

## Archimedes

Der griechische Mathematiker Archimedes (\*287?-†212 v.Chr.) lebte in der Zeit des Hellenismus und des Aufstiegs Roms zur beherrschenden Macht zunächst im westlichen Mittelmeerraum in den Großstädten Alexandria (Ptolemäer, Museion) (zeitweise) und Syrakus (König Hieron II., 2. Punischer Krieg [218-201] und römische Belagerung und Eroberung von Syrakus [214/12 v.Chr.]). Kontakte des Archimedes zu den alexandrinischen Gelehrten Konon von Samos und Eratosthenes sind bezeugt; Archimedes soll ein Freund König Hierons II. von Syrakus (275-215 v.Chr.) gewesen sein. Einige Legenden ranken sich um seine Person ("Heureka"-Ausruf [Auftrieb und Wasserverdrängung], Tod); Archimedes soll der Erfinder der archimedischen Pumpe (Ägypten) und von während der Belagerung von Syrakus von griechischer Seite eingesetzten Maschinen und Waffen (Steinwurfmaschinen, Skorpione, Kräne, Spiegel?) gewesen sein. Jenseits der Legenden wird Archimedes erkennbar durch seine mathematischen Werke: *Über das Gleichgewicht ebener Flächen I/II* (Balkenwaage mit ebenen Flächen, Hebelgesetz, Schwerpunkt eines Parabelsegments), *Die Quadratur der Parabel* (Fläche eines Parabelsegments; ca.240 v.Chr.), *Über Kugel und Zylinder I/II* (Zylinder und Prismen, Kegel und Pyramide, Volumen- und Oberflächenverhältnis von Zylinder und Kugel), *Kreismessung*, *Über Spiralen* (archimedische Spiralen, Längen- und Flächenbeziehungen; ca.230 v.Chr.), *Über Paraboloiden, Hyperboloiden und Ellipsoide* (Volumina, Schwerpunkte), *Methodenlehre von den mechanischen Lehrsätzen* (v.220 v.Chr.), *Über schwimmende Körper I/II* (Auftrieb, spezifisches Gewicht; ca.220 v.Chr.), *Die Sandzahl* (Astronomie und Weltall), *Stomachion* (Archimedes-Palimpsest/Gebetbuch [10. Jahrhundert, 2. Hälfte/v.1229, Konstantinopel]; Gittervielecke [Picksche Flächenformel], Quadratzerlegung). In Archimedes' geometrische Beweise zu Flächen und Körpern fließen auch "infinitesimale" Überlegungen (Approximationen) mit ein. Auf Archimedes sollen laut Pappos von Alexandrien die archimedischen Körper (an den Ecken abgeflachte platonische Körper [Polyeder]) zurückgehen.

## Folgen

Eine Abbildung  $\{a_n\}: \mathbf{N} \rightarrow \mathbf{R}$ , die jeder natürlichen Zahl  $n$  eine reelle Zahl  $a_n$  zuordnet, heißt (unendliche) (Zahlen-) Folge:  $n \rightarrow a_n$  oder  $\{a_n\}_{n \in \mathbf{N}}$ ,  $a_n$  das  $n$ -te Folgenglied. Mit  $a_n = f(n)$  definiert  $f$  die Funktionsvorschrift der Folge.  $\{a_n\}_{n \in \mathbf{N}} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots\}$  heißt also eine Folge. Nun gilt:

- $\{c \cdot a_n\}$ ,  $\{a_n + b_n\}$ ,  $\{a_n \cdot b_n\}$ ,  $\{a_n / b_n\}$  usw. sind Folgen, soweit definiert.
- $\{a_n\}$  heißt nach unten beschränkt, wenn es eine untere Schranke  $S_u \in \mathbf{R}$  gibt mit:  $a_n \geq S_u$  ( $n \in \mathbf{N}$ ).
- $\{a_n\}$  heißt nach oben beschränkt, wenn es eine obere Schranke  $S_o \in \mathbf{R}$  gibt mit:  $a_n \leq S_o$  ( $n \in \mathbf{N}$ ).
- $\{a_n\}$  heißt beschränkt, wenn  $\{a_n\}$  nach oben und nach unten beschränkt ist, d.h.: es gibt eine untere Schranke  $S_u \in \mathbf{R}$  und eine obere Schranke  $S_o \in \mathbf{R}$  mit:  $S_u \leq a_n \leq S_o$  ( $n \in \mathbf{N}$ ).
- $\{a_n\}$  heißt monoton fallend, falls:  $a_n \geq a_{n+1}$  ( $n \in \mathbf{N}$ ).
- $\{a_n\}$  heißt monoton steigend, falls:  $a_n \leq a_{n+1}$  ( $n \in \mathbf{N}$ ).
- $\{a_n\}$  heißt konvergent, d.h. besitzt einen Grenzwert (Limes)  $g$ , wenn (für jedes  $\varepsilon > 0$ ) in jeder noch so kleinen ( $\varepsilon$ -) Umgebung um  $g$  (dem offenen Intervall  $(g-\varepsilon, g+\varepsilon)$ ) ab einem gewissen  $n$  ( $= n(\varepsilon)$ ) alle Folgenglieder liegen. Dann gilt:  $g = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ .

h) Satz (von Bolzano-Weierstraß): Jede beschränkte, monotone Folge  $\{a_n\}$  besitzt einen Grenzwert  $g = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ .

