

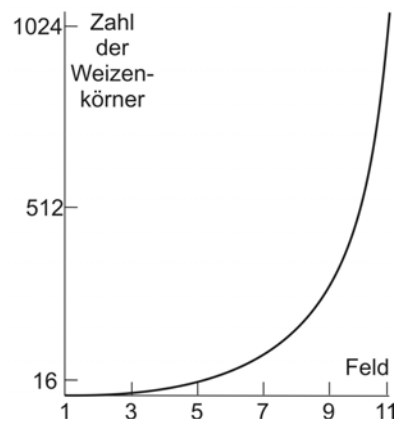
2. Wachstum, Rückkopplung und Vernetzung

oder Wir leben in einer komplexen Welt

Das Fundament der Wahrheit liegt in der Verknüpfung.
(G. W. Leibniz)

Ein indischer König soll von einem Schachspiel, das ein weiser Brahmane bei ihm eingeführt hatte, so begeistert gewesen sein, dass er dem Brahmanen die Erfüllung eines Wunsches zusagte. Dieser erbat sich ein Weizenkorn für das erste, zwei für das zweite, vier für das dritte Feld des Schachbrettes. Kurz: Jedes folgende Feld sollte mit doppelt so vielen Körnern wie das vorangegangene Feld belegt werden. Dem König erschien diese Bitte in Unkenntnis von Wachstumsgesetzen fast bescheiden und er sagte deren Erfüllung zu. Bild 2.1 zeigt die Unerfüllbarkeit dieses Wunsches.

1	2	4	8	16	32	64	128
256	512	...					2^{15}
							2^{23}
							2^{31}
							2^{39}
							2^{47}
							2^{55}
						...	2^{63}



2.1 Das indische Schachbrettmärchen. Im 64. Feld liegen $2^{63} = 9,223 \cdot 10^{18} = 9,223$ Billionen Körner. Im Jahr 2003 lag die Weizenernte bei 590 Mio. t. Die gesamte Weltgetreideproduktion betrug etwas über 2 Mrd. t, davon entfielen jeweils etwa 30 % auf Mais, Reis und Weizen. Ein Weizenkorn hat die Masse von 0,4 mg. Somit enthält das 64. Feld 37 Mrd. t Weizen, das 63fache der derzeitigen Weltjahresproduktion.

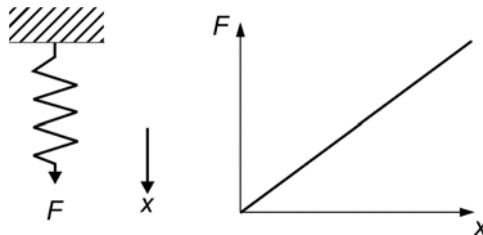
Ähnliche Wachstumsgesetze finden wir sehr häufig. Stellen wir uns vor, eine Seerose würde so rasch wachsen, dass sich ihre Fläche täglich verdoppele. Frage: Wann bedecken die Seerosen den Teich vollständig, wenn es bis zur halben Abdeckung 30 Tage gedauert hat? Antwort: Am 31. und nicht am 60. Tag! Trotz unse-

rer mehr oder weniger intensiven mathematischen Vorbildung haben wir große Probleme, uns derartige Wachstumsprozesse vorzustellen. Der Grund liegt darin, dass wir gedanklich stets linearisieren. Aus diesem Grunde werden wir uns zu Beginn dieses Kapitels den Phänomenen *Linearität* und *Nichtlinearität* zuwenden und anschließend typische Wachstumsgesetze diskutieren. Dabei werden wir viele Überraschungen erleben und erkennen, dass das Verständnis von Wachstumsgesetzen ein entscheidender Schlüssel für die weiteren Kapitel darstellt. Dies wird schon in dem folgenden Kapitel Bevölkerungsdynamik deutlich werden.

2.1 Linearität und Nichtlinearität

Mitunter sieht man auf Wochenmärkten auch heute noch Federwaagen, mit denen Händler das Gewicht ihrer Waren bestimmen. Die Auslenkung der Federwaage ist dabei ein Maß für das angebrachte Gewicht. Wird das Gewicht verdoppelt, so verdoppelt sich auch die Auslenkung. Einen derartigen Zusammenhang nennt man linear und wir erkennen daran das Wesen der Linearität: Eine Verdopplung der Ursache verdoppelt deren Wirkung.

