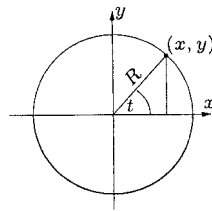


# 31. Kurven in Ebene und Raum

Für **ebene Kurven** (also Kurven im  $\mathbb{R}^2$ ) gibt es mehrere Darstellungsmöglichkeiten:

- **implizite Darstellung** :  $F(x, y) = 0$
- **explizite Darstellung** :  $y = f(x)$  oder  $x = g(y)$
- **Parameterdarstellung** :  $x = x(t)$  ,  $y = y(t)$  mit **Parameter**  $t$

**Beispiel.** Durch die Gleichung  $x^2 + y^2 = R^2$  ,  $R > 0$  bzw. anders angeschrieben,  $F(x, y) = x^2 + y^2 - R^2 = 0$  wird eine (volle!) Kreislinie im kartesischen Koordinatensystem dargestellt.



Offenbar ist  $y = \pm\sqrt{R^2 - x^2}$  (bzw.  $x = \pm\sqrt{R^2 - y^2}$ ) .

Wir erhalten also eine explizite Darstellung lediglich für den oberen (bzw. unteren) Halbkreis durch

$$y = \sqrt{R^2 - x^2} \quad (\text{bzw. } y = -\sqrt{R^2 - x^2})$$

oder den linken (bzw. rechten) Halbkreis durch

$$x = -\sqrt{R^2 - y^2} \quad (\text{bzw. } x = \sqrt{R^2 - y^2})$$

Führen wir einen Parameter  $t$  durch

$$x = x(t) = R \cos t \quad , \quad y = y(t) = R \sin t$$

ein, dann gilt  $x^2 + y^2 = R^2 \cos^2 t + R^2 \sin^2 t = R^2(\cos^2 t + \sin^2 t) = R^2$

Der Parameter  $t$  ist dabei der Winkel. Um den gesamten Kreis zu durchlaufen, muss  $0 \leq t < 2\pi$  sein.

**Definition.** Die allgemeine Parameterdarstellung einer ebenen Kurve lautet also

$$x = x(t) , y = y(t) .$$

Der Parameter  $t$  kommt dabei aus einem Parameterintervall  $t \in [a, b]$  und wir nehmen weiters an, dass die Funktionen  $x(t)$  und  $y(t)$  (stückweise) stetig differenzierbar sind.

**Bemerkung.** Jeder Parameterwert  $t$  liefert also einen Punkt  $P$  der Ebene mit den Koordinaten  $(x(t), y(t))$  .

Umgekehrt ist es oft wichtig, dass jedem Kurvenpunkt auch genau ein Parameterwert entspricht.

Bei  $x(t) = R \cos t$  ,  $y(t) = R \sin t$  ,  $t \in [0, 2\pi)$  entspricht jedem Punkt der Kreislinie genau ein Parameterwert.

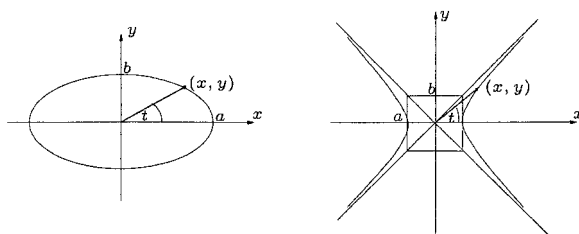
Mittels  $x(t) = R \cos 2t$  ,  $y(t) = R \sin 2t$  ,  $t \in [0, 2\pi)$  wird ebenfalls die Kreislinie beschrieben, allerdings wird der Kreis zweimal durchlaufen!

Eine Parameterdarstellung liefert wegen  $t \in [a, b]$  einen **Durchlaufsin** bzw. Durchlaufrichtung, und eine **Durchlaufgeschwindigkeit**.

