_1(t)$  eng an  $x_2(t)$  (Beispieldaten von Bsp. B1.3-1)

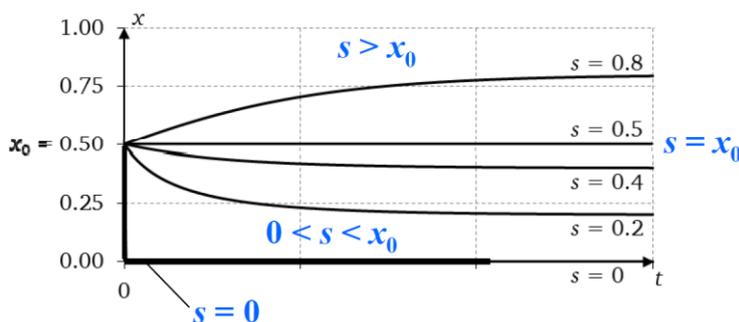
**Beispiel B1.3-2:** Variation von  $s$  für  $\alpha = 0.015 > 0$ ,  $x_0 = 0.5$  (Bild B1.3-2):

a)  $s = 0$ : Die Wachstumsrate  $dx/dt$  ist bei  $t = 0$  negativ unendlich groß (B1.3-10). Population sinkt vom Anfangswert  $x_0$  (B1.3-11) sofort auf Null. Sie bleibt dann bei Null (B1.3-12)!

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{d}{dt} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \alpha \cdot x(t) \cdot \left(1 - \frac{x(t)}{s}\right) \rightarrow -\infty \quad (\text{B1.3-10})$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} x(t=0) = \frac{x_0 \cdot s}{x_0 + (s - x_0)} = x_0 \cdot \frac{s}{s} = x_0, \quad t = 0 \quad (\text{B1.3-11})$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} x(t) = \frac{x_0 \cdot 0}{x_0 + e^{-\alpha t} \cdot (0 - x_0)} = 0, \quad t > 0 \quad (\text{B1.3-12})$$



**Bild B1.3-2:** Variation von  $s$  beim logistischen Wachstum  $x(t)$  für  $\alpha = 0.015 > 0$  und  $x_0 = 0.5$ . Die Population strebt dem jeweiligen Grenzwert  $s$  zu.

b) Bei  $s = x_0$  ist die Wachstumsrate von Anfang an Null, so dass  $x(t) = x_0$  bleibt.

$$s = x_0 : \frac{d}{dt} x(t) \Big|_{t=0} = \alpha \cdot x_0 \cdot \left(1 - \frac{x_0}{s}\right) = \alpha \cdot x_0 \cdot \left(1 - \frac{x_0}{x_0}\right) = 0 \quad (\text{B1.3-13})$$

Es werden alle Vorräte von der bestehenden Population konsumiert, so dass für den Nachwuchs nichts übrig bleibt. Die Population ist daher konstant  $x(t) = x_0 \quad t \geq 0$ , unabhängig von  $\alpha$ !

Neben diesen beiden sehr einfachen Wachstumsmodellen existieren unterschiedliche, tw. deutlich komplexere kontinuierliche und diskrete Wachstumsmodelle, je nach Anwendungsfall. Der reale Wachstumsverlauf natürlicher Vorgänge ist deshalb wesentlich komplizierter auf Grund vieler wirkender Einflussparameter. Periodische Schwankungen der Populationen auf Grund großer Rückwirkungen der Population auf die Ressourcen sind möglich (z. B. Modell der Populationsänderung der Hechte (Jäger) und Forellen (Beute = Ressource) im Teich als abgegrenztes Gebiet).

Die Vermehrung der Menschen ist quasi-kontinuierlich und wird durch kontinuierliche Modelle beschrieben. Die Vermehrung in der Tier- und Pflanzenwelt ist häufig an den Jahresrhythmus gebunden und daher diskontinuierlich. Selbst beim einfachsten nichtlinearen Wachstumsmodell, dem VERHULST-Modell, treten ab einem kritischen Wert bestimmter Wachstumsparameter auf Grund der dann großen Nichtlinearität „chaotische“ Eigenschaften (= „unvorhersehbare“, besser: unerwartete Eigenschaften) des Wachstums auf. Das Wachstum kann dann scheinbar regellose Formen annehmen. Dieses chaotische Verhalten ist auch bei kontinuierlichen Wachstumsvorgängen bei großen Nichtlinearitäten möglich; es ist eine fundamentale Eigenschaft nichtlinearer Systeme. In der **Chaostheorie** werden diese nichtlinearen Phänomene behandelt. In der Energietechnik sind solche disruptiven Vorgänge i. A. nicht anzutreffen (außer in Sonderfällen z. B. großräumig auftretender Katastrophen o. ä.), wohl aber in anderen Gebieten wie z. B. in der Wettervorhersage mit den ihr zugrunde liegenden nichtlinearen Strömungsgleichungen (Kap. G).

## B2 Bevölkerungswachstum

Die **Weltbevölkerung** ist die Anzahl der Menschen, die auf der Erde leben bzw. zu einem bestimmten Zeitpunkt gelebt haben oder leben werden. Im Januar 2022 lebten über 7.9 Mrd. Menschen auf der Erde. Der rasante, etwa exponentielle Zuwachs an Menschen auf der Erde („**Bevölkerungsexplosion**“) begann Mitte des 20. Jahrhunderts mit einer Wachstumsrate  $dx/dt$  p.a.  $> 2.5\%$  (Bild B2-1) mit Maximalwerten um 1980 von +84 Mio. p.a..