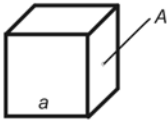
Bild 2.2 zeigt als Beispiel eine Schraubenfeder, die durch eine Kraft F belastet wird. Die Auslenkung x der Feder wächst in gleicher Weise wie die Federkraft F ; F und x sind einander direkt proportional (das Zeichen $\sim$ bedeutet proportional). Die Steigung der Geraden in dem Diagramm wird durch die Federkonstante c festgelegt. Eine härtere Feder besitzt eine steilere Kennlinie; bei einer weicheren Feder ist die Gerade weniger steil. Lineares Verhalten ist charakteristisch für kleine Abweichungen von einem Gleichgewichtszustand, Ursache und Wirkung sind dann einander direkt proportional. Je größer die Abweichungen werden, umso mehr werden nichtlineare Effekte bedeutsam.



2.2 Die Auslenkung einer Feder als lineares Beispiel. Die Kraft F ist gleich dem Produkt aus Federkonstante c und Auslenkung x ; d. h. $F = c \cdot x \sim x$.

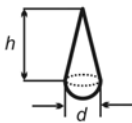
Der vermutlich historisch älteste Hinweis auf einen nichtlinearen Zusammenhang stammt von Galilei anlässlich seiner Untersuchungen über die Tragfähigkeit eines Balkens, siehe hierzu Bild 1.3 und die dortigen Erläuterungen. Mit den Beispielen in Bild 2.3 soll verdeutlicht werden, warum man bei bloßer geometrischer Vergrößerung oder Verkleinerung keine gigantischen Mücken oder winzige Elefanten „konstruieren“ kann oder warum Bäume nicht in den Himmel wachsen.

1. Beispiel: Flächenpressung eines Würfels



$$p = \frac{G}{A} = \frac{m \cdot g}{a^2} = \frac{\rho \cdot a^3 \cdot g}{a^2} \\ = \rho \cdot a \cdot g \sim a$$

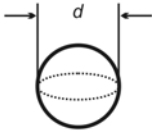
2. Beispiel: Flächenpressung eines „Baumes“



Mit $V = \frac{1}{3} A \cdot h = \frac{c}{3} A \cdot d$ und $c = \frac{h}{d}$ folgt

$$p = \frac{G}{A} = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{A} = \frac{1}{3} \rho \cdot g \cdot h = \frac{c}{3} \rho \cdot g \cdot d \sim h \sim d$$

3. Beispiel: Wärmehaushalt einer „Maus“

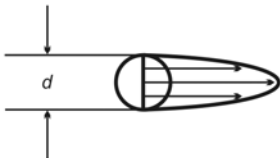


$$\text{Wärmeproduktion} \sim V \sim d^3$$

$$\text{Wärmeabgabe} \sim A \sim d^2$$

$$\frac{\text{Wärmeabgabe}}{\text{Wärmeproduktion}} \sim \frac{1}{d}$$

4. Beispiel: Rohrströmung, Blutkreislauf



	„Verkalkung“			„Sport“	
d	0,5	0,9	1	1,1	1,5
$\dot{V}$	0,06	0,66	1	1,46	5,06

5. Beispiel: Fahrgeschwindigkeit eines PKW

$$F \sim v^2$$

$$P = F \cdot v \sim v^3$$

$$\text{oder } v \sim \sqrt[3]{P}$$

P	1	2	3	8
v	1	1,26	1,44	2

2.3 Beispiele zur Erläuterung nichtlinearer Zusammenhänge

Betrachten wir einen Würfel mit der Kantenlänge a , der mit seinem Gesicht G die Unterlage belastet, auf der er ruht. Wir fragen nach dem Druck p , der zwischen dem Würfel und der Unterlage herrscht. Dieser Druck wird Flächenpressung genannt, er ist gleich dem Gewicht G dividiert durch die Auflagefläche A . Das Gewicht G ist gleich der Masse m multipliziert mit der Erdbeschleunigung g , die Masse m ist das Produkt aus der Dichte ρ und dem Volumen V . Daraus folgt, dass die Flächenpressung p proportional der Kantenlänge a ist und somit unbe-

schränkt mit a anwächst. Ein sehr großer Würfel würde durch sein Eigengewicht zerbrechen, wenn die Flächenpressung die materialabhängige maximale Druckfestigkeit übersteigt.

