

Analysis I

Vorlesung 5



Heron von Alexandria (1. Jahrhundert n.C.)

Folgen in einem angeordneten Körper

DEFINITION 5.1. Es sei M eine Menge. Eine Abbildung

$$\mathbb{N} \longrightarrow M, n \longmapsto x_n,$$

nennt man auch eine *Folge* in M .

Eine Folge wird zumeist als $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$, oder einfach nur kurz als $(x_n)_n$ geschrieben. Im Folgenden beschränken wir auf Folgen, deren Werte in einem angeordneten Körper liegen, speziell in \mathbb{R} (reelle Folge), später werden wir auch mit Folgen in metrischen Räumen arbeiten. Manchmal sind Folgen nicht für alle natürlichen Zahlen definiert, sondern nur für alle natürlichen Zahlen $\geq N$. Alle Begriffe und Aussagen lassen sich dann sinngemäß auch auf diese Situation übertragen.

Wir beginnen mit zwei motivierenden Beispielen.

BEISPIEL 5.2. Eine reelle Zahl x aus $[0, 1[$ wird im Zehnersystem durch eine unendliche Dezimalbruchentwicklung der Form

$$x = 0, z_1 z_2 z_3 z_4 \dots$$

wiedergegeben. Dabei sind die z_n , $n \in \mathbb{N}_+$, Ziffern aus $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ und z_n bezeichnet die n -te Nachkommaziffer. Wenn man eine solche unendliche Ziffernentwicklung nur bis zur n -ten Stelle liest und die weiteren Stellen

vernachlässigt, so erhält man die rationalen Zahlen

$$x_n = 0, z_1 z_2 \dots z_n = \frac{z_1 10^{n-1} + z_2 10^{n-2} + \dots + z_{n-1} 10 + z_n}{10^n},$$

die eine zunehmend bessere Approximation von x darstellen. Der Fehler der n -ten Approximation x_n , also der Abstand $x - x_n$, ist höchstens $1/10^n$. Man kann also den Fehler beliebig klein machen, indem man die rationalen Approximationen x_n für hinreichend große n betrachtet.

BEISPIEL 5.3. Wir wollen die Quadratwurzel einer natürlichen Zahl „berechnen“, sagen wir von 5. Eine solche Zahl x mit der Eigenschaft $x^2 = 5$ gibt es nicht innerhalb der rationalen Zahlen, wie aus der eindeutigen Primfaktorzerlegung folgt. Wenn $x \in \mathbb{R}$ ein solches Element ist, so hat auch $-x$ diese Eigenschaft. Mehr als zwei Lösungen kann es aber nach Aufgabe 5.1 nicht geben, so dass wir nur nach der positiven Lösung suchen müssen.

Obwohl es innerhalb der rationalen Zahlen keine Lösung für die Gleichung $x^2 = 5$ gibt, so gibt es doch beliebig gute Approximationen innerhalb der rationalen Zahlen dafür. Beliebig gut heißt dabei, dass der Fehler (oder die Abweichung) unter jede positive Schranke gedrückt werden kann. Das klassische Verfahren, um eine Quadratwurzel beliebig gut anzunähern, ist das *Heron-Verfahren*, das man auch *babylonisches Wurzelziehen* nennt. Dies ist ein *iteratives Verfahren*, d.h., die nächste Approximation wird aus den vorausgehenden Approximationen berechnet. Beginnen wir mit $a := x_0 := 3$ als erster Näherung. Wegen

$$x_0^2 = 3^2 = 9 > 5$$

ist x_0 zu groß, d.h. es ist $x_0 > x$. Aus $a^2 > 5$ (mit a positiv) folgt zunächst $5/a^2 < 1$ und daraus $(5/a)^2 < 5$, d.h. $5/a < \sqrt{5}$. Man hat also die Abschätzungen

$$5/a < \sqrt{5} < a$$

wobei links eine rationale Zahl steht, wenn rechts eine rationale Zahl steht. Eine solche Abschätzung vermittelt offenbar eine quantitative Vorstellung darüber, wo $\sqrt{5}$ liegt. Die Differenz $a - 5/a$ ist ein Maß für die Güte der Approximation.

