Taylorreihen

Stefan Boresch

Department of Computational Biological Chemistry
Faculty of Chemistry
University of Vienna

November 23, 2011

Reihen

Unter einer Reihe versteht man eine Summe

$$s_n = \sum_{i=0}^{n} a_i = a_0 + a_1 + \ldots + a_n$$

Dabei gehorchen die Summanden einem bestimmten Gesetz. Zwei Beispiele:

- Arithmetische Reihe (einfachster Fall[1]):

$$s_n = \sum_{i=0}^{n} i = 0 + 1 + 2 + \ldots + n$$

- Geometrische Reihe: Der Quotient $q = a_{i+1}/a_i$ zweier aufeinanderfolgender Glieder ist konstant. Z.B.

$$s_n = \sum_{i=0}^{n} q^i = 1 + q + q^2 + \ldots + q^n$$

Da n sehr groß werden kann, ist es "angenehm", wenn es für eine Reihe eine Vorschrift zur Berechnung ihres Werts gibt, ohne daß man n Terme aufsummieren muß. Das kann i.A. schwierig (oder unmöglich sein), für die beiden gezeigten Beispiele kommt man jedoch mit folgenden, Ihnen vielleicht bekannten Tricks zum Ziel.

[1] Für die allgemeine arithmetische Reihe gilt, daß die Differenz zweier aufeinanderfolgender Glieder konstant ist, d.h. $a_{i+1} - a_i = d =$ const

Arithmetische Reihe

Man schreibt die Glieder der Reihe einmal in normaler Reihenfolge, danach in umgekehrter Reihenfolge auf, und summiert die beiden Reihen, d.h.

$$\begin{array}{llllll} s_n & = 0 + & 1 & + \ldots + n & & \\ s_n & = n + & n-1 & + \ldots + 0 & & \\ \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots & & \\ 2s_n & = n + & n & + \ldots + n & = n\,(n+1) & \end{array}$$

Somit ergibt sich die Summe der (einfachsten) arithmetischen Reihe als

$$s_n = \frac{n\,(n+1)}{2}$$

Geometrische Reihe

Man bildet das Produkt $q\,s_n$ und subtrahiert dieses von s_n.

$$\begin{array}{rcccccccccc}
s_n = 1 & + & q & + & q^2 & + & \dots & + & q^n & & \\
-q\,s_n = & - & q & - & q^2 & - & \dots & - & q^n & - & q^{n+1} \\
\dots\dots\dots & & & & & & & & & & \\
s_n - q\,s_n = 1 & & & & & & & & & - & q^{n+1}
\end{array}$$

Aus dem Ergebnis dieser Subtraktion kann man sich s_n ausdrücken und findet für die Summe der geometrischen Reihe

$$s_n = \frac{1-q^{n+1}}{1-q} = \frac{q^{n+1}-1}{q-1}$$

Das Finden von s.g. geschlossenen Ausdrücken für die Summe von Reihen ist i.a. nichttrivial und bedarf jeder Menge Tricks. Falls Sie so etwas jemals brauchen, die beste Kompilation die ich kenne finden Sie in *Graham, Knuth & Patashnik, "Concrete Mathematics", Addison-Wesley (Pearson Education)*.

Unendliche Reihen

Wie wir in Kürze an einer Anwendung sehen werden, sind *unendliche* Reihen

$$\lim_{n\to\infty} \sum_{i=0}^{n} a_i = \sum_{i=0}^{\infty} a_i = a_0 + a_1 + a_2 + \ldots \text{ unendlich viele Terme}$$

von großer Wichtigkeit. Für die Anwendbarkeit solcher Reihen ist es in der Regel essentiell, daß die Summe (d.h., der Grenzwert $n \to \infty$) *endlich* bleibt. In diesem Fall spricht man von einer *konvergenten* Reihe. Strebt die Reihensumme gegen $\pm\infty$, so *divergiert* die Reihe.

Das Untersuchen des Konvergenzverhaltens unendlicher Reihen sprengt den Rahmen dieser Vorlesung, und wir wollen nur die beiden schon gebrachten Beispiele untersuchen. In diesem Fall tun wir uns leicht(er), da es geschlossene Ausdrücke für die Reihensumme gibt (was i.a. nicht der Fall ist).

1. Arithmetische Reihe. Es gilt (im einfachsten Fall)

$$s_n = n\,(n+1)/2$$

somit interessiert uns

$$\lim_{n\to\infty} s_n = \lim_{n\to\infty} n\,(n+1)/2$$

welcher offensichtlich gegen unendlich strebt, d.h., die unendliche arithmetische Reihe divergiert.

Die unendliche geometrische Reihe

2. Geometrische Reihe. Wir untersuchen

$$\lim_{n\to\infty} s_n = \lim_{n\to\infty} \frac{q^{n+1}-1}{q-1}$$

Der einzige Term, der von n abhängt ist q^{n+1} im Nenner, wir betrachten den Grenzwert q^{n+1}, $n \to \infty$ etwas genauer:

a) Für $q > 1$, $n \to \infty$ wächst q^{n+1} über alle Maßen.

b) Für $q < -1$, $n \to \infty$ wächst q^{n+1} betragsmäßig über alle Maßen, wobei das Vorzeichen fluktuiert, je nachdem $n+1$ gerade oder ungerade ist.

Jedenfalls divergiert in beiden Fällen die unendliche geometrische Reihe.

c) Für $|q| < 1$ hingegen gilt $\lim_{n\to\infty} q^{n+1} \to 0$. In diesem Fall existiert der Grenzwert

$$\lim_{n\to\infty} s_n = \lim_{n\to\infty} \frac{q^{n+1}-1}{q-1} = \lim_{n\to\infty} \frac{1}{1-q} \qquad |q| < 1$$

d) Für $q = 1$ ist $\lim_{n\to\infty} q^{n+1} = 1$, was für s_n auf den unbestimmten Ausdruck $0/0$ führt. Aus der ursprünglichen Reihe ist jedoch sofort ersichtlich, daß diese für $q = 1$, $n \to \infty$ divergiert.

e) Schließlich, für $q = -1$ existiert $\lim_{n\to\infty} q^{n+1}$ nicht (in Abhängigkeit von n oszilliert der Wert von q^{n+1} zwischen $+1$ und -1).

Funktionen als Reihen ...

Uns geht es jetzt weniger um die Grenzwertbetrachtungen. Ersetzt man q durch x, so kann man für $|x| < 1$ folgende verblüffende Beziehung anschreiben:

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \ldots = \sum_{i=1}^{\infty} x^i,$$

d.h., man kann eine Funktion (zumindestens in einem Teil Ihres Definitionsbereichs) auch als unendliche Reihe anschreiben.

Funktionen als Reihen ...

Uns geht es jetzt weniger um die Grenzwertbetrachtungen. Ersetzt man q durch x, so kann man für $|x| < 1$ folgende verblüffende Beziehung anschreiben:

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \ldots = \sum_{i=1}^{\infty} x^i,$$

d.h., man kann eine Funktion (zumindestens in einem Teil Ihres Definitionsbereichs) auch als unendliche Reihe anschreiben.