Man mag einwenden, dass die geschilderten Verhältnisse bei einem weniger einfachen Körper als dem Würfel anders sein könnten. Hierzu wird als zweites Beispiel ein Baum durch einen Kegel mit konstantem Verhältnis von Höhe h zu Durchmesser d am Fußpunkt dargestellt. Das Kegelvolumen ist gleich der Grundfläche A mal der Höhe h dividiert durch 3. Damit folgt analog zum ersten Beispiel die Aussage, dass die Flächenpressung p der Höhe h oder dem Durchmesser d proportional ist. Beiden Beispielen ist gemeinsam, dass das Gewicht mit der dritten Potenz, aber die Bezugsfläche nur mit der zweiten Potenz der Körperabmessung wächst. Der Quotient aus beiden, die Flächenpressung, ist somit proportional zur Körperabmessung und wächst mit dieser unbeschränkt an. Das ist freilich nicht der einzige Grund dafür, warum Bäume nicht in den Himmel wachsen. Auch die Fähigkeit, mit Hilfe der Kapillarwirkung hoch gelegene Äste aus dem Boden mit Nährstoffen zu versorgen, nimmt mit wachsender Baumhöhe ab.

Die Aussage der ersten beiden Beispiele lässt sich auf die Frage nach der maximalen Berghöhe auf verschiedenen Planeten anwenden. Wir erkennen, dass der Basisdruck (die Flächenpressung) am Fuße eines Berges der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ proportional ist. Die Erdbeschleunigung ist durch die Masse der Erde und deren Durchmesser eindeutig festgelegt. Andere Planeten wie etwa der Mars haben ihre eigene spezifische „Marsbeschleunigung“, diese liegt bei 37 % der Erdbeschleunigung. Also erlaubt der Mars höhere Berge als die Erde. Die höchste Erhebung auf dem Mars ist der Olympus Mons, ein erloschener Vulkan, mit etwa 26 km Höhe; der Mount Everest als höchster Berg der Erde ist 8,8 km hoch.

Das dritte Beispiel stellt eine Umkehrung der vorausgegangenen dar. Wir wollen damit die Frage beantworten, warum es in der Natur eine Mindestgröße für Warmblüter wie Säugetiere oder Vögel geben muss. Hierfür stellen wir uns eine Maus vereinfacht als Kugel mit dem Durchmesser d vor. Um eine bestimmte Körpertemperatur aufrechtzuerhalten, muss der Körper für das Verbrennen aufgenommener Nahrung sorgen. Dieser Vorgang der Umwandlung von Energie aus der Nahrung in Wärmeenergie ist dem Körpervolumen V und damit der dritten Potenz der Körperabmessung d proportional. Die Abgabe der Körperwärme nach außen erfolgt über die Kugeloberfläche A , diese ist dem Quadrat von d proportional. Damit wird das Verhältnis von Wärmeabgabe zu Energieumwandlung im Inneren proportional zu dem Kehrwert der Körperabmessung d und folglich mit kleiner werdendem Körper immer ungünstiger. Es hat also energetische Gründe, warum es in der Natur keine sehr kleinen Warmblüter gibt. Bei sehr großen Tieren gibt es das umgekehrte Problem des Wärmestaus. So dienen die großflächigen Ohren des Elefanten der Wärmeabgabe.