Beim Startwert 3 ergibt sich, dass die Quadratwurzel von 5 zwischen $5/3$ und 3 liegt. Man nimmt nun das arithmetische Mittel der beiden Intervallgrenzen, also

$$x_1 := \frac{3 + \frac{5}{3}}{2} = \frac{7}{3}.$$

Wegen $(\frac{7}{3})^2 = \frac{49}{9} > 5$ ist dieser Wert wieder zu groß und daher liegt $\sqrt{5}$ im Intervall $[5 \cdot \frac{3}{7}, \frac{7}{3}]$. Von diesen Intervallgrenzen nimmt man erneut das arithmetische Mittel und setzt

$$x_2 := \frac{\frac{15}{7} + \frac{7}{3}}{2} = \frac{47}{21}$$

als nächste Approximation. So fortfahrend erhält man eine immer besser werdende Approximation von $\sqrt{5}$.

Allgemein ergibt sich das folgende Heron-Verfahren.

BEISPIEL 5.4. Beim *Heron-Verfahren* zur näherungsweise Berechnung von \sqrt{c} einer positiven Zahl c geht man iterativ wie folgt vor. Man startet mit einem beliebigen positiven Startwert x_0 und berechnet davon das arithmetische Mittel aus x_0 und c/x_0 . Dieses Mittel nennt man x_1 . Es gilt

$$\begin{aligned} x_1^2 - c &= \left(\frac{x_0 + \frac{c}{x_0}}{2} \right)^2 - c \\ &= \frac{x_0^2 + 2c + \frac{c^2}{x_0^2}}{4} - c \\ &= \frac{x_0^2 - 2c + \frac{c^2}{x_0^2}}{4} \\ &= \left(\frac{x_0 - \frac{c}{x_0}}{2} \right)^2 \geq 0. \end{aligned}$$

D.h. dass x_1 mindestens so groß wie \sqrt{c} ist. Auf x_1 wendet man iterativ das gleiche Verfahren an und erhält so x_2 usw. Die Definition von x_{n+1} lautet also

$$x_{n+1} = \frac{x_n + c/x_n}{2}.$$

Nach Konstruktion weiß man, dass \sqrt{c} in jedem Intervall $[c/x_n, x_n]$ (für $n \geq 1$) liegt, da aus $x_n^2 \geq c$ und $x_n \cdot c/x_n = c$ folgt, dass $\left(\frac{c}{x_n}\right)^2 \leq c$ ist. Bei jedem Schritt gilt

$$\left[\frac{c}{x_{n+1}}, x_{n+1} \right] \subseteq \left[\frac{c}{x_n}, x_n \right],$$

d.h. das Nachfolgerintervall liegt innerhalb des Vorgängerintervalls. Dabei wird bei jedem Schritt die Intervalllänge mindestens halbiert.

Das eben beschriebene Verfahren liefert also zu jeder natürlichen Zahl n ein Element in K , das eine durch eine gewisse algebraische Eigenschaft charakterisierte Zahl beliebig gut approximiert. Bei vielen technischen Anwendungen genügt es, gewisse Zahlen nur hinreichend genau zu kennen, wobei allerdings die benötigte Güte der Approximation von der technischen Zielsetzung abhängt. Es gibt im Allgemeinen keine Güte, die für jede vorstellbare Anwendung ausreicht, so dass es wichtig ist zu wissen, wie man eine gute Approximation durch eine bessere Approximation ersetzen kann und wie viele Schritte man machen muss, um eine gewünschte Approximation zu erreichen. Dies führt zum Konvergenzbegriff, der zentral für die gesamte Analysis ist.

DEFINITION 5.5. Es sei $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in einem angeordneten Körper und es sei $x \in K$. Man sagt, dass die Folge gegen x *konvergiert*, wenn folgende Eigenschaft erfüllt ist.

Zu jedem $\epsilon \in K$, $\epsilon > 0$, gibt es ein $n_0 \in \mathbb{N}$ derart, dass für alle $n \geq n_0$ die Beziehung

$$|x_n - x| \leq \epsilon$$

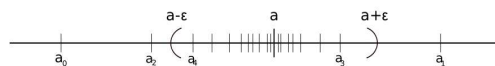
gilt. In diesem Fall heißt x der *Grenzwert* oder der *Limes* der Folge. Dafür schreibt man auch

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x.$$

Wenn die Folge einen Grenzwert besitzt, so sagt man auch, dass sie *konvergiert* (ohne Bezug auf einen Grenzwert), andernfalls, dass sie *divergiert*.

Man sollte sich dabei die vorgegebenen ϵ als kleine, aber positive Zahlen vorstellen, die jeweils eine gewünschte *Zielgenauigkeit* (oder einen erlaubten Fehler) ausdrücken. Die natürliche Zahl n_0 ist dann die *Aufwandszahl*, die beschreibt, wie weit man gehen muss, um die gewünschte Zielgenauigkeit zu erreichen, und zwar so zu erreichen, dass alle ab n_0 folgenden Glieder innerhalb dieser Zielgenauigkeit bleiben. Konvergenz bedeutet demnach, dass man jede gewünschte Genauigkeit bei hinreichend großem Aufwand auch erreichen kann. Je kleiner die Zielgenauigkeit, also je besser die Approximation sein soll, desto höher ist im Allgemeinen der Aufwand.