Anmerkung zur Konvergenz: Die obige Reihe ist ein Beispiel einer sogenannten Potenzreihe,

$$\sum_{i=0}^{\infty} a_i x^i = a_0 x^0 + a_1 x^1 + a_2 x^2 + \ldots a_n x^n + \ldots = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \ldots$$

Wie wir am konkreten Beispiel gesehen haben, hängt die Konvergenz von den Werten ab, die die Variable x annehmen kann. Man kann ganz allgemein zeigen, daß es für jede Potenzreihe einen sogenannten *Konvergenzradius* ρ gibt, sodaß die Reihe für $|x| < \rho$ (manchmal auch $|x| \leq \rho$) konvergiert [2]. Im obigen Beispiel ist $\rho = 1$. ρ kann aber auch unendlich werden, in diesem Fall konvergiert die Reihe für beliebige x.

[2] genauer gesagt *absolut* konvergiert, d.h., sogar $\sum_{i=0}^{\infty} \left|a_i x^i\right|$ konvergiert

Funktionen als Reihen ...

Wir betrachten jetzt eine andere (unendliche) Reihe:

$$1 + x + \frac{x^2}{1 \cdot 2} + \frac{x^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \frac{x^4}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} + \ldots = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^i}{i!}$$

(Das Rufzeichen ! bezeichnet die Fakultät, z.B. $5! = 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1$, $0! = 1$).
Differenzieren wir die einzelnen Terme, so finden wir ...

$$0 + 1 + \frac{2x}{1 \cdot 2} + \frac{3x^2}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \frac{4x^3}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} + \ldots = 1 + x + \frac{x^2}{1 \cdot 2} + \frac{x^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \ldots = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^i}{i!}$$

... wieder die Ausgangsreihe (da aus dem unendlichen immer ein Term “nachrückt”).

Funktionen als Reihen ...

Die Ableitung der Exponentialfunktion ist wieder die Exponentialfunktion. Könnte die Reihe der Vorseite eine Darstellung der Exponentialfunktion sein? Bemühen wir den Taschenrechner:

Vergleich e^x mit $1 + x + x^2/2 + x^3/3! + \ldots$

x	exakt (e^x)	$1 + \ldots + \frac{x^3}{3!}$	$1 + \ldots + \frac{x^6}{6!}$	$1 + \ldots + \frac{x^{17}}{17!}$
-3.0	0.04979	-2.00000	0.36250	0.04979
0.1	1.10517	1.10517	1.10517	1.10517
1.1	3.00417	2.92683	3.00372	3.00417
5.2	181.272	43.1547	132.763	181.271

Wenngleich derartige “Zahlenspielchen” keine Beweiskraft haben, so sieht es doch so aus, als ob e^x und $\sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^i}{i!}$ etwas “miteinander zu tun” hätten ......

Potenzreihen — Taylor/MacLaurinentwicklung I

Beide eben besprochenen Reihen

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots \qquad |x| < 1 \qquad (A)$$

und

$$e^x \stackrel{?}{=} 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots \qquad (B)$$

sind Potenzreihen, haben also die Form

$$f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots$$

Im Fall (A) sind die Koeffizienten a_i alle gleich 1 sind, im Fall (B) gilt die Vorschrift $a_i = \dfrac{1}{i!}$.

Potenzreihen — Taylor/MacLaurinentwicklung I

Beide eben besprochenen Reihen

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + \ldots \qquad |x| < 1 \qquad (A)$$

und

$$e^x \stackrel{?}{=} 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \ldots \qquad (B)$$

sind Potenzreihen, haben also die Form

$$f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \ldots$$

Im Fall (A) sind die Koeffizienten a_i alle gleich 1 sind, im Fall (B) gilt die Vorschrift $a_i = \dfrac{1}{i!}$.

Wir fragen uns jetzt, ob wir für eine beliebige Funktion $f(x)$ Koeffizienten a_i bestimmen können, sodaß wir die Funktion als Potenzreihe darstellen können.

Taylor/MacLaurinentwicklung II

Dies geht einfacher als man denkt: Dazu betrachten wir die ersten Ableitungen der postulierten Reihendarstellung der Funktion

$$\begin{array}{lllllll}
f(x) & = a_0 + a_1 x + & a_2 x^2 + & a_3 x^3 & + & a_4 x^4 & + \dots \\
f'(x) & = & a_1 + 2a_2 x + & 3a_3 x^2 & + & 4a_4 x^3 & + \dots \\
f''(x) & = & & 2a_2 & + 3\cdot 2\, a_3 x + & 4\cdot 3\, a_4 x^2 & + \dots \\
f'''(x) & = & & & 3\cdot 2\, a_3 & + 4\cdot 3\cdot 2\, a_4 x & + \dots \\
f^{(4)}(x) & = & & & & 4\cdot 3\cdot 2\, a_4 & + \dots
\end{array}$$

An der Stelle $x = 0$ vereinfachen sich diese Gleichungen immens:

$$\begin{array}{rclcrcl}
f(0) & = & a_0 & \Rightarrow & a_0 & = & f(0) \\
f'(0) & = & a_1 & \Rightarrow & a_1 & = & f'(0) \\
f''(0) & = & 2a_2 & \Rightarrow & a_2 & = & \dfrac{f''(0)}{2} \\
f'''(0) & = & 3\cdot 2\, a_3 & \Rightarrow & a_3 & = & \dfrac{f'''(0)}{3!} \\
f^{(4)}(0) & = & 4\cdot 3\cdot 2\, a_4 & \Rightarrow & a_4 & = & \dfrac{f^{(4)}(0)}{4!}
\end{array}$$

Man erkennt unschwer, daß das allgemeine Bildungsgesetz

$$a_n = \frac{f^{(n)}(x = 0)}{n!}$$

gilt.

Taylor/MacLaurinentwicklung III

Somit erhält man folgende Reihendarstellung

$$f(x) = f(0) + f'(0)x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \frac{f'''(0)}{3!}x^3 + \ldots + \frac{f^{(i)}(0)}{i!}x^i + \ldots = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{f^{(j)}(0)}{j!}x^j$$

Diese Reihendarstellung der Funktion wird als MacLaurinentwicklung (MacLaurinreihe) von $f(x)$ bezeichnet.

Taylor/MacLaurinentwicklung IV

Wir haben bis jetzt insoferne einen (wichtigen) Sonderfall behandelt, als die allgemeinste Form einer Potenzreihe die Form

$$a_0 + a_1(x - x_0) + a_1(x - x_0)^2 + \ldots + a_i(x - x_0)^i + \ldots = \sum_{j=0}^{\infty} a_j(x - x_0)^j$$

hat, wobei x_0 eine beliebige Zahl ist (bis jetzt haben wir also den Spezialfall $x_0 = 0$ betrachtet!) Dementsprechend suchen wir jetzt die Koeffizienten der Reihenentwicklung

$$f(x) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j(x - x_0)^j$$

Verfährt man analog zum $x = 0$ Fall, und betrachtet die Ableitungen der Funktion an der Stelle $x = x_0$, so findet man

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2 + \ldots = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{f^{(j)}(x_0)}{j!}(x - x_0)^j$$

Man bezeichnet diese Reihenentwicklung als Taylorreihe (-entwicklung) um den Entwicklungspunkt x_0. (Die MacLaurinreihe ist somit die Taylorreihe um den Entwicklungspunkt $x_0 = 0$.)

Konvergenzradius

Die Reihendarstellungen von $1/(1-x)$ und e^x gelten wie jede Potenzreihe nur innerhalb des bereits erwähnten Konvergenzradiuses. Im 1. Fall haben wir uns selbst überzeugt, daß die Reihendarstellung nur für $|x| < 1$ gilt. Die Reihe für e^x gilt für alle $x \in \mathbb{R}$, d.h., $\rho = \infty$ (ohne Beweis). Es soll hier nochmals betont werden, daß eine Potenzreihe (und somit auch MacLaurin bzw. Taylorentwicklungen) nur für $x < \rho$ konvergieren, und daher die Reihendarstellung nur in diesem Intervall sinnvoll ist. *Man muß daher im Prinzip für jede Taylorreihe den Konvergenzbereich bestimmen!* Dies übersteigt wieder unseren Zeitrahmen. In den in Folge behandelten Beispielen gebe ich den Konvergenzbereich an; ebenso ist er in Formelsammlungen mit "fertigen" Taylor/MacLaurinreihen immer mitangegeben.