Folgen  $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ , bei denen sich Folgenglieder auf vorhergehende Folgenglieder beziehen, heißen rekursiv und lassen sich mit Hilfe einer Funktion  $f$  darstellen als:  $a_n = f(a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_{n-k})$  mit vorgegebenem  $a_1, a_2, \dots, a_k$  (rekursive Folge  $k$ -ter Ordnung),  $a_n = f(a_{n-1})$  mit vorgegebenem  $a_1$  (rekursive Folge 1. Ordnung).

### Näherung für die Kreiszahl $\pi$ nach Archimedes

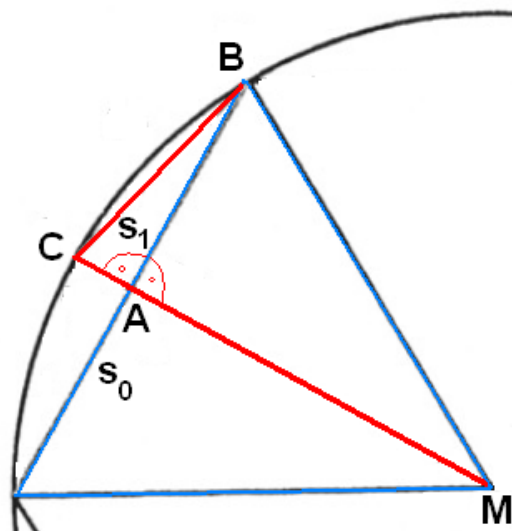
Ein Kreis mit Radius  $r$  hat den Umfang  $u = 2\pi r$ , so dass die Kreiszahl  $\pi$  sich als  $\pi = U/2r$  bestimmt. Nähert man also einen Kreis mit einbeschriebenen Vielecken an, so nähert sich der Umfang der Vielecke dem Kreisumfang an, und die Kreiszahl lässt sich näherungsweise bestimmen. Sind die Vielecke regelmäßig, so vereinfacht sich die näherungsweise Berechnung. Sind die Vielecke regelmäßige 6-, 12-, 24-, 48-Ecke usw., so gehen wir bei der Kreisnäherung so vor, wie der griechische Mathematiker Archimedes vorgegangen ist.

Für einen Kreis mit Radius  $r$  und ein im Kreis einbeschriebenes regelmäßiges Sechseck mit Sechseckseite  $s_0$  gilt zunächst:  $s_0 = r$ ,  $U_0 = 6r = 6s_0$  (ein regelmäßiges Sechseck besteht aus sechs gleichseitigen Dreiecken). Die Seitenlänge des regelmäßigen Zwölfecks erhalten wir im Dreieck ABC bzw. ABM nach dem Satz des Pythagoras mit:

$$s_1^2 = \left(\frac{s_0}{2}\right)^2 + \overline{AC}^2 \quad (*)$$

bzw. mit:

$$\overline{AC} = r - \overline{AM} = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{s_0}{2}\right)^2} \quad (**).$$



Aus den beiden Beziehungen (\*) und (\*\*) ergibt sich (u.a. mit den binomischen Formeln):

$$\begin{aligned} s_1^2 &= \left(\frac{s_0}{2}\right)^2 + \overline{AC}^2 = \left(\frac{s_0}{2}\right)^2 + \left(r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{s_0}{2}\right)^2}\right)^2 = \left(\frac{s_0}{2}\right)^2 + r^2 - 2r\sqrt{r^2 - \left(\frac{s_0}{2}\right)^2} + r^2 - \left(\frac{s_0}{2}\right)^2 = \\ &= 2r^2 - 2r\sqrt{r^2 - \left(\frac{s_0}{2}\right)^2} = 2r^2 - 2r\sqrt{\frac{4r^2 - s_0^2}{4}} = 2r^2 - r\sqrt{4r^2 - s_0^2} \end{aligned}$$

Wir verallgemeinern dann die Beziehung  $s_1 = \sqrt{2r^2 - r\sqrt{4r^2 - s_0^2}}$  (Wurzelziehen!) zu:

$$s_{n+1} = \sqrt{2r^2 - r\sqrt{4r^2 - s_n^2}}, s_0 = r (***)$$

und erhalten damit eine rekursive Folge der Seitenlängen  $s_n$  einbeschriebener regelmäßiger 6-, 12-, 24-, 48-Ecke usw. Die rekursive Folge  $\{s_n\}$  in (\*\*\*) ist Grundlage der Folge der Vieleckumfänge:

$$U_n = 6 \cdot 2^n \cdot s_n$$

u.a. mit  $U_1 = 12s_1$ .