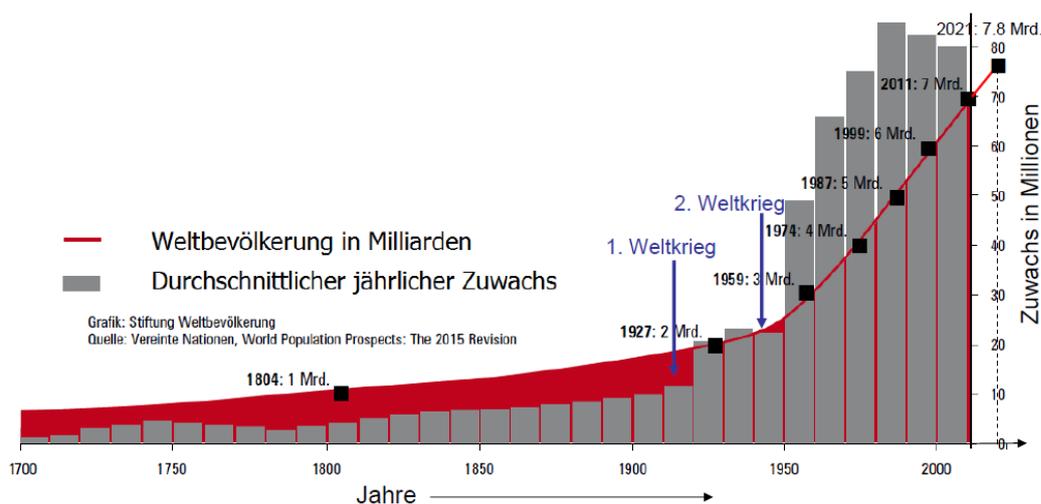


Bild B2-1: Weltbevölkerungswachstum: Entwicklung von 1700 bis 2021.

Diese Wachstumsdynamik verringert sich seit einigen Jahren etwas. So sank die Wachstumsrate bisher auf ca.  $1.5\%$  p. a. Das bedeutet einen jährlichen Nettozuwachs als Differenz von Geburten und Sterbefälle von +78 Mio. Menschen p. a.. Das ist ein jährlicher Zuwachs von knapp der Größe der *deutschen* Bevölkerung. Dieser absolute jährliche Zuwachs geht derzeit leicht zurück, so dass sich das Wachstum etwas verlangsamt und in ein logistisches Wachstum überzugehen scheint. Bei den Wachstumsmodellen für ein „Mittleres

Szenario“, wie es bei der UNO berechnet wird, werden mittlere zu erwartende Geburtenraten und Lebenserwartungen angenommen. Demnach würden 2050 ca. 9.7 Milliarden und 2100 ca. 11.2 Mrd. Menschen auf der Erde leben (Bild B2-2). Der jährliche Zuwachs an Menschen auf der Erde wird demnach 2100 auf ca. 16 Mio. p. a. sinken.

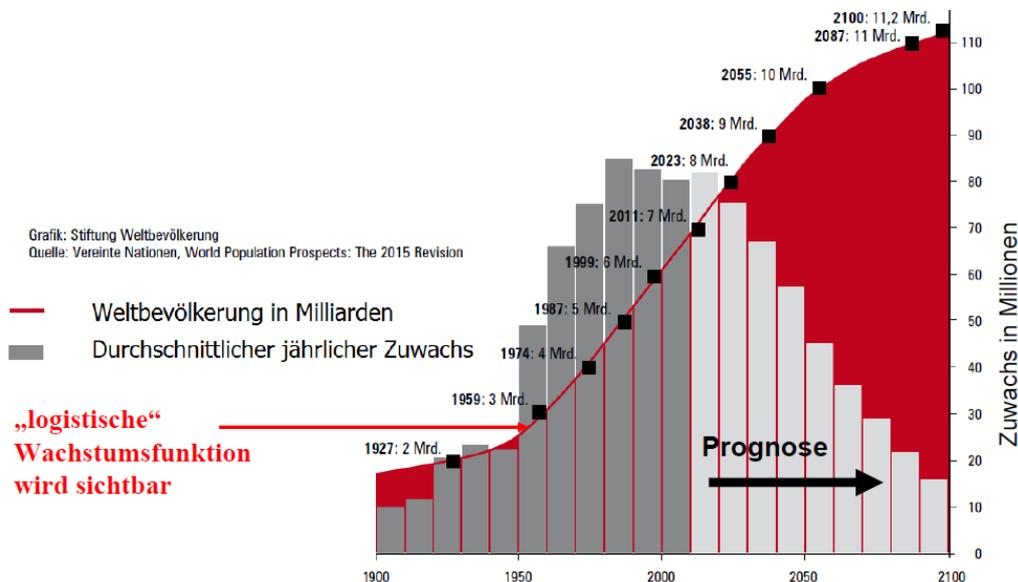


Bild B2-2: Weltbevölkerungswachstum: Bevölkerungsexplosion von 1950 bis 2000 und Prognose bis 2100.

Die **Demografie** und die **Bevölkerungsgeografie** befassen sich mit der Untersuchung des Stands, der historischen Entwicklung, der räumlichen Verteilung und der Dynamik der Weltbevölkerung mit dem Ziel der Prognosenerstellung. Bei diesen Prognosemodellen werden die Begriffe „Fertilitätsrate“ und „Geburtenrate“ verwendet. Die **Fertilitätsrate** gibt an, wie viele Kinder eine Frau in einer bestimmten Region durchschnittlich im Laufe des Lebens hätte. Die **Geburtenrate** gibt die Anzahl der Lebendgeborenen pro Jahr einer bestimmten Region an, bezogen auf 1000 Einwohner dieser Region.