Anmerkung: Genau genommen muß die Reihe $\sum_{j=0}^{\infty} \frac{f^{(j)}(x_0)}{j!}(x-x_0)^j$ nicht nur konvergieren, sie muß sogar *absolut* konvergieren. D.h., daß auch die Reihe

$$\sum_{j=0}^{\infty} \left| \frac{f^{(j)}(x_0)}{j!}(x-x_0)^j \right|$$

konvergent sein muß![3]
ACHTUNG: Verwendung einer Taylorreihe außerhalb des Konvergenzradius ist in etwa so "sinnvoll" wie eine Division durch Null!!!

[3] Reihen, die zwar konvergent, aber nicht absolut konvergent sind, bedürfen besonderer Vorsicht. In solchen Fällen bitte immer an einen Mathematiker Ihres Vertrauens wenden!

MacLaurinreihe von $\sin x$

Es ist an der Zeit für Beispiele: Gesucht ist die MacLaurinreihe

$$\sum_{i=0}^{\infty} a_i x^i \qquad \text{mit} \qquad a_i = \frac{f^{(i)}(0)}{i!}$$

für $\sin x$: Man geht so ein Beispiel am besten tabellarisch an (im Folgenden definieren wir die "nullte" Ableitung einer Funktion als die Funktion selbst, $f^{(0)}(x) = f(x)$).

n	$f^{(n)}(x)$	$f^{(n)}(x=0)$	$a_n = f^{(n)}(x=0)/n!$
0	$\sin x$	0	0
1	$\cos x$	1	1
2	$-\sin x$	0	0
3	$-\cos x$	-1	$-1/3! = -1/6$
4	$\sin x$	0	0
5	$\cos x$	1	$1/5! = 1/120$
6	$-\sin x$	0	0
7	$-\cos x$	-1	$-1/7! = 1/5040$
usw.		...	0

Somit erhält man

$$\sin x = x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{120} - \frac{x^7}{5040} \pm \ldots = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^{2i+1}}{(2i+1)!}$$

Diese Reihendarstellung ist für alle $x \in \mathbb{R}$ gültig ($\rho = \infty$, ohne Beweis).

Als "Hausübung" berechnen Sie bitte die MacLaurinreihen von $1/(1-x)$ sowie e^x!

Taylorreihe von $\sin x$ um $x_0 = \pi/4$

Das Ganze gleich nochmals, diesmal ist jedoch die Taylorreihe

$$\sum_{i=0}^{\infty} a_i (x - x_0)^i \qquad \text{mit} \qquad a_i = \frac{f^{(i)}(x_0)}{i!}, \qquad x_0 = \frac{\pi}{4}$$

gesucht: Wir gehen genauso tabellarisch wie im letzten Beispiel vor:

i	$f^{(i)}(x)$	$f^{(i)}(x = \pi/4)$	$a_i = f^{(i)}(x = \pi/4)/i!$
0	$\sin x$	$\sqrt{2}/2$	$\sqrt{2}/2$
1	$\cos x$	$\sqrt{2}/2$	$\sqrt{2}/2$
2	$-\sin x$	$-\sqrt{2}/2$	$-\sqrt{2}/(2 \cdot 2!) = -\sqrt{2}/4$
3	$-\cos x$	$-\sqrt{2}/2$	$-\sqrt{2}/(2 \cdot 3!) = -\sqrt{2}/12$
4	$\sin x$	$\sqrt{2}/2$	$\sqrt{2}/(2 \cdot 4!) = \sqrt{2}/48$
5	$\cos x$	$\sqrt{2}/2$	$\sqrt{2}/(2 \cdot 5!) = \sqrt{2}/240$
6	$-\sin x$	$-\sqrt{2}/2$	$-\sqrt{2}/(2 \cdot 6!) = -\sqrt{2}/1440$
7	$-\cos x$	$-\sqrt{2}/2$	$-\sqrt{2}/(2 \cdot 7!) = -\sqrt{2}/10080$
usw.		$\dots$	

Somit erhält man

$$\sin x = \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2}(x - \frac{\pi}{4}) - \frac{\sqrt{2}}{4}(x - \frac{\pi}{4})^2 - \frac{\sqrt{2}}{12}(x - \frac{\pi}{4})^3 + \frac{\sqrt{2}}{48}(x - \frac{\pi}{4})^4 \pm \dots$$

Diese Reihendarstellung ist ebenfalls für alle $x \in \mathbb{R}$ gültig ($\rho = \infty$, ohne Beweis).

MacLaurinreihe von $(1-x)^\alpha$

Als letztes Beispiel versuchen wir uns an der Verallgemeinerung unseres Eingangsbeispiels (dieses ist der Spezialfall $\alpha = -1$).

i	$f^{(i)}(x)$	$f^{(i)}(0)$	$a_i = f^{(i)}(x=0)/i!$
0	$(1-x)^\alpha$	1	1
1	$-\alpha(1-x)^{\alpha-1}$	$-\alpha$	$-\alpha$
2	$\alpha(\alpha-1)(1-x)^{\alpha-2}$	$\alpha(\alpha-1)$	$\frac{\alpha(\alpha-1)}{2}$
3	$-\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)(1-x)^{\alpha-3}$	$-\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)$	$-\frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{6}$
4	$\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)(\alpha-3)(1-x)^{\alpha-4}$	$\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)(\alpha-3)$	$\frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)(\alpha-3)}{24}$
5	$-\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)(\alpha-3)(\alpha-4)(1-x)^{\alpha-5}$	$-\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)(\alpha-3)(\alpha-4)$	$-\frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)(\alpha-3)(\alpha-4)}{120}$

usw.

womit man auf

$$(1-x)^\alpha = 1 - \alpha x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2}x - \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{6}x \pm \ldots$$

kommt. Dieses ist die sog. allgemeine binomische Reihe, Sie sollten unschwer erkennen, daß man für $\alpha = -1$ die Reihe $1 + x + x^2 + x^3 + \ldots$ erhält. Diese Reihe ist jedenfalls für $|x| < 1$ (absolut) konvergent, für $\alpha > 0$ gilt $\leq$ und für ganzzahlige positive α gilt $\rho = \infty$ (in diesem Fall handelt es sich ja nur um Polynome!)