Die durch die rekursive Folge  $\{s_n\}$  in (\*\*\*) beschriebene Iteration ist nachfolgend für den Kreisradius  $r = 0,5$  durchgeführt und ergibt in der Tat eine Näherung für die Kreiszahl  $\pi$ ; hier mit:  $U_n \rightarrow \pi$  für  $n \rightarrow \infty$ .

Tabelle: Regelmäßige Vielecke

Iteration:  $s_{n+1} = [2r^2 - r(4r^2 - s_n^2)^{1/2}]^{1/2}$ ,  $s_0 = r \rightarrow U_n = 6 \cdot 2^n \cdot s_n \rightarrow \pi_n = U_n/r/2$

		Radius $r =$	Kreisumfang $u_{Kr} =$	Kreiszahl $\pi =$
		0.5	3.141592653589793	3.141592653589793
Iteration $n =$	Ecken- anzahl	Vieleckseite $s_n =$	Vieleckumfang $U_n =$	Näherung für $\pi$ $\pi_n =$
0	6	0.5	3	3
1	12	0.2588190451025208	3.1058285412302497	3.1058285412302497
2	24	0.13052619222005154	3.132628613281237	3.132628613281237
3	48	0.06540312923014317	3.139350203046872	3.139350203046872
4	96	0.03271908282177635	3.14103195089053	3.14103195089053
5	192	0.01636173162648617	3.1414524722853443	3.1414524722853443
6	384	0.008181139603936515	3.141557607911622	3.141557607911622
7	768	0.004090604026235594	3.141583892148936	3.141583892148936
8	1536	0.002045306291169767	3.1415904632367617	3.1415904632367617
9	3072	0.0010226536803525547	3.1415921060430483	3.1415921060430483
10	6144	0.00051132690699677	3.1415925165881546	3.1415925165881546
11	12288	0.00025566346180344964	3.1415926186407894	3.1415926186407894
12	24576	0.00012783173198735415	3.1415926453212157	3.1415926453212157
13	49152	0.00006391586599367708	3.1415926453212157	3.1415926453212157
14	98304	0.00003195793299683854	3.1415926453212157	3.1415926453212157
15	196608	0.00001597896649841927	3.1415926453212157	3.1415926453212157

Betrachten wir die Folge der Umfänge  $U_n = 6 \cdot 2^n \cdot s_n$ , so lässt sich das Folgende aussagen:

- Die Folge  $\{U_n\}$  ist monoton steigend.
- Die Folge  $\{U_n\}$  ist beschränkt durch den Kreisumfang  $u = 2\pi r$ .

Dabei ergibt sich Aussage a) aus der Dreiecksungleichung, mithin aus:  $2s_{n+1} \geq s_n$ , woraus durch Multiplikation der Ungleichung mit  $6 \cdot 2^n$  folgt:  $2 \cdot 6 \cdot 2^n \cdot s_{n+1} \geq 6 \cdot 2^n \cdot s_n$ , mithin:  $6 \cdot 2^{n+1} \cdot s_{n+1} \geq 6 \cdot 2^n \cdot s_n$ , also:  $U_{n+1} \geq U_n$ .

Die Richtigkeit der Aussage b) erklärt sich daraus, dass für zwei Punkte P und Q auf einem Kreis die Länge der Strecke (Sehne)  $\overline{PQ}$  kleiner als die Länge des Kreisbogens  $\widehat{PQ}$  ist. Die Vieleckseite  $s_n$  liege daher zwischen den Kreispunkten P und Q. Es gilt:  $s_n \leq \widehat{PQ}$  und nach Multiplikation der Ungleichung mit  $6 \cdot 2^n$ :  $6 \cdot 2^n \cdot s_n \leq 6 \cdot 2^n \cdot \widehat{PQ}$  und damit:  $U_n \leq u = 2\pi r$ .

Aus den Aussagen a) und b) folgt nach dem Satz für monoton (steigende), beschränkte Folgen, dass die Folge  $\{U_n\}$  einen Grenzwert  $g$  besitzt. Da der Kreisumfang  $u = 2\pi r$  die kleinste obere Schranke (Supremum) für die Umfangsfolge  $U_n$  ist, lautet der Grenzwert:

$$g = \lim_{n \rightarrow \infty} U_n = 2\pi r,$$

so dass sich die Kreiszahl  $\pi$  theoretisch aus:

$$\pi = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{U_n}{2r}$$

errechnet, praktisch (näherungsweise) aus:

$$\pi \approx \frac{U_n}{2r} \text{ für hinreichend großes } n.$$