Das vierte Beispiel hat mit dem menschlichen Körper zu tun. Es ist ein bekanntes Beispiel aus der Strömungsmechanik, dass bei einer (laminaren) Strömung durch ein Rohr die durchfließende Menge, ausgedrückt durch den Volumenstrom $\dot{V}$ (= Volumen pro Zeit, der Punkt auf dem Symbol $\dot{V}$ bedeutet pro Zeiteinheit),

der vierten Potenz des Rohrdurchmessers d proportional ist. Das bedeutet, dass schon geringe Veränderungen des Durchmessers zu drastischen Veränderungen des Volumenstromes führen. Eine Zunahme des Durchmessers von 10 (bzw. 50) % führt zu einer Zunahme des Volumenstromes um 46 (bzw. 406) %! Dieser Effekt wird vom menschlichen Körper bei einer starken körperlichen Anstrengung ausgenutzt. Die Adern weiten sich und erhöhen damit den Blutdurchsatz. Das Gegenteil, nämlich eine Verringerung des Durchmessers, tritt bei der Arterienverkalkung auf. Eine Verringerung des Durchmessers auf 90 (bzw. 50) % des ursprünglichen Wertes führt zu einem Volumenstrom, der nur noch 66 (bzw. 6) % des ursprünglichen Wertes beträgt!

Im letzten Beispiel wird ein PKW betrachtet, dessen Fahrgeschwindigkeit v variiert werden soll. Der Fahrwiderstand F setzt sich aus dem bei schneller Fahrt dominierenden Luftwiderstand und dem Rollwiderstand zusammen und er ist näherungsweise proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit v . Die zur Überwindung des Fahrwiderstandes notwendige Leistung P ist gleich dem Produkt aus F und v und somit proportional zur dritten Potenz der Geschwindigkeit. Das bedeutet: Eine Verdopplung der Motorleistung erhöht die Geschwindigkeit um 26 %, eine Verdreifachung um 44 % und erst eine Vervierfachung der Leistung würde zu einer Verdopplung der Geschwindigkeit führen. Dies sei an einem konkreten Fall verdeutlicht. Ein PKW erreiche mit einem 45-kW-Motor eine Geschwindigkeit von 160 km/h. Eine Verdopplung der Leistung auf 90 kW würde die Endgeschwindigkeit nur um 26 % erhöhen, also auf etwa 200 km/h. Eine Verdopplung der Geschwindigkeit von 160 auf 320 km/h würde eine achtfache Leistung, somit 360 kW erfordern!

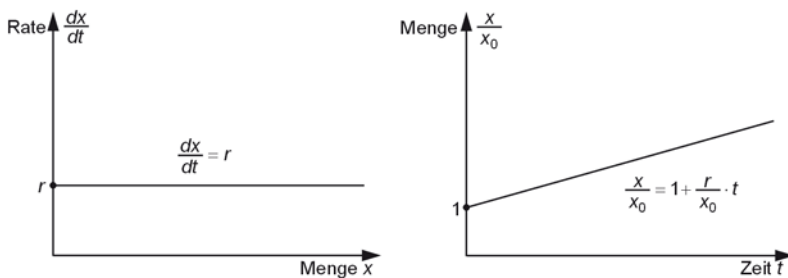
2.2 Wachstumsgesetze

Wenn man Entwicklungen analysieren und beeinflussen will, muss man wissen, wie sich Größen zeitlich verhalten. Manche sind gutmütig, andere nicht. Es ist wichtig, sich klar zu machen, dass das dynamische Verhalten von Wachstumsgrößen qualitativ verschieden sein kann, und dass sich daraus drastische Konsequenzen ergeben. Die zeitliche Veränderung dynamischer Größen setzt sich aus einem Wachstums- und einem Abnahmeanteil zusammen. So wird etwa die Entwicklung der Weltbevölkerung von der Geburten- und der Sterberate bestimmt.