**Beispiel.**  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$  ist die Gleichung einer Ellipse.

Offenbar ist  $x = a \cos t$  ,  $y = b \sin t$  ,  $t \in [0, 2\pi)$  eine Parameterdarstellung der Ellipse, weil

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = \cos^2 t + \sin^2 t = 1 .$$



$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$  ist die Gleichung einer Hyperbel.

Offenbar ist  $x = a \cosh t$ ,  $y = b \sinh t$ ,  $t \in \mathbb{R}$  eine Parameterdarstellung der Hyperbel, weil

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = \cosh^2 t - \sinh^2 t = 1 .$$

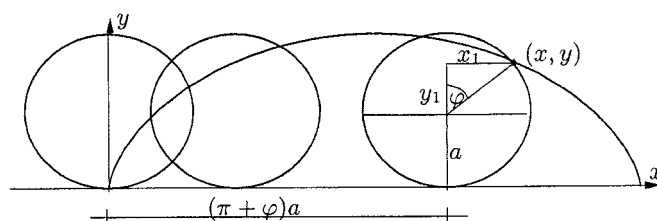
**Bemerkung.** Ohne Beweis sei erwähnt, dass der Parameter  $t$  den Flächeninhalt des Hyperbelsektors darstellt,

$$t = \operatorname{arcosh} \frac{x}{a} \quad \text{bzw.} \quad t = \operatorname{arsinh} \frac{y}{b}$$

Aus diesem Grund werden die Umkehrfunktionen zu den hyperbolischen Funktionen auch Area-Funktionen genannt.

**Beispiel.** Ein Kreis soll gleitfrei auf der  $x$ -Achse abgerollt werden. Betrachtet man einen Punkt  $(x, y)$  auf dem Kreis, so beschreibt er während dieses Vorgangs eine Kurve, die **Zykloide** genannt wird.

Wir betrachten z.B. den Fall, dass der Kreis um den Winkel  $t = \pi + \varphi$  weitergerollt wurde.



$$x_1 = a \cdot \sin \varphi \quad \Rightarrow \quad x = (\pi + \varphi)a + x_1 = (\pi + \varphi)a + a \sin \varphi$$

$$y_1 = a \cdot \cos \varphi \quad \Rightarrow \quad y = a + a \cos \varphi = a(1 + \cos \varphi)$$

Mit  $t = \pi + \varphi$  folgt nun

$$\cos \varphi = \cos(t - \pi) = -\cos t \quad , \quad \sin \varphi = -\sin(\pi - t) = -\sin t$$

Folglich erhalten wir als Parameterdarstellung für die Zykloide

$$x = a \cdot (t - \sin t) \quad , \quad y = a \cdot (1 - \cos t)$$

**Bemerkung.** Bei der Parameterdarstellung einer ebenen Kurve können wir die beteiligten Funktionen als Komponenten eines Vektors auffassen.

$$\vec{x} = \vec{x}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix}, \quad t \in [a, b]$$

Die **Ableitung** dieser Vektorfunktion ist definiert als

$$\frac{d}{dt}\vec{x}(t) = \dot{\vec{x}}(t) = \begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{pmatrix}$$

**Beispiel.**  $\vec{x}(t) = \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \end{pmatrix} \Rightarrow \dot{\vec{x}}(t) = \begin{pmatrix} -\sin t \\ \cos t \end{pmatrix}$

Von den komplexen Zahlen her ist weiters die **Polardarstellung** mittels der Polarkoordinaten  $(r, \varphi)$  bekannt. Der Zusammenhang mit den kartesischen Koordinaten ist durch

$$x = r \cos \varphi, \quad y = r \sin \varphi \quad \text{bzw.}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \tan \varphi = \frac{y}{x} \Rightarrow \varphi = \arctan \frac{y}{x}$$

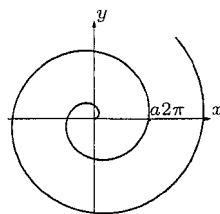
gegeben.