Die Gründe für Bevölkerungsexplosion ab 1950 sind zum einen die Auswirkungen der „grünen Revolution“, wonach in den 1960er Jahren moderne landwirtschaftliche Hochertragssorten von Nutzpflanzen in den sogenannten Entwicklungsländern verbreitet wurden, so dass dort mehr Grundnahrungsmittel produziert werden konnten. Dies erhöhte die Überlebenschance vor allem der Kinder. Weiter stieg ab Mitte des 20. Jahrhunderts dank besserer medizinischer Versorgung (z. B. Erfindung und Verbreitung der Antibiotika und Anti-Malaria-Medikamente, Erfindung der Insulinbehandlung, Impfungen gegen bakterielle Infektionen wie Pocken und Cholera ...) weltweit die Lebenserwartung. Insbesondere sank die Kindersterblichkeit in den Entwicklungsländern deutlich. Allerdings erfolgte keine Änderung der Fortpflanzungs-Gewohnheiten in *Afrika* und weiten Teilen *Asiens*, so dass vor allem in diesen Ländern eine dramatische Bevölkerungszunahme stattfand und stattfindet. Auf Grund dieser Entwicklung wurde in der zentral gelenkten *VR China* die „Ein-Kind-Politik“ als Zuwachsbremse vorgeschrieben, die ab 2015 in eine „Zwei-Kind-Politik“ geändert wurde. In den letzten Jahrzehnten ging die Anzahl der durchschnittlich geborenen Kinder pro Frau (Fertilitätsrate) in den industrialisierten Ländern auf ca. 1 Kind/Frau zurück. Dies ist neben der Erfindung der „Pille“ als Verhütungsmittel („Pillenknicke“ im Bevölkerungszuwachs) u. A. auf den Wunsch nach beruflicher Erfüllung auch der weiblichen Bevölkerung und allgemein auf den Wunsch nach gehobenem Lebensstandard und der „Selbstverwirklichung“ mit geringer Belastung durch Erziehungsaufgaben beider Geschlechter zu erklären.

In den weniger industrialisierten Ländern ist die Fertilitätsrate hingegen deutlich höher bei 2 ... 7 Kindern/Frau mit den größten Werten in *Afrika* (Bild B2-3). Es werden dort Kinder nach wie vor als Einkommensbringer (Kinderarbeit) zur Erhöhung des Lebensstandards gesehen.

Die Rolle der Frau ist häufig noch traditionell an die Kindererziehung gebunden. Oft ist im tradierten Verhalten eine kinderreiche Familie Ausdruck sozialer Stärke (Clan-Kultur und lokale biologische Dominanz) und männlicher Zeugungskraft (Patriarchen-Kultur).

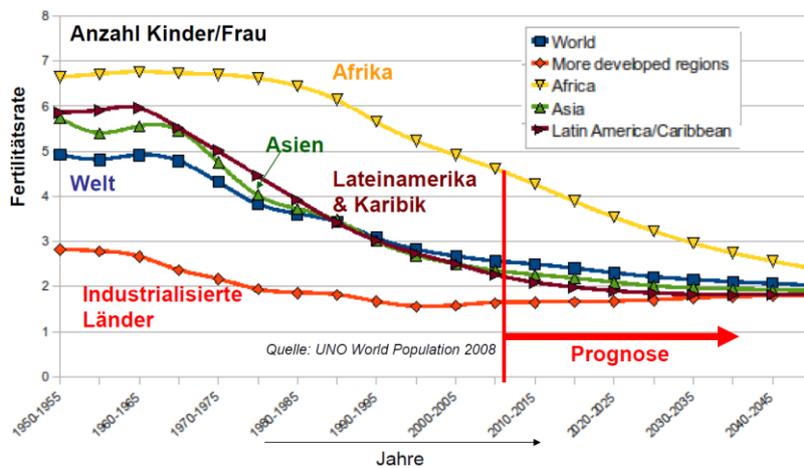


Bild B2-3: Fertilitätsrate ab 1950 nach Welt-Regionen und deren Prognose bis 2050.

Die Auswirkungen der Bevölkerungsexplosion sind weithin sichtbar, wie z. B. die globalen Wanderbewegungen („Migration“) aus überbevölkerten Gebieten zu wohlhabenden Industrienationen und die Verstädterung/Vermassung mit Metropolen von über 20 Mio. Einwohnern (z. B. *Kairo*, *Mumbai* ...) und den damit verbundenen urbanen Problemen. Die „Internationalisierung“ (Globalisierung) der menschlichen Lebenssituationen drückt sich auch z. B. in globalen Pandemien und weltweiten Verkehrsströmen an Menschen und Gütern aus. Die einhergehende voranschreitende Umweltbeeinträchtigung und die Verknappung der Lebensressourcen wie z. B. Wasser in ariden Regionen führt zu weltweit wirksamen wirtschaftlichen und politischen Konflikte um die Verteilung der Güter, auch der Rohstoffe und Energiequellen. Es kommt zur Verschiebung der „Treiber“ für künftige Entwicklungen weg von den „alten“ führenden Industrienationen hin zu den „neuen“ bevölkerungsstarken, industriell aufholenden Niedriglohnländern.

### B3 Energiebedarfsentwicklung

Die Energiebedarfsentwicklung ist maßgeblich abhängig von der in Kap. B2 beschriebenen Bevölkerungsentwicklung, aber auch vom Wirtschaftswachstum einzelner Regionen und von der Völkergemeinschaft festgelegten Klimaschutzziele angesichts der fortschreitenden Umweltbeeinträchtigung durch die zunehmende Weltbevölkerung. Wie groß darf eine mittlere Jahrestemperatur ansteigen (6 °C, 4 °C oder 2 °C Erderwärmung), bezogen auf die vorindustrielle Zeit, ohne dramatische globale Auswirkungen für den Weltfrieden? Der daraus resultierende geforderte Wandel im Verbraucherverhalten zielt auf einen „nachhaltigeren“ Umgang mit den Ressourcen wie energetische Ressourcen (siehe Kap. R), aber auch mit Rohstoffen, Wasser und Anbauflächen. Unterschiedliche nationale und internationale Gremien und Institute, aber auch international agierende Firmen der Energiebranche entwickeln Vorhersagen zur Entwicklung des künftigen Energiebedarfs. Eine sinnvoll prognostizierbare weltweite Entwicklung des Energiebedarfs ist nur bei Betrachtung von Gesamtszenarien möglich, wobei wachstumsbestimmende Parameter z. B. an der Obergrenze, Untergrenze oder im Mittelbereich ihrer möglichen Bereichsbänder angenommen werden. Allerdings stehen statistisch verlässliche Daten für solche Prognosen erst nach ca. zwei Jahren zur Verfügung stehen. Hier beschränken wir uns im Rahmen einer einführenden Behandlung

auf einen mittleren Parameterbereich, das „Business-As-Usual Scenario“. Dazu folgen wir Ergebnissen der Prognosestudien der Firma *British Petrol BP* in ihrem derzeit jährlich aktualisierten „*Energy Outlook*“, der im *Outlook 2020* den Zukunftshorizont bis 2050 in Aussicht nimmt, denn zunehmende Unsicherheiten bei größeren Zeiträumen lassen keine aussagekräftigen längerfristigen Prognosen zu. Dabei erfolgt ein Vergleich mit der Gegenwartssituation.