Alternative Wege zu Potenzreihen/Taylorreihen

Die gezeigten Beispiele scheinen zu demonstrieren, daß Taylorreihen recht einfach zu berechnen sind, etwas Sicherheit im Differenzieren vorausgesetzt. Es reicht jedoch ein scheinbar einfaches Beispiel, um recht rasch ins "Schleudern" zu kommen. Gesucht sei die MacLaurinreihe für $\sin(x^2)$, und gefragt seien insbesondere die ersten 4 nichtverschwindenden Terme. Wir leiten 4 Mal ab (und ich gestehe ein CAS verwendet zu haben:)

$$\begin{aligned}
f(x) &= \sin\left(x^2\right)\\
f'(x) &= 2x\cos\left(x^2\right)\\
f''(x) &= 2\cos\left(x^2\right) - 4x^2\sin\left(x^2\right)\\
f'''(x) &= -8\cos\left(x^2\right)x^3 - 12\sin\left(x^2\right)x\\
f^{(4)}(x) &= 16\sin\left(x^2\right)x^4 - 48\cos\left(x^2\right)x^2 - 12\sin\left(x^2\right)
\end{aligned}$$

Dies ist schon schlimm genug, aber es kommt noch schlimmer: Wir brauchen die Ableitungen an der Stelle $x_0 = 0$. Von den obigen Ableitungen sind alle Ableitungen außer $f''(x=0) = 2$ gleich null. Die nächste nichtverschwindende Ableitung wäre $f^{(6)}(0)$. Um 4 nichtverschwindende Terme der MacLaurinreihe zu bekommen müßte man bis zur 14. Ableitung rechnen! Derartiges ist ohne CAS kaum durchführbar. Es stellt sich also die Frage, ob man "billiger" zum Ziel kommen kann ...

Manipulation von Potenzreihen

Es stellt sich heraus, daß man innerhalb des Konvergenzradiuses (dort und nur dort) einer (mehrerer) Potenzreihen (und somit MacLaurin/Taylorreihen) folgendes tun darf:

- Zwei Potenzreihen addieren, subtrahieren, multiplizieren und dividieren
- Potenzreihe gliedweise differenzieren bzw. integrieren
- In eine Potenzreihe "substituieren" ("einsetzen")[4]

Auf den folgenden Folien wollen wir ein paar illustrative Beispiele durchgehen (wobei wir uns auf den MacLaurinfall $x_0 = 0$ beschränken!). Grundreihen (z.B. Reihen für $\sin x$, $\cos x$, e^x) werden der Formelsammlung entnommen!

Vorweg eine **Anmerkung zum Konvergenzradius des Resultats:** Im Prinzip muß der Konvergenzradius einer auf diese Art gewonnenen Reihe neu untersucht werden. Als Faustregel gilt: Sind zwei oder mehrere Reihen beteiligt, so "gewinnt" der kleinste Konvergenzradius. Integration ist für den Konvergenzradius unbedenklich, Differentiation kann den Integrationsradius verkleinern!

[4] Dies ist der wichtigste Trick, der $\sin(x^2)$ zu einem Kinderspiel macht...

Addition/Subtraktion zweier Potenzreihen

Zwei Potenzreihen werden addiert bzw. subtrahiert, indem man die einzelnen Glieder addiert (subtrahiert). Es gilt

$$(a_0+a_1x+a_2x^2+\ldots)+(b_0+b_1x+b_2x^2+\ldots)=(a_0+b_0)+(a_1+b_1)x+(a_1+b_1)x^2+\ldots \tag{1}$$

bzw.

$$\sum_{i=0}^{\infty} a_i x^i + \sum_{i=0}^{\infty} b_i x^i = \sum_{i=0}^{\infty} (a_i + b_i) x^i .$$

Beispiel: $f(x) = e^x + \dfrac{1}{1-x} =$

$$= \underbrace{1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + \frac{x^4}{24} + \frac{x^5}{120} + \ldots}_{e^x} + \overbrace{1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + x^5 + \ldots}^{1/(1-x)} =$$

$$= 2 + 2x + \frac{3x^2}{2} + \frac{7x^3}{6} + \frac{25x^4}{24} + \frac{121x^5}{120} + \ldots$$

Die resultierende Reihe ist wie $1/(1-x)$ absolut konvergent für $|x| < 1$.

Multiplikation zweier Potenzreihen

Absolut konvergente Potenzreihen können gliedweise multipliziert werden (analog der Multiplikation zweier Polynome).

In der Praxis ist nur eine gewisse Buchhaltung nötig, um einerseits unnötige Rechnungen zu vermeiden und um andererseits keinen Term zu "verlieren" Beispiel:

$$e^x \sin x =$$

$$\begin{array}{ccccccccccccl}
\multicolumn{13}{l}{(1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + \frac{x^4}{24} + \dots) \times (x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{120} + \dots)} \\
\hline
x & + & x^2 & + & \frac{x^3}{2} & + & \frac{x^4}{6} & + & \frac{x^5}{24} & + \dots \\
 & & & - & \frac{x^3}{6} & - & \frac{x^4}{6} & - & \frac{x^5}{12} & + \dots \\
 & & & & & & & + & \frac{x^5}{120} & + \dots \\
\hline
x & + & x^2 & + & \frac{x^3}{3} & + & 0 & - & \frac{x^5}{30} & + \dots
\end{array}$$

Die resultierende Reihe ist für alle $x \in \mathbb{R}$ absolut konvergent.

Für Interessierte: Die Division von Reihen ist im Skriptum beschrieben.

Differentiation

Bitte berechnen Sie als Vorübung die MacLaurinreihe von $\cos x$ bzw. schlagen Sie sie in Ihrer Formelsammlung nach. Differenziert man die MacLaurinreihe von $\sin x$ gliedweise, so erhält man

$$\begin{aligned}(\sin x)' &= \left(x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{120} - \frac{x^7}{5040} \pm \ldots\right)' \\ &= 1 - \frac{3x^2}{6} + \frac{5x^4}{120} - \frac{7x^6}{5040} \pm \ldots \\ &= 1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} - \frac{x^6}{720} \pm \ldots \quad = \quad \cos x\end{aligned}$$

In diesem Fall kommt es zu keiner Änderung des Konvergenzradius. Aber Achtung: Sie kennen z.B.[5] die MacLaurinreihe für $\sqrt{1+x} = (1+x)^{1/2} =$

$$= 1 + \tfrac{x}{2} - \tfrac{x^2}{8} + \tfrac{x^3}{16} - \tfrac{5x^4}{128} + \tfrac{7x^5}{256} \qquad |x| \leq 1$$

Daraus können Sie durch gliedweise Differentiation leicht die Reihe für $1/\sqrt{1+x}$ gewinnen $(1/\sqrt{1+x} = 2(\sqrt{1+x})')$:

$$\begin{aligned}(\sqrt{1+x})' &= \left(1 + \tfrac{x}{2} - \tfrac{x^2}{8} + \tfrac{x^3}{16} - \tfrac{5x^4}{128} + \tfrac{7x^5}{256} \pm \ldots\right)' = \\ &= \tfrac{1}{2} - \tfrac{x}{4} + \tfrac{3x^2}{16} - \tfrac{5x^3}{32} + \tfrac{35x^4}{256} \pm \ldots = \tfrac{1}{2\sqrt{1+x}}\end{aligned}$$

Somit $\frac{1}{\sqrt{1+x}} = 1 - \frac{x}{2} + \frac{3x^2}{8} - \frac{5x^3}{16} + \frac{35x^4}{128} - \frac{63x^5}{256} \pm \ldots$. Der Konvergenzradius dieser neuen Reihe ist aber nur $|x| < 1$!

[5] Bitte Formelsammlung konsultieren!!

Integration

Sie können sich unschwer davon überzeugen, daß Sie durch gliedweises Integrieren der Resultate der letzten Folie die Wirkung der Differentiation wieder "gutmachen" können. Kleines Zusatzbeispiel:

$$\int_0^x \frac{1}{1-t}dt = \int_0^x (1+t+t^2+t^3+t^4+\ldots)dt = x+\frac{x^2}{2}+\frac{x^3}{3}+\frac{x^4}{4}+\ldots \qquad |x|<0$$

Ebenso ist aber

$$\int_0^x \frac{1}{1-t}dt = -\ln(1-x)$$

(für $|x|<0$ können wir den Betrag im Argument des Logarithmus weglassen), womit wir unschwer die Reihenentwicklung

$$\ln(1-x) = -x-\frac{x^2}{2}-\frac{x^3}{3}-\frac{x^4}{4}-\ldots \qquad |x|<0$$

gewinnen.