Eine ebene Kurve kann somit auch in Polarkoordinaten durch  $r = r(\varphi)$  gegeben sein.

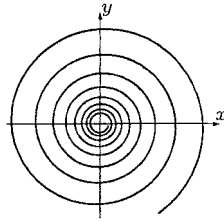
**Beispiel.** Die Kreisgleichung  $x^2 + y^2 = R^2$  schreibt sich in Polarkoordinaten

$$R^2 = r^2 \cos^2 \varphi + r^2 \sin^2 \varphi = r^2 \Rightarrow r = R \quad \forall \varphi$$

**Beispiel.** Die **Archimedische Spirale** hat die Gleichung  $r = a\varphi$ , wobei  $a \in \mathbb{R}$ ,  $a > 0$  ist und  $\varphi \geq 0$ .



**Beispiel.** Die **Logarithmische Spirale** hat die Gleichung  $r = e^{-a\varphi}$ , wobei  $a \in \mathbb{R}$ ,  $a > 0$  ist und  $\varphi \geq 0$ .



Wir beobachten, dass  $\lim_{\varphi \rightarrow \infty} r = \lim_{\varphi \rightarrow \infty} \frac{1}{e^{a\varphi}} = 0$ .

Wir interessieren uns nun für die **Steigung**  $k$  der Tangente an einen Kurvenpunkt  $P(x, y)$ .

Liegt die Darstellung  $y = y(x)$  vor, dann ist  $k = y'(x) = \frac{dy}{dx}$ .

Im Falle einer Parameterdarstellung  $x = x(t)$ ,  $y = y(t)$  ist

$$\vec{x}(t) = \begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{pmatrix}$$

ein Vektor, der in Tangentenrichtung weist.

Kann die Kurve (lokal) auch in der Form  $y = y(x)$  geschrieben werden, gilt

$$k = y'(x) = \frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dy}{dt}}{\frac{dx}{dt}} = \frac{\dot{y}}{\dot{x}}$$

**Bemerkung.** Für  $\dot{x} = 0$ ,  $\dot{y} \neq 0$  liegt eine vertikale Tangente vor, und für  $\dot{x} \neq 0$ ,  $\dot{y} = 0$  eine horizontale Tangente.

Für  $\dot{x} = 0$ ,  $\dot{y} = 0$  existiert keine Tangente, man spricht von **singulären Punkten**.

**Beispiel.**  $x = a(t - \sin t)$ ,  $y = a(1 - \cos t)$  ist die Parameterdarstellung einer Zykloide.

$$\vec{x} = \vec{x}(t) = \begin{pmatrix} a(t - \sin t) \\ a(1 - \cos t) \end{pmatrix} \Rightarrow \dot{\vec{x}}(t) = \begin{pmatrix} a(1 - \cos t) \\ a \sin t \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} 1 - \cos t \\ \sin t \end{pmatrix}$$

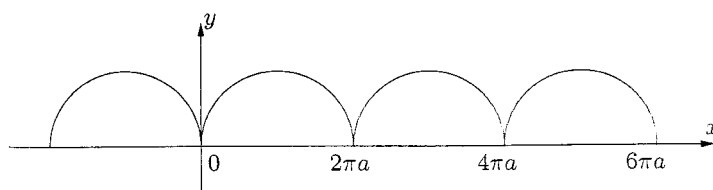
Die singulären Punkte sind durch die Gleichungen

$$1 - \cos t = 0 \quad , \quad \sin t = 0 \quad \text{gegeben.}$$

$$1 - \cos t = 0 \Leftrightarrow \cos t = 1 \Rightarrow t = 2n\pi \quad , \quad n \in \mathbb{Z}$$

$$\sin t = 0 \Rightarrow t = m\pi \quad , \quad m \in \mathbb{Z}$$

Insgesamt also für  $t = 0 \quad , \quad \pm 2\pi \quad , \quad \pm 4\pi \quad , \quad \pm 6\pi, \dots$