Als wesentliches wirtschaftliches Maß wird dabei das **Bruttoinlandsprodukt (BIP)** verwendet. Es 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 somit 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 und ist die wichtigste Größe der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung.

Als Treiber für die Energiebedarfsentwicklung werden vor allem Regionen bzw. Ländergruppen mit überdurchschnittlichem Energiebedarf betrachtet. Eine dieser Gruppen ist die seit 1961 bestehende **Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung** (OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development). Diese internationale Organisation aus derzeit 35 Mitgliedstaaten aus fast allen Regionen der Erde bilden einen Großteil der „alten“ Industrienationen ab, die sich der Staatsform Demokratie und der Wirtschaftsform der freien Marktwirtschaft verpflichtet fühlen (sollten). Mitglieder sind (2021) *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*. Die meisten OECD-Mitglieder sind Ländern mit hohem Pro-Kopf-Einkommen auf Grund hoher wirtschaftlicher Entwicklung. Alle Mitgliedsstaaten zusammen umfassen ein Gebiet von 36.2 Mio. km<sup>2</sup> (24 % der weltweit bewohnbaren Fläche) und 1.3 Mrd. Menschen (17 % der Weltbevölkerung). Weitere wesentliche Gruppierungen sind *VR China*, der *indische* Subkontinent und weitere Länder des Fernen Ostens wie *Taiwan* und *Indonesien*.

Der *BP-„Energy Outlook 2020“* fasst folgende Trends zur Energiebedarfsentwicklung, basierend auf den Wachstumstrends zur Weltbevölkerung und Welt-Wirtschaft zusammen:

Weltbevölkerung und Welteinkommen steigen weiter an, so dass 2050 9.6 Mrd. Menschen (+24 %) auf der Erde leben werden. Das Welt-BIP wird bis 2050 um den Faktor 2.3 wachsen, wobei 21% durch das Bevölkerungswachstum und 79 % durch die Steigerung der Produktivität bedingt sind. Dabei sind künftig *China* und *Indien* die wichtigsten Treiber der Weltwirtschaft. Sie werden auf Grund ihrer Bevölkerungsgröße und günstigen Lohnverhältnisse 50 % des zu erwartenden BIP-Wachstums bis 2050 erwirtschaften. In *Afrika* steigt die Bevölkerung weiterhin stark an, aber das BIP steigt auf Grund der dortigen zerrissenen politischen Situation, der Einschränkungen durch Stammesgrenzen, Rivalitäten, Korruption und der damit verbundenen schwierigen Regierbarkeit nur unterproportional.

In den Jahren 2022 ... 2050 werden ca. 25 % Steigerung des Welt-Primärenergieverbrauchs erwartet, davon ca. 2/3 durch *China*, *Indien* und *Fernost-Asien*. 75 % der Steigerung sind dabei durch die durch die dort wachsende Industrie und Gebäudenutzung bedingt. Etwa 50 % (nach anderen Quellen 65 %) des Zuwachses an Primärenergienutzung wird voraussichtlich für die wachsende Nutzung elektrischer Energie verwendet. Die Entwicklungs- und Schwellenländer sind die Treiber der Steigerung des Weltenergiebedarfs, da der „Energiehunger“ als Nachholbedarf auf Grund des dort steigenden Lebensstandards und durch die dort große Bevölkerungszunahme verursacht ist. Die Steigerungsraten (= Änderung der Steigerung von Jahr zu Jahr) beim Primärenergieverbrauch werden künftig sinken. Es waren weltweit bisher zwischen 2000 ... 2018 ca. 2.2 % p.a., getrieben vor allem durch das wirtschaftlich mit ca. 10 % p. a. im BIP stark wachsende *China*. Erwartet werden 2018 ...

2050 kleinere Raten von ca. 0.85 % p. a. gemäß logistischer Wachstumsfunktionen. Der dominierende Einfluss von *China* auf diese Wachstumsrate des Primärenergieverbrauchs wird graduell zurückgehen, da *Indiens* Anteil steigen wird. Trotzdem wird *China* der am stärksten wachsende Markt für Energie bleiben.

Erdöl, Erdgas und Kohle bleiben voraussichtlich die dominanten Energiequellen, da sie vor allem in den o. g. Ländern mit großem Anteil genutzt werden, um den „Energiehunger“ zu stillen. Die Erdgasnutzung wächst voraussichtlich prozentual stärker als die Erdölnutzung, da auch Schiefergasförderung zunehmen wird. 2050 werden allerdings regenerative Energien, große Wasserkraftwerke und Kernkraftwerke (Nutzung der Fission) ca. 23 % des gestiegenen Energiebedarfs CO<sub>2</sub>-neutral abdecken. Regenerative Energienutzung wird sich nämlich innerhalb 20 Jahren weltweit voraussichtlich vervierfachen. Auf Grund des o. g. „Energiehungers“ nehmen die CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit weiter zu, aber voraussichtlich nur mit einem Drittel der bisherigen Wachstumsrate. Die bestehenden Klimaziele werden daher voraussichtlich nicht erreicht werden.