Wir beschränken uns zunächst auf das Wachstum und wollen uns unter der Menge x ein verzinsliches Kapital, die Weltbevölkerung, das Bruttosozialprodukt eines Landes, dessen Energieverbrauch, die Zahl der Verkehrsunfälle pro Jahr oder die Verschuldung eines Entwicklungslandes vorstellen. Bei abnehmenden Mengen x können wir an nicht nachwachsende Rohstoffe, an Primärenergieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas, an Siedlungsraum oder an landwirtschaftlich nutzbare Flächen denken. Mit dieser Aufzählung wird der Bezug zur *Herausforderung Zukunft* deutlich. Das Verständnis von *Wachstum* (und *Abnahme*) ist von zentraler Bedeutung. Man kann Wachstum auf zweierlei Arten beschreiben und darstellen:

- Durch die Änderung der Menge x in Abhängigkeit von der Zeit t . Wir sagen, die Menge x ist eine Funktion der Zeit t , schreiben kurz $x = f(t)$ und bezeichnen dies als *Wachstumsgesetz*.
- Durch die Änderung der Wachstumsgeschwindigkeit dx/dt (der zeitlichen Änderung von x , genannt Rate) in Abhängigkeit von der Menge x . Wir schreiben kurz $dx/dt = F(x)$ und bezeichnen dies als *Ratenansatz*.

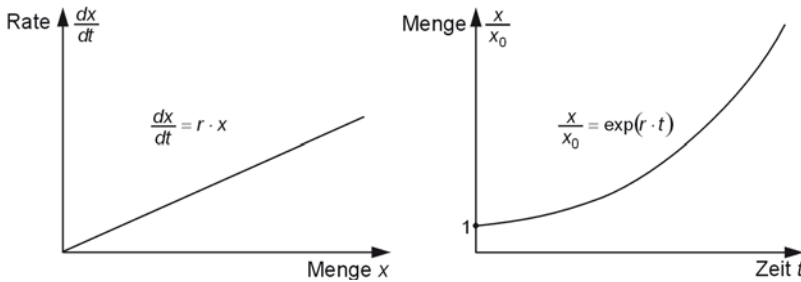
Der mathematisch Kundige erkennt sofort, dass beide Beschreibungen über die Operationen Integration bzw. Differenziation miteinander verknüpft sind. Aus dem Ratenansatz folgt durch Integration das Wachstumsgesetz (die integrale Zunahme der Menge). Aus dem Wachstumsgesetz folgt durch Differenziation der Ratenansatz (die differenzielle zeitliche Änderung der Menge). Anhand der folgenden Darstellungen werde ich versuchen, diese Verknüpfungen zu veranschaulichen. In den Bildern ist jeweils links der Ratenansatz und rechts das Wachstumsgesetz dargestellt. Dabei wollen wir typische Fälle unterscheiden und beginnen mit dem *linearen Wachstum*, Bild 2.4.



2.4 Lineares Wachstum. Die Rate $dx/dt = r$ ist konstant. Nach Integration folgt $\int dx = r \int dt + C$ oder $x = r \cdot t + C$. Die Integrationskonstante C wird mit $x(t=0) = x_0$ zu $C = x_0$, dabei ist x_0 die Anfangsmenge zur Zeit $t = 0$. Es folgt ein lineares Wachstumsgesetz $\frac{x}{x_0} = 1 + \frac{r}{x_0} \cdot t$.

Bei konstanter Rate ist die Zunahme der Menge x unabhängig von der Menge selbst. Das führt zu einer linearen Zunahme der Menge, welche der Zeit t proportional ist. In gleichen Zeitabständen Δt wächst die Menge x um gleiche Beträge Δx an. Bei Vergrößerung der Wachstumsrate r würde die Gerade $x(t)$ steiler verlaufen, bei Verkleinerung flacher. In der Natur kommt lineares Wachstum selten vor. Beispiele sind näherungsweise das Anwachsen einer Oxidschicht oder Eisschicht.

Im zweiten Fall behandeln wir das *exponentielle Wachstum*. Das führt uns zu dem wichtigsten Wachstumsgesetz überhaupt, Bild 2.5.



2.5 Exponentielles Wachstum. Die Rate wächst linear mit der Menge an. Aus dem Ansatz $dx/dt = r \cdot x$ folgt nach Integration $\int dx/x = r \cdot \int dt + C$ oder $\ln x = r \cdot t + C$. Die Integrationskonstante C wird wegen $x(t=0) = x_0$ zu $C = \ln x_0$ und wir erhalten $\ln x - \ln x_0 = \ln \frac{x}{x_0} = r \cdot t$. Nach Endlogarithmierung folgt das exponentielle Wachstumsgesetz $\frac{x}{x_0} = \exp(r \cdot t)$.