Die Probe durch Ausrechnen der Reihe aus der Definition der MacLaurinreihe wird als Übungsaufgabe wärmstens empfohlen!

“Einsetzen”

Und jetzt zurück zur “Horroraufgabe” $\sin(x^2)$ in eine MacLaurinreihe zu entwickeln. Was wir kennen ist die Reihe für $\sin x$. Wir setzen $x^2 = y$ und schreiben

$$\sin y = y - \frac{y^3}{6} + \frac{y^5}{120} - \frac{y^7}{5040} \pm \dots \qquad \text{aus der Formelsammlung!}$$

und setzten $y = x^2$ ein:

$$\sin(x^2) = (x^2) - \frac{(x^2)^3}{6} + \frac{(x^2)^5}{120} - \frac{(x^2)^7}{5040} \pm \dots = x^2 - \frac{x^6}{6} + \frac{x^{10}}{120} - \frac{x^{14}}{5040} \pm \dots$$

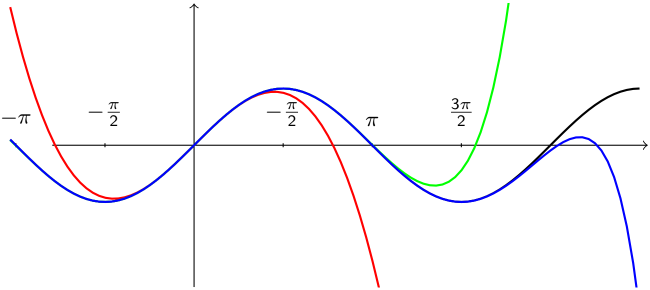
... fertig!

Als abschließende Übungsaufgabe, die das eben Gelernte zusammenfaßt, versuchen Sie sich doch bitte an den ersten 6 nichtverschwindenden Termen der MacLaurinreihe für $\sin(x^2)/1 - x$. Dies wäre ein halbwegs realistisches Prüfungsbeispiel.[6]

---

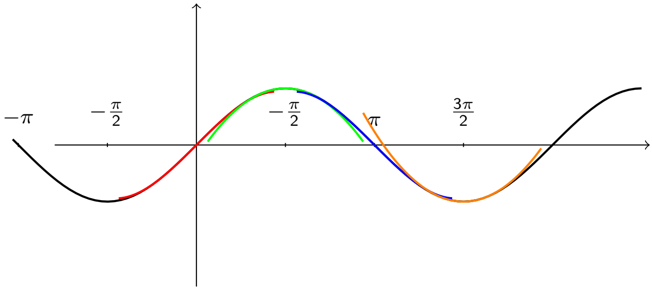
[6] Lösung: $= x^2 + x^3 + x^4 + x^5 + \frac{5x^6}{6} + \frac{5x^7}{6} + \frac{5x^8}{6} + \dots$

Anwendungen: Berechnung transzendentaler Funktionen, z.B. $\sin x$



Zunächst die graphische Illustration, wie sich die MacLaurinreihe von $\sin x$ der wahren Funktion (in schwarz) annähert: $x - \frac{x^3}{3!}$, $x - \frac{x^3}{3!} + \ldots + \frac{x^9}{9!}$, $x - \frac{x^3}{3!} + \ldots + \frac{x^{15}}{15!}$. In der Näherung 15. Ordnung (Terme bis x^{15}) beträgt der Fehler bei $x = \pi$ nur mehr $7.7 \cdot 10^{-7}$.

Anwendungen: Berechnung transzendentaler Funktionen, z.B. $\sin x$



Zunächst die graphische Illustration, wie sich die MacLaurinreihe von $\sin x$ der wahren Funktion (in schwarz) annähert: $x - \frac{x^3}{3!}$, $x - \frac{x^3}{3!} + \ldots + \frac{x^9}{9!}$, $x - \frac{x^3}{3!} + \ldots + \frac{x^{15}}{15!}$. In der Näherung 15. Ordnung (Terme bis x^{15}) beträgt der Fehler bei $x = \pi$ nur mehr $7.7 \cdot 10^{-7}$.

Eine noch einfachere Näherung an die Funktion erreicht man, wenn man Taylorentwicklungen um verschiedene Entwicklungspunkte stückelt: Gezeigt sind Taylorentwicklungen 3. Ordnung um $x = 0$, $x = \pi/2$, $x = \pi$, $x = 3\pi/2$.

Anwendungen: Satz von Gauss

Beim Rechnen mit komplexen Zahlen hatte ich

$$e^{i\,x} = \cos x + i \sin x$$

aus dem Hut gezaubert. Mit Hilfe von Taylorreihen können wir das plausibel machen.[7]

Zunächst zur Erinnerung:

$$\sin x = x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{120} + \ldots \qquad \cos x = 1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} + \ldots$$

Nun setzen wir $y = ix$:

$$e^y = 1 + y + \frac{y^2}{2} + \frac{y^3}{3!} + \frac{y^4}{4!} + \frac{y^5}{5!} + \frac{y^6}{6!} + \ldots$$

$$\Rightarrow \quad e^{ix} = 1 + ix + \frac{(ix)^2}{2} + \frac{(ix)^3}{3!} + \frac{(ix)^4}{4!} + \frac{(ix)^5}{5!} + \frac{(ix)^6}{6!} + \ldots$$

$$= 1 + ix - \frac{x^2}{2} - i\frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + i\frac{x^5}{5!} - \frac{x^6}{6!} + \ldots = \underbrace{1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{4!} + \ldots}_{\cos x} + i\Big(\underbrace{x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \ldots}_{\sin x}\Big) = \cos x + i \sin x$$

Somit ist aber der Gauss'sche Satz gezeigt!

---

[7] Wir nehmen an, daß alle Rechenregeln für Differentiation etc. auch für komplexe Zahlen gelten — was sie tun, wofür uns aber zum Beweis die Zeit fehlt

Anwendungen: Stammfunktion von e^{x^2}

Im Kapitel über Integration sind wir auf die verblüffende Tatsache gestoßen, daß wir für "einfache" Funktionen wie e^{x^2}, $\sin(x^2)$, $\cos(x^2)$ keine Stammfunktionen anschreiben können, *obwohl* Stammfunktionen existieren müssen. Innerhalb des Konvergenzradiuses sind aber eine Funktion und ihre Taylorreihe äquivalent. D.h., wenngleich wir keine s.g. geschlossene Form der Stammfunktion für diese Fälle angeben können, die Taylorreihe der Stammfunktion finden wir sofort! Dies sei am Beispiel e^{x^2} illustriert:[8]

$$e^{x^2} = 1 + x^2 + \frac{x^4}{2} + \frac{x^6}{6} + \frac{x^8}{24} + \frac{x^{10}}{120} + \dots$$

Somit

$$\int e^{x^2} dx = \int \left(1 + x^2 + \frac{x^4}{2} + \frac{x^6}{6} + \frac{x^8}{24} + \frac{x^{10}}{120} + \dots\right) dx =$$

$$= x + \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{10} + \frac{x^7}{42} + \frac{x^9}{216} + \frac{x^{11}}{1320} + \dots$$

Da der Konvergenzradius von e^x und damit e^{x^2} gleich ∞ ist, und Integration den Konvergenzradius nicht einengt, ist obige Reihe für alle $x \in \mathbb{R}$ konvergent.