Die gemäß dem „magischen Dreieck“ gleichzeitig angestrebten Ziele Effizienz, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit für eine moderne Energieversorgung werden durch weitere begleitende Themen und Herausforderungen mitbestimmt. Die Bremsung der Klimaerwärmung, z. B. auch über effizientere Energienutzung, wird künftig noch mehr die internationale und nationale Energiepolitik bestimmen. Der steigende Trinkwasserbedarf wird enger gekoppelt sein an den steigenden Energiebedarf z. B. durch die Energie für Grundwasserpumpen, Meerwasserentsalzungsanlagen etc. Die sich abzeichnende Verknappung wichtiger Metalle als Rohstoffe der Energietechnik wird zu einer verstärkten Recyclingwirtschaft führen, wie sie z. B. für Eisen, Stahl und Kupfer in *Deutschland* schon existiert.

#### B4 Globale Erwärmung

Die globale Erderwärmung („**Klimawandel**“) ist der Anstieg der Durchschnittstemperatur der erdnahen Atmosphäre und der Meere seit Beginn der Industrialisierung, der deshalb als überwiegend als menschenverursacht betrachtet wird. Die seit der Industrialisierung andauernde menschlich verursachte Anreicherung der Erdatmosphäre mit Treibhausgasen (v. a. Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub>, Methan CH<sub>4</sub>, Distickstoffmonoxid N<sub>2</sub>O) durch die Verbrennung fossiler Energieträger bei gleichzeitiger Entwaldung sowie intensivierter Land- und Viehwirtschaft erhöht das Rückhaltevermögen für infrarote Wärmestrahlung in der Troposphäre („**Treibhauseffekt**“). Diese Anreicherung ist der Hauptursache des „Treibhauseffekts“, dem Wasserdampf als Wolken und Dunst überlagert. Das **Treibhauspotential** (Global warming potential GWP) ist das CO<sub>2</sub>-Äquivalent CO<sub>2e</sub> einer chemischen Verbindung. Es gibt als Maßzahl an, wie viel eine festgelegte Masse (z. B. 1 kg) eines Treibhausgases (z. B. Methan CH<sub>4</sub>) zur globalen Erwärmung über den Treibhauseffekt beiträgt. Bezugswert ist das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid, so dass das GWP in CO<sub>2e</sub> (equivalent) angegeben wird.

##### Beispiel B4-1:

Die Treibhauswirkung von 1 kg Methangas in der Atmosphäre für 100 Jahre hat als CO<sub>2</sub>-Äquivalent das GWP = 28 (2013 noch mit 34 angegeben). Das bedeutet: Ein Kilogramm Methan trägt innerhalb der ersten 100 Jahre nach seiner Freisetzung 28-mal so stark zum Treibhauseffekt bei wie ein Kilogramm CO<sub>2</sub>.

Der **IPCC** (Inter-governmental Panel on Climate Change; „Weltklimarat“) ist ein zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen der Vereinten Nationen. Der IPCC gibt GWP-Werte für die „Zeithorizonte“ 20, 100 und 500 Jahren an. Dabei wird ein langer Zeithorizont bevorzugt für die Bewertung von Maßnahmen zur Eindämmung der langfristigen Folgen der globalen Erwärmung.

Wir betrachten, wie viel CO<sub>2</sub> je erzeugter kWh als thermische Energie erzeugt wird, wenn unterschiedliche Stoffe verbrannt werden. Die Molmasse von CO<sub>2</sub> ist mit  $1 m_u = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $L' = 6.022 \cdot 10^{23} / \text{mol}$

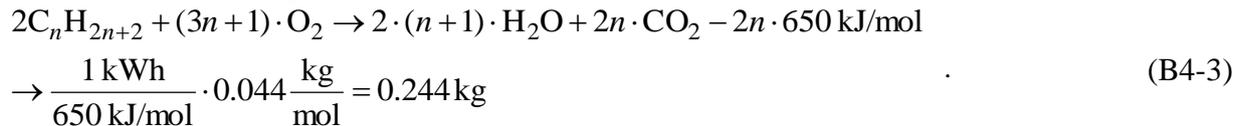


Die CO<sub>2</sub>-Masse je erzeugter thermischer Energie 1 kWh durch

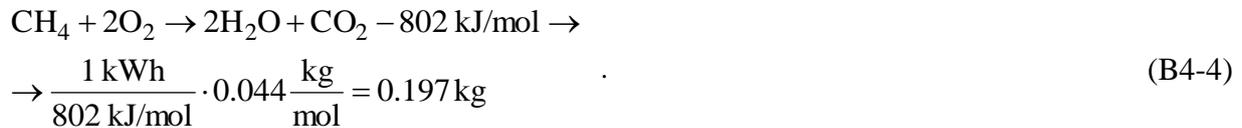
a) Verbrennung von reinem Kohlenstoff (C, etwa Anthrazit) mit reinem Sauerstoff ist:



b) Rohöl-Verbrennung ( $n$  C-Atome je Alkan-Molekül) ist:



c) Naturgas (=Methan)-Verbrennung ist:



Da bei CH<sub>4</sub> auch die Wasserstoffoxidation zu H<sub>2</sub>O zur Energiefreisetzung beiträgt, entsteht bei der Erdgasverbrennung nur etwa 50% CO<sub>2</sub> wie bei der C-Verbrennung (Tab. B4-1).

Lt. UNFCCC, FCCC/SBSTA, 1998:		Kraftwerkswirkungsgrad	
- Braunkohle	0.36 kg/kWh <sub>th</sub>	43%	0.84 kg/kWh <sub>el</sub>
- Steinkohle	0.34 kg/kWh <sub>th</sub>	46%	0.74 kg/kWh <sub>el</sub>
- Rohöl	0.26 kg/kWh <sub>th</sub>	45%	0.58 kg/kWh <sub>el</sub>
- Naturgas	0.20 kg/kWh <sub>th</sub>	60% (GuD)	0.33 kg/kWh <sub>el</sub>

Tabelle B4-1: CO<sub>2</sub>-Bildung im Vergleich bei Verbrennung von Braunkohle, Steinkohle, Rohöl und Naturgas für 1 kWh<sub>th</sub> thermische Energie und – dividiert durch den Kraftwerks-Wirkungsgrad moderner Kraftwerke (z. B. in Deutschland) – für 1 kWh<sub>el</sub> elektrische Energie (Quelle: *United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC*).