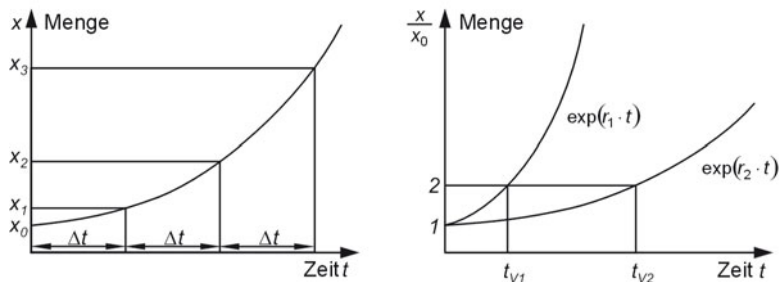
Wachstumsgesetze dieser Art treten sehr häufig auf: Die Zunahme der Bevölkerung ist der Bevölkerungsmenge direkt proportional, der Zuwachs des Kapitals infolge Verzinsung ist dem eingesetzten Kapital proportional. Letztere Aussage würde nur bei kontinuierlicher Verzinsung zutreffen, tatsächlich verzinsen die Geldinstitute jedoch diskontinuierlich.

Exponentielles Wachstum bedeutet, dass die Rate linear mit der Menge x anwächst. Je mehr Menschen x vorhanden sind, umso mehr werden geboren und umso mehr sterben in einer Zeiteinheit. In der Regel werden die Geburtenrate b (von birth) und die Sterberate d (von death) auf ein Jahr bezogen, ebenso wie die Wachstumsrate $r = b - d$. Im Vorgriff auf Kapitel 3 seien zur Anschauung typische Werte angegeben. Die meisten Industrieländer haben Wachstumsraten unter 1 % (pro Jahr), Deutschland hat derzeit ein negatives Wachstum, also eine Abnahme der Bevölkerung. Etliche Entwicklungsländer haben Wachstumsraten von etwa 2 bis teilweise 3 %.

Der Vergleich beider Fälle verdeutlicht anschaulich den mathematischen Zusammenhang zwischen den Darstellungen Ratenansatz und Wachstumsgesetz. Der Ratenansatz stellt die Geschwindigkeit dar, mit der sich die Menge x zeitlich ändert. Ist die Änderung konstant, so muss der Anstieg (mathematisch die erste Ableitung) der Kurve $x = f(t)$ konstant sein, erster Fall. Im zweiten Fall nimmt die Geschwindigkeit, mit der sich die Menge x zeitlich ändert, mit der Menge selbst zu. Damit muss der Anstieg der Kurve $x = f(t)$ mit wachsender Menge und mit zunehmender Zeit selbst anwachsen. Die Wachstumskurve $x = f(t)$ wird immer steiler.

Da das exponentielle Wachstum eine herausragende Rolle spielt, wollen wir die Diskussion darüber mit Bild 2.6 noch ein wenig vertiefen. Es ist $x_1/x_0 = x_2/x_1 = x_3/x_2$ usw., somit wächst die Menge x in gleichen Zeitabständen Δt um den gleichen Faktor an (beim linearen Wachstum dagegen um den

gleichen Betrag Δx). Von besonderer Bedeutung ist die Verdopplungszeit t_v : Nach welcher Zeit hat sich ein Anfangswert x_0 verdoppelt, ist also aus x_0 der Wert $2x_0$ geworden? Wegen $\ln 2 = 0,693 = r \cdot t_v$ gilt $t_v \approx 70$ geteilt durch den Wachstumsparameter r in Prozent: $t_v \approx 70/r$, dabei r in % einsetzen. Eine konstante Zunahme der Bevölkerung von 2 % pro Jahr (dieser Wert ist für einige Entwicklungsländer realistisch) würde zu einer Verdopplungszeit von 35 Jahren führen.