Zu einem $\epsilon > 0$ und $x \in K$ nennt man das Intervall $]x - \epsilon, x + \epsilon[$ auch die ϵ -*Umgebung* von x . Eine Folge, die gegen 0 konvergiert, heißt *Nullfolge*.



BEISPIEL 5.6. Eine *konstante Folge* $x_n = c$ ist stets konvergent mit dem Grenzwert c . Dies folgt direkt daraus, dass man für jedes $\epsilon > 0$ als Aufwandszahl $n_0 = 0$ nehmen kann. Es ist ja

$$|x_n - c| = |c - c| = |0| = 0 < \epsilon$$

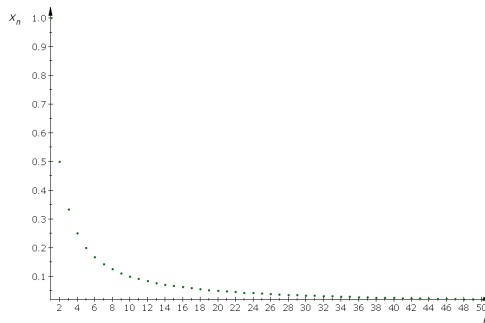
für alle n .

Es sei nun K ein archimedisch angeordneter Körper. Dann ist die Folge

$$x_n = \frac{1}{n}$$

konvergent mit dem Grenzwert 0. Sei dazu ein beliebiges $\epsilon \in K$, $\epsilon > 0$, vorgegeben. Aufgrund des Archimedes Axioms gibt es ein n_0 mit $n_0 > \frac{1}{\epsilon}$. Daraus folgt $\frac{1}{n_0} \leq \epsilon$. Insgesamt gilt damit für alle $n \geq n_0$ die Abschätzung

$$x_n = \frac{1}{n} \leq \frac{1}{n_0} \leq \epsilon.$$



LEMMA 5.7. *Es sei K ein angeordneter Körper und sei $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in K . Dann besitzt x_n maximal einen Grenzwert.*

Beweis. Nehmen wir an, dass es zwei verschiedene Grenzwerte x, y , $x \neq y$, gibt. Dann ist $d := |x - y| > 0$. Wir betrachten $\epsilon := d/3 > 0$. Wegen der Konvergenz gegen x gibt es ein n_0 mit

$$|x_n - x| \leq \epsilon \text{ für alle } n \geq n_0$$

und wegen der Konvergenz gegen y gibt es ein n'_0 mit

$$|x_n - y| \leq \epsilon \text{ für alle } n \geq n'_0.$$

Beide Bedingungen gelten dann gleichermaßen für $n \geq \max\{n_0, n'_0\}$. Sei n mindestens so groß wie dieses Maximum. Dann ergibt sich aufgrund der Dreiecksungleichung der Widerspruch

$$d = |x - y| \leq |x - x_n| + |x_n - y| \leq \epsilon + \epsilon = 2d/3.$$

□

Beschränktheit

DEFINITION 5.8. Es sei K ein angeordneter Körper und $M \subseteq K$ eine Teilmenge.

- (1) Ein Element $S \in K$ heißt eine *obere Schranke* für M , wenn $x \leq S$ gilt für alle $x \in M$.
- (2) Ein Element $s \in K$ heißt eine *untere Schranke* für M , wenn $x \geq s$ gilt für alle $x \in M$.
- (3) M heißt *nach oben beschränkt*, wenn eine obere Schranke für M existiert.
- (4) M heißt *nach unten beschränkt*, wenn eine untere Schranke für M existiert.
- (5) M heißt *beschränkt*, wenn M sowohl nach oben als auch nach unten beschränkt ist.

- (6) Ein Element $T \in M$ heißt das *Maximum* von M , wenn $T \geq x$ für alle $x \in M$ gilt.
- (7) Ein Element $t \in M$ heißt das *Minimum* von M , wenn $t \leq x$ für alle $x \in M$ gilt.
- (8) Eine obere Schranke T von M heißt das *Supremum* von M , wenn $T \leq S$ für alle oberen Schranken S von M gilt.
- (9) Eine untere Schranke t von M heißt das *Infimum* von M , wenn $t \geq s$ für alle unteren Schranken s von M gilt.