[8] Diese Ableitung ist Übungsaufgabe für den Leser!

Grenzwerte unbestimmter Ausdrücke

Entwicklung in Taylorreihen kann bei Grenzwertproblemen helfen, wenn die direkte Berechnung auf Ausdrücke der Art $\frac{0}{0}$ führt. Dies ist eine Verallgemeinerung der s.g. Regel von L'Hôpital.
Wenngleich wir uns nicht direkt mit der Berechnung von Grenzwertberechnungen beschäftigen, ist ein Beispiel illustrativ. Gesucht sei:

$$\lim_{x \to 0} \frac{\sqrt{x^2+9}-3}{x^2}$$

Ein normaler Taschenrechner kann hier leicht in die irre führen. Zunächst (z.B. für $x = 0.01$ oder $x = 0.001$ scheint der Wert gegen $1/6$ zu gehen. Setzt man aber einen wirklich kleinen Wert (z.B. $x = 1 \cdot 10^{-10}$) ein, so erhält man (auf den meisten Taschenrechnern 0). Einsetzen von 0 in Zähler und Nenner (gemäß Rechenregeln für Grenzwerte) führt auf $0/0$.
Für den Nenner ist nichts Spezielles zu tun, die MacLaurinreihe eines Polynoms ist das Polynom selbst. Für den Zähler formen wir um:

$$\sqrt{x^2+9}-3 = 3\sqrt{\frac{x^2}{9}+1}-3 = 3\sqrt{y+1}-3 = 3\sqrt{1+y}-3$$

Die letzte Reihe entnehmen wir der Formelsammlung

$$= 3\left(1+\frac{1}{2}y-\frac{1}{8}y^2+\ldots\right)-3 = \frac{3}{2}y-\frac{3}{8}y^2+\ldots = \frac{3}{2}\frac{x^2}{9}-\frac{3}{8}\frac{(x^2)^2}{9^2}+\ldots = \frac{1}{6}x^2-\frac{x^4}{216}+\ldots$$

Damit kann man den gesuchten Grenzwert sofort ablesen:

$$\lim_{x \to 0} \frac{\sqrt{x^2+9}-3}{x^2} = \lim_{x \to 0} \frac{x^2/6 - x^4/216 + \ldots}{x^2} = \frac{1}{6}$$

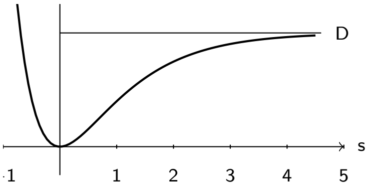
Anwendungen: Näherungsweise Beschreibung einer Funktion nahe einer interessierenden Stelle

Das eben gezeigte Grenzwertbeispiel mag Ihnen spitzfindig vorkommen. Ganz allgemein sind aber Taylorreihen die Methode der Wahl um das Verhalten einer komplizierten Funktion in der Nähe eines bestimmten Punktes zu verstehen. Überlegen Sie sich z.B. mittels der jeweiligen MacLaurinreihe, warum man in der Nähe von $x = 0$ behaupten kann, daß $\sin x \propto x$ und $\cos x \propto 1 - x^2/2$.

Wir wollen dies an Hand des s.g. Morsepotentials

$$U^M(r) = D(1 - e^{\alpha\overbrace{(r - r_0)}^{s}})^2 = U^M(s) \text{ illustrieren.}$$

Die Funktion hat folgende Form:



Sie beschreibt die Energie einer chem. Bindung als Funktion des Abstands. Im Gleichgewicht ($r = r_0$, $s = 0$) ist die Energie auf Null normiert. Für kürzere Abstände ($r < r_0$, $s < 0$) wird die Energie rasch repulsiv und strebt gegen $+\infty$. Zieht man hingegen die Bindung auseinander, so wächst die Bindungsenergie gegen D. D steht für die Dissoziationsenergie, die Energie bei der die Bindung bricht.

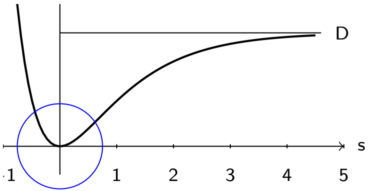
Anwendungen: Näherungsweise Beschreibung einer Funktion nahe einer interessierenden Stelle

Das eben gezeigte Grenzwertbeispiel mag Ihnen spitzfindig vorkommen. Ganz allgemein sind aber Taylorreihen die Methode der Wahl um das Verhalten einer komplizierten Funktion in der Nähe eines bestimmten Punktes zu verstehen. Überlegen Sie sich z.B. mittels der jeweiligen MacLaurinreihe, warum man in der Nähe von $x = 0$ behaupten kann, daß $\sin x \propto x$ und $\cos x \propto 1 - x^2/2$.

Wir wollen dies an Hand des s.g. Morsepotentials

$$U^M(r) = D(1 - e^{\alpha\overbrace{(r - r_0)}^{s}})^2 = U^M(s) \text{ illustrieren.}$$

Die Funktion hat folgende Form:



Sie beschreibt die Energie einer chem. Bindung als Funktion des Abstands. Im Gleichgewicht ($r = r_0$, $s = 0$) ist die Energie auf Null normiert. Für kürzere Abstände ($r < r_0$, $s < 0$) wird die Energie rasch repulsiv und strebt gegen $+\infty$. Zieht man hingegen die Bindung auseinander, so wächst die Bindungsenergie gegen D. D steht für die Dissoziationsenergie, die Energie bei der die Bindung bricht. Oft ist man nur am Verhalten der Funktion in der Nähe des Minimums interessiert, und dieses wollen wir nun studieren.

Taylorentwicklung des Morsepotentials $U^M(s) = D(1 - e^{-\alpha\, s})^2$

Wir starten mit der Reihe für e^x

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + \ldots$$

Somit

$$e^{-\alpha s} = 1 - \alpha\, s + \frac{\alpha^2 s^2}{2} - \frac{\alpha^3 s^3}{6} + \ldots \text{ bzw. } 1 - e^{-\alpha s} = \alpha\, s - \frac{\alpha^2 s^2}{2} + \frac{\alpha^3 s^3}{6} + \ldots$$

Als nächstes brauchen wir das Produkt

$$(1 - e^{-\alpha\, s})^2 = \left(\alpha\, s - \frac{\alpha^2 s^2}{2} + \frac{\alpha^3 s^3}{6} + \ldots\right)^2$$

Da uns zunächst die einfachste Näherung genügt, beschränken wir uns auf den niedrigsten Term in s, d.h., $\alpha^2 s^2$. Explizites Ausmultiplizieren ist nur notwendig, wenn wir auch höhere Terme bräuchten. Somit finden wir die verblüffende Näherung

$$U^M(s) \approx D\, \alpha^2 s^2$$

Taylorentwicklung des Morsepotentials $U^M(s) = D(1 - e^{-\alpha\, s})^2$

Wir starten mit der Reihe für e^x

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + \dots$$

Somit

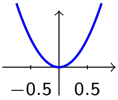
$$e^{-\alpha s} = 1 - \alpha\, s + \frac{\alpha^2 s^2}{2} - \frac{\alpha^3 s^3}{6} + \dots \text{ bzw. } 1 - e^{-\alpha s} = \alpha\, s - \frac{\alpha^2 s^2}{2} + \frac{\alpha^3 s^3}{6} + \dots$$

Als nächstes brauchen wir das Produkt

$$(1 - e^{-\alpha\, s})^2 = \left(\alpha\, s - \frac{\alpha^2 s^2}{2} + \frac{\alpha^3 s^3}{6} + \dots\right)^2$$

Da uns zunächst die einfachste Näherung genügt, beschränken wir uns auf den niedrigsten Term in s, d.h., $\alpha^2 s^2$. Explizites Ausmultiplizieren ist nur notwendig, wenn wir auch höhere Terme bräuchten. Somit finden wir die verblüffende Näherung

$$U^M(s) \approx D\, \alpha^2 s^2$$



In schwarz sehen Sie eine Vergrößerung des Morsepotentials um den Ursprung. Unsere Näherung ist in blau geplottet. Die Abweichungen mögen groß aussehen, aber typische Auslenkungen sind in der Größenordnung von $s \approx 0.05$ Å.