2.6 Erläuterung des exponentiellen Wachstums

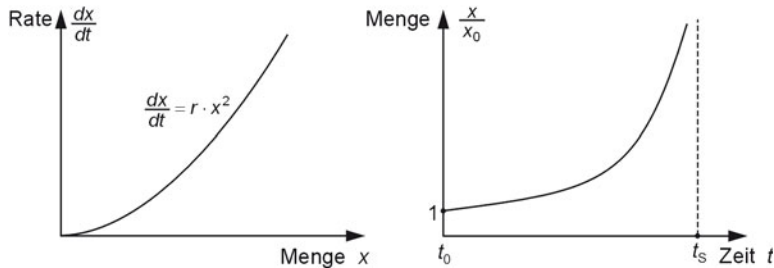
Bei dem in Bild 2.1 dargestellten indischen Schachbrettmärchen liegt exponentielles Wachstum vor. An die Stelle der Zeit tritt jedoch dort das Vorwärtsschreiten von Feld zu Feld. Bei jedem Schritt findet eine Verdopplung statt. In Tabelle 2.1 ist ein analoges Beispiel dargestellt, das nach dem gleichen Wachstumsgesetz abläuft. Frage: Welche Dicke erhält man, wenn ein Blatt Papier der Stärke $s = 0,1$ mm fünfzigmal gefaltet wird? Die Antwort ist überraschend! Aus diesem Grund werden wir später mit Bild 2.11 erneut auf unsere fehlende Sensibilität für exponentielles Wachstum eingehen.

Tabelle 2.1: Dickenwachstum beim Papierfalten als Beispiel für exponentielles Wachstum. Das Wachstumsgesetz lautet $x_{N+1} = 2 \cdot x_N$. Nach 50 Faltungen und einer Papierstärke von 0,1 mm erhält man eine Dicke von etwa 10^{14} mm = 10^8 km. Das entspricht dem 10.000fachen des Erddurchmessers.

Gefaltet	Dicke/Stärke
1×	$2^1 = 2$
10×	$2^{10} = 1,024 \cdot 10^3$
20×	$2^{20} = 1,049 \cdot 10^6$
30×	$2^{30} = 1,074 \cdot 10^9$
40×	$2^{40} = 1,100 \cdot 10^{12}$
50×	$2^{50} = 1,126 \cdot 10^{15}$

Im dritten Fall untersuchen wir das *hyperbolische Wachstum*, Bild 2.7. Bei exponentiellem Wachstum strebt die Menge x erst nach unendlich langer Zeit gegen

unendlich. Bei dem hyperbolischen Wachstum tritt die Katastrophe schon nach endlicher Zeit ein. So nennt man ein Wachstumsgesetz, bei dem die Rate stärker als bei dem linearen Ratenansatz im zweiten Fall anwächst. Wir nehmen hier eine quadratische Zunahme der Zuwachsrates mit der Menge an. Man bezeichnet dieses Anwachsen als hyperbolisch, teilweise auch als überexponentiell oder superexponentiell. Die Zeitspannen, in denen sich die Menge verdoppelt, werden immer kürzer. Hyperbolisches Wachstum führt in biologischen Systemen beim Überschreiten einer Grenze zwangsläufig zu einer Katastrophe.



2.7 Hyperbolisches Wachstum. Die Rate soll quadratisch mit der Menge anwachsen. Die Integration ergibt $\int \frac{dx}{x^2} = r \int dt + C$, damit $-\frac{1}{x} = rt + C$. Die Integrationskonstante C wird wegen $x(t=t_0) = x_0$ zu $C = -(rt_0 + 1/x_0)$ und es folgt $\frac{x}{x_0} = \frac{1}{1 - rx_0(t-t_0)}$. Dieser Ausdruck geht für $rx_0(t-t_0) = 1$ gegen unendlich, die dazugehörige Zeit nennen wir t_s (S = Singularität): $t_s = t_0 + \frac{1}{rx_0}$.