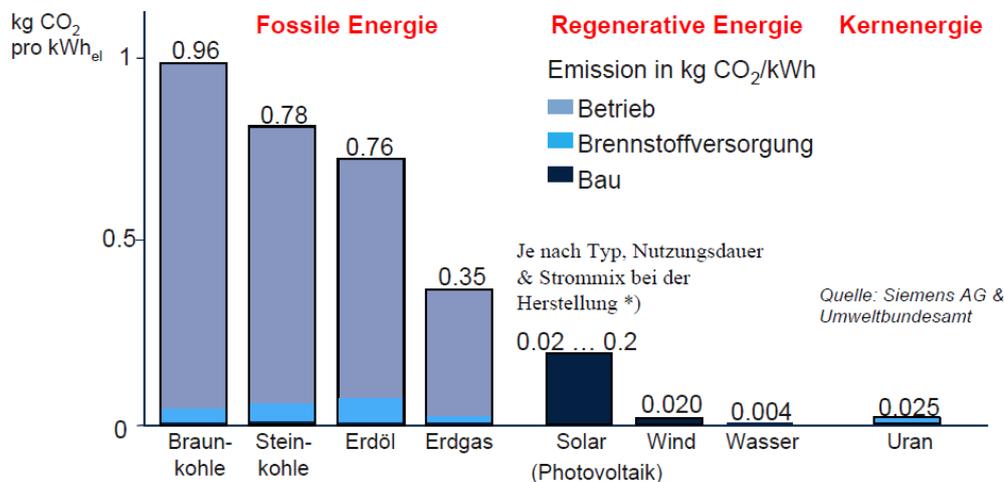
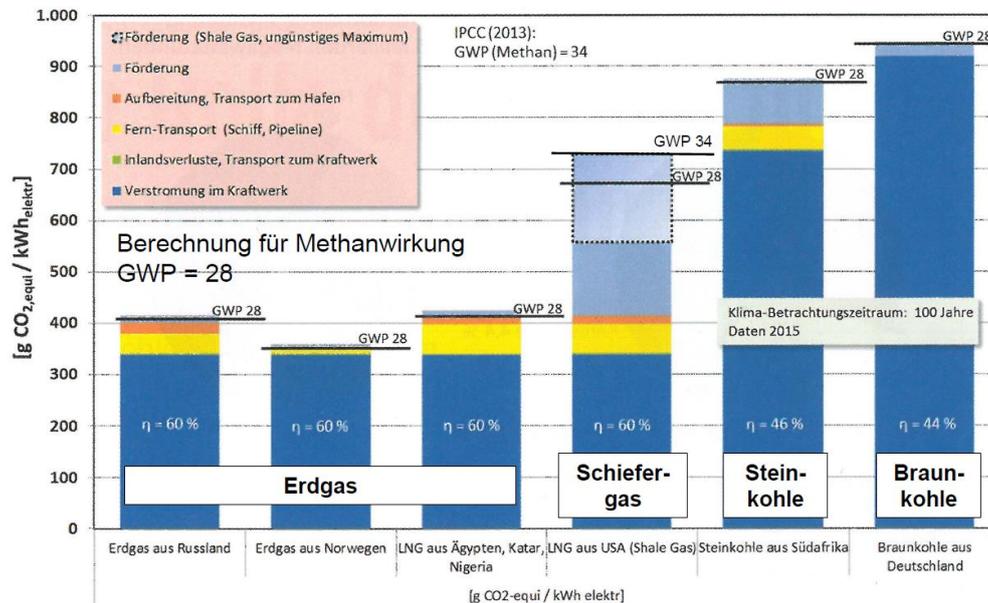


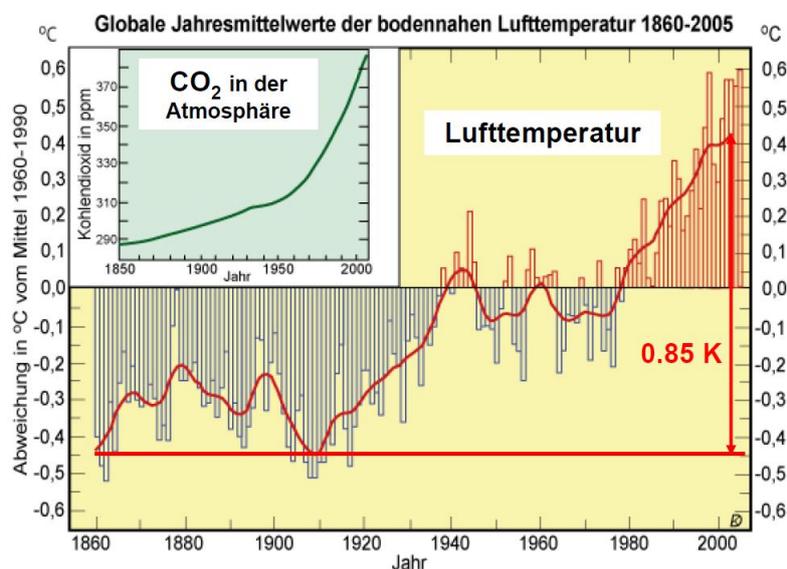
Bild B4-1: CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Stromerzeugung 1 kWh<sub>el</sub> in verschiedenen Kraftwerkstypen, bei Gas als GuD-Kraftwerk, aufgeschlüsselt nach der Herkunft (Kraftwerkserrichtung, Energieträgertransport, Kraftwerks-Betrieb)

(\*) Bsp.: Monokristallines Si-Modul, 30 Jahre Nutzungsdauer, deutscher Strommix 2020: 50 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>el</sub>).

Je nach Kraftwerksart dominiert der Einfluss der Herstellung des Kraftwerks (z. B.: Solarzelle: hoher Wärmeenergiebedarf zum Schmelzen des Siliziums; Schiefergas: erhöhter Förderaufwand) oder die Art des Betriebs (Verbrennung fossiler Energieträger) die CO<sub>2</sub>-Produktion (Bild B4-1). Auch der Ferntransport der Energieträger bei der Verbrennung erhöht die CO<sub>2</sub>-Produktion („CO<sub>2</sub>-Fußabdruck“), Bild B4-2.