Preamble

The purpose of this License is to make a manual, textbook, or other functional and useful document "free" in the sense of freedom: to assure everyone the effective freedom to copy and redistribute it, with or without modifying it, either commercially or noncommercially. Secondarily, this License preserves for the author and publisher a way to get credit for their work, while not being considered responsible for modifications made by others.

This License is a kind of "copyleft", which means that derivative works of the document must themselves be free in the same sense. It complements the GNU General Public License, which is a copyleft license designed for free software.

We have designed this License in order to use it for manuals for free software, because free software needs free documentation: a free program should come with manuals providing the same freedoms that the software does. But this License is not limited to software manuals; it can be used for any textual work, regardless of subject matter or whether it is published as a printed book. We recommend this License principally for works whose purpose is instruction or reference.

1. APPLICABILITY AND DEFINITIONS

This License applies to any manual or other work, in any medium, that contains a notice placed by the copyright holder saying it can be distributed under the terms of this License. Such a notice grants a world-wide, royalty-free license, unlimited in duration, to use that work under the conditions stated herein. The "**Document**", below, refers to any such manual or work. Any member of the public is a licensee, and is addressed as "**you**". You accept the license if you copy, modify or distribute the work in a way requiring permission under copyright law.

A "**Modified Version**" of the Document means any work containing the Document or a portion of it, either copied verbatim, or with modifications and/or translated into another language.

A "**Secondary Section**" is a named appendix or a front-matter section of the Document that deals exclusively with the relationship of the publishers or authors of the Document to the Document's overall subject (or to related matters) and contains nothing that could fall directly within that overall subject. (Thus, if the Document is in part a textbook of mathematics, a Secondary Section may not explain any mathematics.) The relationship could be a matter of historical connection with the subject or with related matters, or of legal, commercial, philosophical, ethical or political position regarding them.

The "**Invariant Sections**" are certain Secondary Sections whose titles are designated, as being those of Invariant Sections, in the notice that says that the Document is released under this License. If a section does not fit the above definition of Secondary then it is not allowed to be designated as Invariant. The Document may contain zero Invariant Sections. If the Document does not identify any Invariant Sections then there are none.

The "**Cover Texts**" are certain short passages of text that are listed, as Front-Cover Texts or Back-Cover Texts, in the notice that says that the Document is released under this License. A Front-Cover Text may be at most 5 words, and a Back-Cover Text may be at most 25 words.

A "**Transparent**" copy of the Document means a machine-readable copy, represented in a format whose specification is available to the general public, that is suitable for revising the document straightforwardly with generic text editors or (for images composed of pixels) generic paint programs or (for drawings) some widely available drawing editor, and that is suitable for input to text formatters or for automatic translation to a variety of formats suitable for input to text formatters. A copy made in an otherwise Transparent file format whose markup, or absence of markup, has been arranged to thwart or discourage subsequent modification by readers is not Transparent. An image format is not Transparent if used for any substantial amount of text. A copy that is not "Transparent" is called "**Opaque**".
Examples of suitable formats for Transparent copies include plain ASCII without markup, Texinfo input format, LaTeX input format, SGML or XML using a publicly available DTD, and standard-conforming simple HTML, PostScript or PDF designed for human modification. Examples of transparent image formats include PNG, XCF and JPG. Opaque formats include proprietary formats that can be read and edited only by proprietary word processors, SGML or XML for which the DTD and/or processing tools are not generally available, and the machine-generated HTML, PostScript or PDF produced by some word processors for output purposes only.
The "**Title Page**" means, for a printed book, the title page itself, plus such following pages as are needed to hold, legibly, the material this License requires to appear in the title page. For works in formats which do not have any title page as such, "Title Page" means the text near the most prominent appearance of the work's title, preceding the beginning of the body of the text.
A section "**Entitled XYZ**" means a named subunit of the Document whose title either is precisely XYZ or contains XYZ in parentheses following text that translates XYZ in another language. (Here XYZ stands for a specific section name mentioned below, such as "**Acknowledgements**", "**Dedications**", "**Endorsements**", or "**History**".) To "**Preserve the Title**" of such a section when you modify the Document means that it remains a section "Entitled XYZ" according to this definition.
The Document may include Warranty Disclaimers next to the notice which states that this License applies to the Document. These Warranty Disclaimers are considered to be included by reference in this License, but only as regards disclaiming warranties: any other implication that these Warranty Disclaimers may have is void and has no effect on the meaning of this License.

2. VERBATIM COPYING

You may copy and distribute the Document in any medium, either commercially or noncommercially, provided that this License, the copyright notices, and the license notice saying this License applies to the Document are reproduced in all copies, and that you add no other conditions whatsoever to those of this License. You may not use technical measures to obstruct or control the reading or further copying of the copies you make or distribute. However, you may accept compensation in exchange for copies. If you distribute a large enough number of copies you must also follow the conditions in section 3.
You may also lend copies, under the same conditions stated above, and you may publicly display copies.

3. COPYING IN QUANTITY

If you publish printed copies (or copies in media that commonly have printed covers) of the Document, numbering more than 100, and the Document's license notice requires Cover Texts, you must enclose the copies in covers that carry, clearly and legibly, all these Cover Texts: Front-Cover Texts on the front cover, and Back-Cover Texts on the back cover. Both covers must also clearly and legibly identify you as the publisher of these copies. The front cover must present the full title with all words of the title equally prominent and visible. You may add other material on the covers in addition. Copying with changes limited to the covers, as long as they preserve the title of the Document and satisfy these conditions, can be treated as verbatim copying in other respects.
If the required texts for either cover are too voluminous to fit legibly, you should put the first ones listed (as many as fit reasonably) on the actual cover, and continue the rest onto adjacent pages.

If you publish or distribute Opaque copies of the Document numbering more than 100, you must either include a machine-readable Transparent copy along with each Opaque copy, or state in or with each Opaque copy a computer-network location from which the general network-using public has access to download using public-standard network protocols a complete Transparent copy of the Document, free of added material. If you use the latter option, you must take reasonably prudent steps, when you begin distribution of Opaque copies in quantity, to ensure that this Transparent copy will remain thus accessible at the stated location until at least one year after the last time you distribute an Opaque copy (directly or through your agents or retailers) of that edition to the public.
It is requested, but not required, that you contact the authors of the Document well before redistributing any large number of copies, to give them a chance to provide you with an updated version of the Document.

4. MODIFICATIONS

You may copy and distribute a Modified Version of the Document under the conditions of sections 2 and 3 above, provided that you release the Modified Version under precisely this License, with the Modified Version filling the role of the Document, thus licensing distribution and modification of the Modified Version to whoever possesses a copy of it. In addition, you must do these things in the Modified Version:

A. Use in the Title Page (and on the covers, if any) a title distinct from that of the Document, and from those of previous versions (which should, if there were any, be listed in the History section of the Document). You may use the same title as a previous version if the original publisher of that version gives permission.