Die im Bild dargestellte hyperbolische Funktion strebt schon für endliche Zeiten gegen unendlich große Werte. Man nennt die Stelle, an der die Funktion im Unendlichen verschwindet, eine Singularität. Der Index S soll auf die Singularität hindeuten. Der hier angenommene Ratenansatz $\frac{dx}{dt} = r \cdot x^2$ spielt in der Ökosystemforschung eine Rolle. So haben Sardinen und ähnliche Fischarten es schwer, sich bei kleiner Populationsdichte x zu vermehren. Ihre Fortpflanzungschancen werden mit steigender Dichte immer besser bis zu einem Niveau, auf dem die Überbevölkerung ihre Fortpflanzung wieder hemmt. Aus diesem Grund werden bei niedrigen Populationsdichten Wachstumsgesetze dieser Art beobachtet.

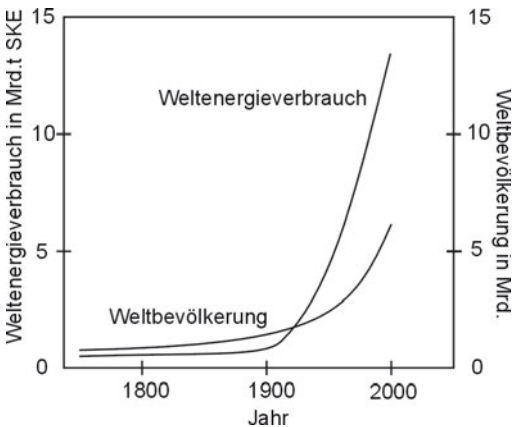
Je größer der Wachstumsparameter r ist, desto früher wird die Singularität erreicht. Bei hyperbolischem Wachstum wird die Verdopplungszeit ständig kleiner. Ein derartiges Wachstum kann die Natur bestenfalls über einen bestimmten Zeitraum aufrechterhalten. Irgendwann müssen andere Wachstumsgesetze greifen, siehe Bild 2.10.

Beispielhaft zeigt Tabelle 2.2 im Vorgriff auf Kapitel 3 die Entwicklung der Weltbevölkerung. Wir sehen, dass die Verdopplungszeit durch entsprechende Wachstumsschübe zunächst drastisch abgenommen hat (was hyperbolisches Wachstum bedeutet) und erst in jüngerer Zeit wieder langsam ansteigt. Aus der Verdopplungszeit lässt sich eine mittlere Wachstumsrate ermitteln, wenn man exponentielles Wachstum unterstellen würde.

Tabelle 2.2: Entwicklung der Weltbevölkerung

	Weltbevölkerung	Verdopplungszeit	Wachstumsrate	+ 1 Mrd. nach
8000 v. Chr.	5 Mio.			
Chr. Geburt	250 Mio.			
1600	500 Mio.	1600 J.	0,04 %	
1830	1 Mrd.	230 J.	0,3 %	≈ 1 Mio.
1890	1,5 Mrd.			
1930	2 Mrd.	100 J.	0,7 %	100
1950	2,5 Mrd.			
1960	3 Mrd.	70 J.	1,0 %	30
1974	4 Mrd.	44 J.	1,6 %	14
1987	5 Mrd.	37 J.	1,9 %	13
1999	6 Mrd.	39 J.	1,8 %	12 Jahren

Die Aussagen der Tabelle 2.2 sollen mit Bild 2.8 verdeutlicht werden. Dieses zeigt die Entwicklung der Weltbevölkerung und des Weltenergieverbrauchs seit der industriellen Revolution. Während die Weltbevölkerung von 1900 bis 2000 „nur“ um das gut 3,5fache (von 1,65 auf gut 6 Mrd.) angewachsen ist, so ist der Primär-energieverbrauch in dem gleichen Zeitraum um das 13fache gewachsen! Er betrug 1900 etwa 1 Mrd. t SKE, im Jahr 2000 lag er bei 13 Mrd. t SKE. SKE heißt Steinkohleneinheit, auf die die anderen Primärenergieträger wie Braunkohle, Erdöl, Erdgas zu Vergleichszwecken umgerechnet werden. Darauf werden wir in Kapitel 4 gesondert eingehen.



2.8 Weltbevölkerung und Weltenergieverbrauch seit der industriellen Revolution



<http://www.springer.com/978-3-642-41885-3>

Herausforderung Zukunft

Technischer Fortschritt und Globalisierung

Jischa, M.F.

2005, XII, 280 S. 55 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-642-41885-3