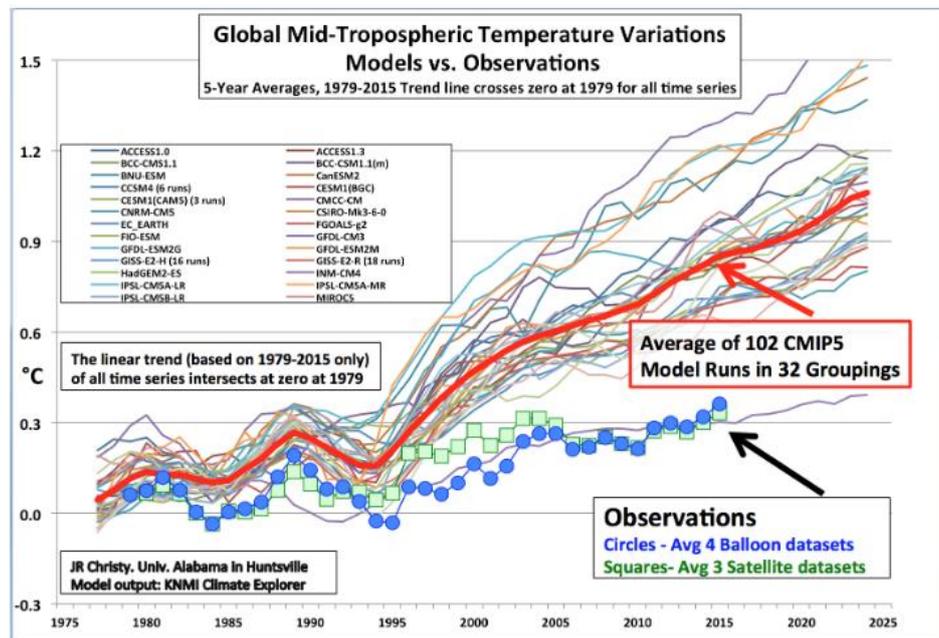
**Bild B4-2:** CO<sub>2</sub>-äquivalente Treibhausgasemission (in Gramm) je produzierte kWh el. Energie für Erdgas, Stein- und Braunkohle mit angegebenen Kraftwerkswirkungsgraden  $\eta$  moderner Kraftwerkstypen, bei Gas als GUD-Kraftwerk (Quelle: *BWK*, 2016, nach *RWE Power AG*).



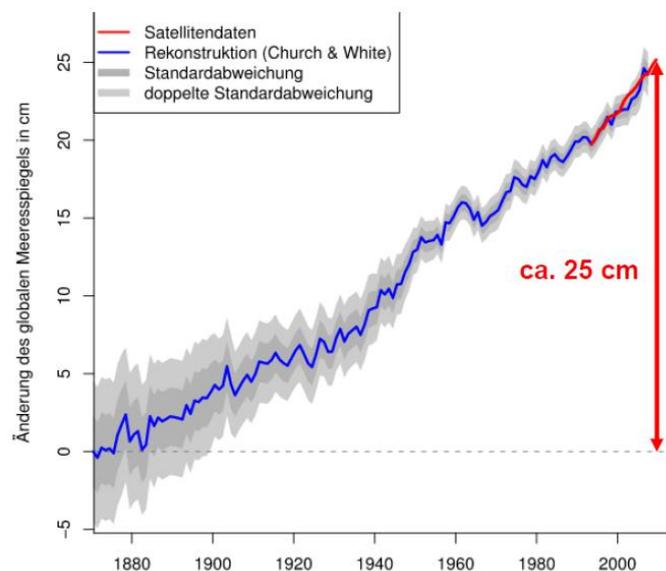
**Bild B4-3:** Weltweiter bodennaher Lufttemperaturanstieg und CO<sub>2</sub>-Anstieg in der Atmosphäre seit Beginn der industriellen Revolution, 1 ppm = 1 parts per million = 1/1 000 000 (Quelle: *Hamburger Bildungsserver*).

Die Korrelation der Zunahme der gemessenen jahresmittleren Lufttemperatur weltweit zum gemessenen CO<sub>2</sub>-Anstieg in der Atmosphäre (Bild B4-3) legt als Ursache für die Temperaturzunahme den „Treibhauseffekt“ nahe. Seit 1860 beträgt diese Zunahme bis 2005 ca. 0.85 K (Bild B4-3) und bis 2022 ca. 1.1 °C. Dieser Lufttemperaturanstieg in höheren Lagen wird durch unterschiedliche Modelle berechnet. Ergebnisse sind dem Mittelwert der Messung mit Höhenballons und Satelliten in Bild B4-4 gegenübergestellt. Die Kontroverse über die Güte

der Berechnungsmodelle, wie sie z. B. anhand Bild B4-4 geführt wurde, täuscht nicht darüber hinweg, dass die gemessenen Werte des Temperaturanstiegs im Vergleich zu 1860 ... 1900 bis zu den 2020er Jahren nach Angaben des IPCC nachvollziehbar hohe 1.1 °C betragen.



**Bild B4-4:** Weltweiter Lufttemperaturanstieg in der Troposphäre, gleitend über 5 Jahre gemittelt: Die Messergebnisse der Temperaturzunahme mit ca. 0.4 K von 1970 bis 2005 passen zu den Werten in Bild B4-3, während zahlreiche Rechenmodelle die Zunahme überschätzten (Quelle: J. R. Christy, Univ. of Alabama, Huntsville, U.S. House Committee on Science, Space & Technology, 2. Feb. 2016).



**Bild B4-5:** Der gemessene bzw. rekonstruierte Anstieg des weltweiten Meeresspiegels beträgt ca. 25 cm seit 1880 (Quelle: wikipedia.de).