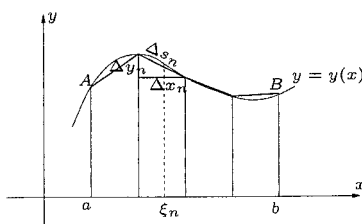
Aus der Grafik sehen wir, dass an der Stelle  $P(0,0)$  (sowie an allen weiteren Stellen  $(2na\pi, 0)$   $n \in \mathbb{Z}$ ) eine Spitze vorliegt, was sich auch ergibt aus

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} k = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\sin t}{1 - \cos t} = \left(\frac{0}{0}\right) \stackrel{l'Hosp}{=} \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\cos t}{\sin t} = +\infty \quad \text{und} \quad \lim_{t \rightarrow 0^-} k = -\infty$$

Nun betrachten wir das Problem der **Bogenlänge einer Kurve**.

Sei eine Kurve in der Form  $y = f(x)$  ,  $x \in [a, b]$  gegeben. Wir wollen die Bogenlänge der Kurve vom Punkt  $A(a, f(a))$  zum Punkt  $B(b, f(b))$  bestimmen.

Diese kann angenähert werden durch die Länge eines approximierenden Polygonzuges.



$$\Delta x_n = x_n - x_{n-1} \quad , \quad \Delta y_n = y_n - y_{n-1} = f(x_n) - f(x_{n-1})$$

$$\Delta s_n^2 = \Delta x_n^2 + \Delta y_n^2 = \left(1 + \left(\frac{\Delta y_n}{\Delta x_n}\right)^2\right) \cdot \Delta x_n^2 \Rightarrow$$

$$\Delta s_n = \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y_n}{\Delta x_n}\right)^2} \cdot \Delta x_n$$

Für die gesuchte Bogenlänge  $s$  folgt damit

$$s \approx \sum_{n=1}^N \Delta s_n = \sum_{n=1}^N \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y_n}{\Delta x_n}\right)^2} \cdot \Delta x_n$$

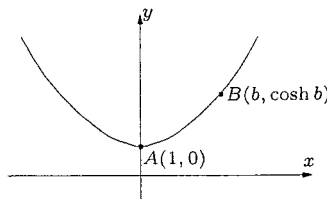
Unter Anwendung des Mittelwertsatzes entspricht der Differenzenquotient  $\frac{\Delta y_n}{\Delta x_n}$  genau der Ableitung  $y'(\xi_n)$  an einer Zwischenstelle  $\xi_n \in [x_{n-1}, x_n]$ , also

$$s \approx \sum_{n=1}^N \sqrt{1 + (y'(\xi_n))^2} \cdot \Delta x_n$$

Dies stellt wiederum eine Riemann'sche Summe dar, deren Grenzwert das Integral

$$s = \int_a^b \sqrt{1 + (y'(x))^2} dx \quad \text{liefert.}$$

**Beispiel.** Gesucht ist die Bogenlänge von  $y = \cosh x$  (Kettenlinie) im Intervall  $[0, b]$ .



$$y' = \sinh x \Rightarrow s = \int_0^b \sqrt{1 + \sinh^2 x} dx = \int_0^b \cosh x dx = \sinh x \Big|_0^b = \sinh b$$

Ist die Kurve in einer Parameterdarstellung  $x = x(t)$ ,  $y = y(t)$  gegeben, verwenden wir die Substitution  $y' = \frac{\dot{y}}{\dot{x}}$  und  $dx = \dot{x} dt$ . Gilt  $a = x(\alpha)$  und  $b = x(\beta)$ , erhalten wir

$$s = \int_a^b \sqrt{1 + y'^2} dx = \int_\alpha^\beta \sqrt{1 + \left(\frac{\dot{y}}{\dot{x}}\right)^2} \dot{x} dt = \int_\alpha^\beta \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} dt = \int_\alpha^\beta |\dot{x}(t)| dt$$

Der Integrand ist also die Länge des Tangentialvektors!