B. List on the Title Page, as authors, one or more persons or entities responsible for authorship of the modifications in the Modified Version, together with at least five of the principal authors of the Document (all of its principal authors, if it has fewer than five), unless they release you from this requirement.

C. State on the Title page the name of the publisher of the Modified Version, as the publisher.

D. Preserve all the copyright notices of the Document.

E. Add an appropriate copyright notice for your modifications adjacent to the other copyright notices.

F. Include, immediately after the copyright notices, a license notice giving the public permission to use the Modified Version under the terms of this License, in the form shown in the Addendum below.

G. Preserve in that license notice the full lists of Invariant Sections and required Cover Texts given in the Document's license notice.

H. Include an unaltered copy of this License.

I. Preserve the section Entitled "History", Preserve its Title, and add to it an item stating at least the title, year, new authors, and publisher of the Modified Version as given on the Title Page. If there is no section Entitled "History" in the Document, create one stating the title, year, authors, and publisher of the Document as given on its Title Page, then add an item describing the Modified Version as stated in the previous sentence.

J. Preserve the network location, if any, given in the Document for public access to a Transparent copy of the Document, and likewise the network locations given in the Document for previous versions it was based on. These may be placed in the "History" section. You may omit a network location for a work that was published at least four years before the Document itself, or if the original publisher of the version it refers to gives permission.

K. For any section Entitled "Acknowledgements" or "Dedications", Preserve the Title of the section, and preserve in the section all the substance and tone of each of the contributor acknowledgements and/or dedications given therein.

L. Preserve all the Invariant Sections of the Document, unaltered in their text and in their titles. Section numbers or the equivalent are not considered part of the section titles.

M. Delete any section Entitled "Endorsements". Such a section may not be included in the Modified Version.

N. Do not retitle any existing section to be Entitled "Endorsements" or to conflict in title with any Invariant Section.

O. Preserve any Warranty Disclaimers.

If the Modified Version includes new front-matter sections or appendices that qualify as Secondary Sections and contain no material copied from the Document, you may at your option designate some or all of these sections as invariant. To do this, add their titles to the list of Invariant Sections in the Modified Version's license notice. These titles must be distinct from any other section titles.
You may add a section Entitled "Endorsements", provided it contains nothing but endorsements of your Modified Version by various parties–for example, statements of peer review or that the text has been approved by an organization as the authoritative definition of a standard.
You may add a passage of up to five words as a Front-Cover Text, and a passage of up to 25 words as a Back-Cover Text, to the end of the list of Cover Texts in the Modified Version. Only one passage of Front-Cover Text and one of Back-Cover Text may be added by (or through arrangements made by) any one entity. If the Document already includes a cover text for the same cover, previously added by you or by arrangement made by the same entity you are acting on behalf of, you may not add another; but you may replace the old one, on explicit permission from the previous publisher that added the old one.
The author(s) and publisher(s) of the Document do not by this License give permission to use their names for publicity for or to assert or imply endorsement of any Modified Version.

5. COMBINING DOCUMENTS

You may combine the Document with other documents released under this License, under the terms defined in section 4 above for modified versions, provided that you include in the combination all of the Invariant Sections of all of the original documents, unmodified, and list them all as Invariant Sections of your combined work in its license notice, and that you preserve all their Warranty Disclaimers.
The combined work need only contain one copy of this License, and multiple identical Invariant Sections may be replaced with a single copy. If there are multiple Invariant Sections with the same name but different contents, make the title of each such section unique by adding at the end of it, in parentheses, the name of the original author or publisher of that section if known, or else a unique number. Make the same adjustment to the section titles in the list of Invariant Sections in the license notice of the combined work.
In the combination, you must combine any sections Entitled "History" in the various original documents, forming one section Entitled "History"; likewise combine any sections Entitled "Acknowledgements", and any sections Entitled "Dedications". You must delete all sections Entitled "Endorsements".

6. COLLECTIONS OF DOCUMENTS

You may make a collection consisting of the Document and other documents released under this License, and replace the individual copies of this License in the various documents with a single copy that is included in the collection, provided that you follow the rules of this License for verbatim copying of each of the documents in all other respects.
You may extract a single document from such a collection, and distribute it individually under this License, provided you insert a copy of this License into the extracted document, and follow this License in all other respects regarding verbatim copying of that document.

7. AGGREGATION WITH INDEPENDENT WORKS

A compilation of the Document or its derivatives with other separate and independent documents or works, in or on a volume of a storage or distribution medium, is called an "aggregate" if the copyright resulting from the compilation is not used to limit the legal rights of the compilation's users beyond what the individual works permit. When the Document is included in an aggregate, this License does not apply to the other works in the aggregate which are not themselves derivative works of the Document.
If the Cover Text requirement of section 3 is applicable to these copies of the Document, then if the Document is less than one half of the entire aggregate, the Document's Cover Texts may be placed on covers that bracket the Document within the aggregate, or the electronic equivalent of covers if the Document is in electronic form. Otherwise they must appear on printed covers that bracket the whole aggregate.

8. TRANSLATION

Translation is considered a kind of modification, so you may distribute translations of the Document under the terms of section 4.
Replacing Invariant Sections with translations requires special permission from their copyright holders, but you may include translations of some or all Invariant Sections in addition to the original versions of these Invariant Sections. You may include a translation of this License, and all the license notices in the Document, and any Warranty Disclaimers, provided that you also include the original English version of this License and the original versions of those notices and disclaimers. In case of a disagreement between the translation and the original version of this License or a notice or disclaimer, the original version will prevail.
If a section in the Document is Entitled "Acknowledgements", "Dedications", or "History", the requirement (section 4) to Preserve its Title (section 1) will typically require changing the actual title.

9. TERMINATION

You may not copy, modify, sublicense, or distribute the Document except as expressly provided for under this License. Any other attempt to copy, modify, sublicense or distribute the Document is void, and will automatically terminate your rights under this License. However, parties who have received copies, or rights, from you under this License will not have their licenses terminated so long as such parties remain in full compliance.

10. FUTURE REVISIONS OF THIS LICENSE

The Free Software Foundation may publish new, revised versions of the GNU Free Documentation License from time to time. Such new versions will be similar in spirit to the present version, but may differ in detail to address new problems or concerns. See http://www.gnu.org/copyleft/.
Each version of the License is given a distinguishing version number. If the Document specifies that a particular numbered version of this License "or any later version" applies to it, you have the option of following the terms and conditions either of that specified version or of any later version that has been published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document does not specify a version number of this License, you may choose any version ever published (not as a draft) by the Free Software Foundation.

ADDENDUM: How to use this License for your documents

To use this License in a document you have written, include a copy of the License in the document and put the following copyright and license notices just after the title page:

> *Copyright © YEAR YOUR NAME. Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.2 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts. A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".*

If you have Invariant Sections, Front-Cover Texts and Back-Cover Texts, replace the "with ... Texts." line with this:

> *with the Invariant Sections being LIST THEIR TITLES, with the Front-Cover Texts being LIST, and with the Back-Cover Texts being LIST.*

If you have Invariant Sections without Cover Texts, or some other combination of the three, merge those two alternatives to suit the situation.

If your document contains nontrivial examples of program code, we recommend releasing these examples in parallel under your choice of free software license, such as the GNU General Public License, to permit their use in free software.