Obere und untere Schranken muss es nicht geben. Wenn S eine obere Schranke ist, so ist auch jede größere Zahl eine obere Schranke. Für das offene Intervall $]0, 1[$ ist 1 das Supremum, aber nicht das Maximum, da 1 nicht dazu gehört. Entsprechend ist 0 das Infimum, aber nicht das Minimum. Beim abgeschlossenen Intervall $[0, 1]$ sind die beiden Grenzen Maximum und Minimum.

All diese Begriffe werden auch für Folgen angewendet, und zwar für die Bildmenge $\{x_n \mid n \in \mathbb{N}\}$. Für die Folge $1/n$, $n \in \mathbb{N}_+$, ist 1 das Maximum und das Supremum, 0 ist das Infimum, aber nicht das Minimum.

LEMMA 5.9. *Es sei K ein angeordneter Körper. Wenn eine Folge in K konvergent ist, so ist sie auch beschränkt.*

Beweis. Es sei $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ die konvergente Folge mit dem Limes $x \in K$ und es sei $\epsilon > 0$. Aufgrund der Konvergenz gibt es ein n_0 derart, dass

$$|x_n - x| \leq \epsilon \text{ für alle } n \geq n_0.$$

Dann ist insbesondere

$$|x_n| \leq |x| + |x - x_n| \leq |x| + \epsilon \text{ für alle } n \geq n_0.$$

Unterhalb von n_0 gibt es nur endlich viele Zahlen, so dass das Maximum

$$B := \max_{n < n_0} \{|x_n|, |x| + \epsilon\}$$

wohldefiniert ist. Daher ist B eine obere Schranke und $-B$ eine untere Schranke für $\{x_n \mid n \in \mathbb{N}\}$. \square

Es ist einfach, beschränkte, aber nicht konvergente Folgen anzugeben.

BEISPIEL 5.10. Es sei K ein angeordneter Körper und sei $c \in K$, $c \neq 0$. Dann ist die *alternierende Folge*

$$x_n = (-1)^n c$$

beschränkt, aber nicht konvergent. Die Beschränktheit folgt direkt aus

$$|x_n| = |(-1)^n| |c| = |c|.$$

Konvergenz liegt aber nicht vor. Nehmen wir an, dass $x \geq 0$ der Grenzwert sei. Dann gilt für positives $\epsilon < |c|$ und jedes ungerade n die Beziehung

$$|x_n - x| = c + x \geq c > \epsilon,$$

so dass es Folgenwerte außerhalb dieser ϵ -Umgebung gibt. Analog kann man einen negativ angenommenen Grenzwert zum Widerspruch führen.

Wenn man im obigen Beispiel $x_n = (-1)^n c$ nur die geraden Indizes betrachtet, so ist $x_{2n} = c$ konstant. Entsprechend ist für ungerade Indizes $x_{2n+1} = -c$ konstant. Teilfolgen im Sinne der folgenden Definition können also andere Eigenschaften als die Folge selbst besitzen.

DEFINITION 5.11. Es sei K ein angeordneter Körper und sei $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in K . Zu jeder streng wachsenden¹ Abbildung $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$, $i \mapsto n_i$, heißt die Folge

$$i \mapsto x_{n_i}$$

eine *Teilfolge* der Folge.

DEFINITION 5.12. Es sei $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in einem angeordneten Körper K . Ein Element $x \in K$ heißt *Häufungspunkt* der Folge, wenn es für jedes $\epsilon > 0$ unendlich viele Folgenglieder x_n mit $|x_n - x| \leq \epsilon$ gibt.

DEFINITION 5.13. Eine Folge $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ in einem angeordneten Körper K heißt *bestimmt divergent* gegen $+\infty$, wenn es zu jedem $s \in K$ ein $N \in \mathbb{N}$ gibt mit

$$x_n \geq s \text{ für alle } n \geq N.$$

Sie heißt *bestimmt divergent* gegen $-\infty$, wenn es zu jedem $s \in K$ ein $N \in \mathbb{N}$ gibt mit

$$x_n \leq s \text{ für alle } n \geq N.$$

¹Also eine Abbildung mit $n_i > n_j$ für $i > j$.

Abbildungsverzeichnis

Quelle = Heron von Alexandria.jpg , Autor = Benutzer Frank C. Müller auf Commons, Lizenz = PD	1
Quelle = Konvergenz.svg , Autor = Benutzer Matthias Vogelgesang auf Commons, Lizenz = CC-by-sa 3.0	4
Quelle = Cauchy sequence - example.png , Autor = Benutzer Pred auf da.wikipedia, Lizenz = CC-by-sa 2.5	5