**Bemerkung.** Eine Kurve  $\vec{x} = \vec{x}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix}$ ,  $t \in [a, b]$  heißt **glatt**, wenn die Ableitungen  $\dot{x}(t)$  und  $\dot{y}(t)$  stetige Funktionen sind.

In diesem Fall kann die Bogenlänge  $s$  als Funktion des Parameters  $t$  (= Länge der Kurve vom Punkt  $\vec{x}(a)$  zu einem beliebigen Punkt  $\vec{x}(t)$ ) angegeben werden durch

$$s(t) = \int_a^t |\dot{\vec{x}}(u)| \, du \quad (\text{und es gilt dann } \frac{ds}{dt} = |\dot{\vec{x}}(t)|)$$

Ist die Kurve in Polardarstellung (dies ist eine spezielle Parameterdarstellung) gegeben, erhalten wir (Herleitung siehe Skriptum)

$$s = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{\dot{r}^2 + r^2} \, d\varphi$$

**Beispiel.** Sei  $r = e^{-\varphi}$  (logarithmische Spirale).

$$\begin{aligned} s &= \int_0^b \sqrt{\dot{r}^2 + r^2} \, d\varphi = \int_0^b \sqrt{e^{-2\varphi} + e^{-2\varphi}} \, d\varphi = \sqrt{2} \int_0^b e^{-\varphi} \, d\varphi = \\ &= \sqrt{2}(-e^{-\varphi}) \Big|_0^b = \sqrt{2}(1 - e^{-b}) \end{aligned}$$

Die Gesamtlänge ist

$$s = \int_0^{\infty} \sqrt{\dot{r}^2 + r^2} \, d\varphi = \lim_{b \rightarrow \infty} \int_0^b \sqrt{\dot{r}^2 + r^2} \, d\varphi = \lim_{b \rightarrow \infty} \sqrt{2}(1 - e^{-b}) = \sqrt{2}$$

**Beispiel.** Berechne die Bogenlänge eines Bogens der Zykloide

$$x = a(t - \sin t), \quad y = a(1 - \cos t), \quad 0 \leq t \leq 2\pi.$$

$$\dot{x} = a(1 - \cos t), \quad \dot{y} = a \sin t \quad \Rightarrow$$

$$s = \int_0^{2\pi} \sqrt{a^2(1 - \cos t)^2 + a^2 \sin^2 t} \, dt = a \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - 2 \cos t + \cos^2 t + \sin^2 t} \, dt =$$



$$= a\sqrt{2} \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - \cos t} dt$$

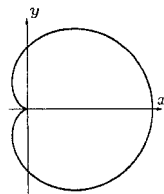
Wir verwenden nun die trigonometrische Formel

$$1 - \cos t = 2 \sin^2 \frac{t}{2} \Rightarrow \sqrt{1 - \cos t} = \sqrt{2} \cdot \left| \sin \frac{t}{2} \right|$$

Für  $0 \leq t \leq 2\pi$  ist  $0 \leq \frac{t}{2} \leq \pi$ , und dort ist der Sinus positiv, also können wir die Betragstriche weglassen und erhalten

$$s = a\sqrt{2} \int_0^{2\pi} \sqrt{2} \sin \frac{t}{2} dt = 2a \cdot 2(-\cos \frac{t}{2}) \Big|_0^{2\pi} = 8a$$

**Beispiel.** Bestimme die Bogenlänge von  $r = a(1 + \cos \varphi)$ ,  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  (**Kardoide**, Herzkurve)



Mit  $\dot{r} = -a \sin \varphi$  folgt

$$\begin{aligned} s &= \int_0^{2\pi} \sqrt{\dot{r}^2 + r^2} d\varphi = \int_0^{2\pi} \sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + a^2(1 + \cos \varphi)^2} d\varphi = \\ &= a\sqrt{2} \int_0^{2\pi} \sqrt{1 + \cos \varphi} d\varphi \end{aligned}$$