Bei der von Menschen gemachten globalen Erwärmung wird, ohne verschärfte Klimaschutzmaßnahmen, damit gerechnet, dass die Temperatur vom Ende des 20. bis Ende des 21. Jahrhunderts um 4 ... 5 °C steigt. Folge der globalen Erwärmung ist neben dem Lufttemperaturanstieg auch die Erwärmung des Meerwassers. Durch die Ausdehnung des erwärmten Meerwassers und das vermehrte Abschmelzen von Inland-Gletschereis vor allem in den Polarregionen (z. B. in Grönland) kommt es zu einer globalen Meeresspiegelerhöhung (Bild B4-5). Die Meerereswärmung führt auch zu einer Veränderung der Meeresfauna und Meeresflora (ggf. Artensterben), einhergehend mit einer Verschlechterung der Wasserqualität

(z. B. verstärktes Mikrobewachstum), die ihrerseits zu vermehrten gesundheitlichen Belastungen führen kann. Die langfristige Folge des Ansteigens des Meeresspiegels ist der Entfall von Landflächen in bestimmten küstennahen Zonen. Worst-case-Prognose gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2300 der Meeresspiegel zwischen 2.5 ... 5 m ansteigen könnte, einhergehend mit ca. 3° Meerereswärmung. Kurzfristig führt die relativ rasche globale Erwärmung zu klimatischen Ungleichgewichten und offenbar vermehrt zu Extremwetterlagen wie Wirbelstürmen und Überflutungen. Um den CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenzusteuern, wurde in der EU u. A. die Maßnahme des **EU-Emissionshandels (European Union Emissions Trading System, EU ETS)** ab 2005 eingeführt. Es wurde eine begrenzte Zahl an Emissionsrechten festgelegt, die auf einem eigens dafür eingerichteten Markt gehandelt werden. ETS umfasst und begrenzt den CO<sub>2</sub>-Ausstoß von ca. 11 000 Anlagen in 28 *EU-Staaten*, dazu in *Liechtenstein, Island, Norwegen* bei der Stromerzeugung und in einigen Industriebereichen (z. B. Zementindustrie), die etwa 45 % der jährlichen Klimagasemissionen in der EU umfassen. Die Anlagenbetreiber müssen für jede emittierte Tonne CO<sub>2e</sub> ein gültiges Zertifikat vorlegen. Betreiber mit zu wenigen Zertifikaten, gemessen an ihren Emissionen, müssen Strafe zahlen. Es gibt nur eine begrenzte Menge neuer Zertifikate pro Jahr, die geringer ist als die aktuellen Gesamtemissionen, als Druckmittel zur Umsetzung von emissionsvermindernden Maßnahmen. Einen Anteil A von ca. 60 % erhalten die Anlagenbetreiber kostenlos, um ihre Dienstleistungen weiter fortsetzen zu können. Ein Anteil B mit ca. 40% wird am o. g. Markt versteigert. Dazu dienten und dienen mehrjährige Handelsperioden: Periode I: 2005 ... 2007, Periode II: 2008 ... 2012, Periode III: 2013 ... 2020. Der Versteigerungspreis schwankt je nach Marktlage und betrug 2019 zwischen 19 ... 28 Euro/Tonne CO<sub>2e</sub>. Die Erlöse sollen von den Verkäufern vorrangig in eigene Maßnahmen zum Klimaschutz investiert werden.

Als weitere emissionsmindernde Maßnahme gibt es in *Deutschland* das **Brennstoff-Emissionshandelsgesetz (BEHG)**. Für Brennstoffe für den Verkehr und den Betrieb von Gebäuden wurde ein nationaler Zertifikatehandel ab 2021 eingerichtet, bis 2025 mit Festpreisen (25 ... 55 Euro/t CO<sub>2e</sub>). Diesem BEHG unterliegen alle In-Verkehr-Bringer der Brennstoffe Benzin, Diesel, Heizöl, Flüssiggase, Erdgas, soweit die jeweiligen Emissionen nicht vom EU-Emissionshandel erfasst sind. Ab 2026 regelt eine Versteigerung der Zertifikate deren Preis. Ab 2023 sollen auch Festbrennstoffe einbezogen werden.

#### *Zusammenfassung:*

Der weltweite Energiebedarf ist bedingt, um v. a. unsere menschlichen Grundbedürfnisse zu erfüllen, die Bereitstellung von Trinkwasser, Nahrungsmittel, Wärme und Kraft. Allerdings sind die fossilen Energievorräte begrenzt, so dass erneuerbare Quellen zunehmend erschlossen werden. Ihr Volatilität macht Probleme, weshalb alternativ auch die Nutzung der Kernkraft weltweit vorangetrieben wird, die ihrerseits auf Grund der Radioaktivität Gefahren im Betrieb und bei der Endlagerung mit sich bringt. Eng verbunden mit der Begrenzung bestimmter Energievorräte ist die Begrenzung der Nahrungsmittelproduktion sowie der Trinkwassergewinnung, v. a. angesichts der rasant zunehmenden Weltbevölkerung, und ist von fundamentaler Relevanz für die Menschheitsfamilie. Bedingt durch diese steigende Zahl an zu versorgenden Menschen und unseren steigenden Komfortanspruch erfolgt derzeit weiterhin die intensive Nutzung fossiler Energieträger für Wärme, Verkehr, el. Strom. Sie wird in vielen Ländern, z. B. *VR China*, noch erweitert. Diese Nutzung, aber auch andere Faktoren wie z. B. Entwaldung, Massentierhaltung, etc. setzen große Mengen Treibhausgase frei, was infolge globaler Luft- und Meerereswärmung zur Klimaveränderung beiträgt. Deshalb gibt es weltweit in der Energietechnik Anstrengungen zur Entwicklung z. B. von Energiegroßspeichern oder die Erforschung der Kernfusion, um dem entgegen zu steuern. Weiter zeigt die sich ständig intensivierende Nutzung der endlichen Rohstoffvorkommen (z. B. der Metalle) das dringende Erfordernis der vermehrten Nutzung von Recyclingverfahren.