Wegen  $1 + \cos \varphi = 2 \cos^2 \frac{\varphi}{2} \Rightarrow \sqrt{1 + \cos \varphi} = \sqrt{2} \left| \cos \frac{\varphi}{2} \right|$  folgt

$$\begin{aligned} s &= 2a \int_0^{2\pi} \left| \cos \frac{\varphi}{2} \right| d\varphi = 2a \left( \int_0^{\pi} \cos \frac{\varphi}{2} d\varphi + \int_{\pi}^{2\pi} (-\cos \frac{\varphi}{2}) d\varphi \right) = \\ &= 2a \cdot (2 \sin \frac{\varphi}{2} \Big|_0^{\pi} + (-2 \sin \frac{\varphi}{2}) \Big|_{\pi}^{2\pi}) = 8a \end{aligned}$$

Beachtet man die Symmetrieeigenschaften der Kurve, kann einfacher gerechnet werden

$$s = 2 \cdot 2a \int_0^{\pi} \cos \frac{\varphi}{2} d\varphi = 4a \cdot 2 \sin \frac{\varphi}{2} \Big|_0^{\pi} = 8a$$

Eine weitere Eigenschaft einer ebenen Kurve ist ihre **Krümmung**.

Wir betrachten eine glatte Kurve  $\vec{x}(s)$  mit der Bogenlänge  $s$  als Parameter.

Dann stellt sich heraus, dass  $\vec{x}'(s) = \vec{t}$  der normierte Tangentenvektor ist (also der Tangentenvektor mit Länge 1).

Die **Krümmung**  $\kappa$  ist ein Maß für die Änderung des normierten Tangentenvektors bezüglich der Bogenlänge und definiert durch

$$\kappa(s) = \left| \frac{d\vec{t}}{ds} \right| = |\vec{t}'(s)| = |\vec{x}''(s)|$$

Für eine beliebige Parameterdarstellung  $\vec{x}(t)$  ist  $\vec{t} = \frac{1}{|\dot{\vec{x}}(t)|} \dot{\vec{x}}(t)$ .

Wegen  $\frac{d\vec{t}}{dt} = \frac{d\vec{t}}{ds} \cdot \frac{ds}{dt}$  ist  $\kappa(t) = \left| \frac{\frac{d\vec{t}}{dt}}{\frac{ds}{dt}} \right| = \frac{|\dot{\vec{t}}(t)|}{|\dot{\vec{x}}(t)|}$

**Beispiel.** Man bestimme die Krümmung des Kreises  $\vec{x}(t) = \begin{pmatrix} R \cos t \\ R \sin t \end{pmatrix}$ , wobei  $0 \leq t \leq 2\pi$ .

$$\dot{\vec{x}}(t) = \begin{pmatrix} -R \sin t \\ R \cos t \end{pmatrix} \Rightarrow \vec{t}(t) = \begin{pmatrix} -\sin t \\ \cos t \end{pmatrix} \Rightarrow \dot{\vec{t}}(t) = \begin{pmatrix} -\cos t \\ -\sin t \end{pmatrix}$$

Wegen  $|\dot{\vec{x}}(t)| = R$  und  $|\dot{\vec{t}}(t)| = 1$  ist  $\kappa(t) = \frac{1}{R}$ .

**Satz.**

1) Für eine Kurve in (allgemeiner) Parameterdarstellung  $\vec{x} = \vec{x}(t)$  ist die Krümmung gegeben durch

$$\kappa(t) = \frac{|\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}y|}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}$$

2) Für eine Kurve in expliziter Darstellung  $y = f(x)$  ist die Krümmung gegeben durch

$$\kappa(x) = \frac{|f''(x)|}{(1+(f'(x))^2)^{3/2}}$$

**Beispiel.** Für die Parabel  $y = \frac{1}{4}x^2$  bestimme man die Krümmung in

den Punkten  $x_1 = 0$  und  $x_2 = 1$  sowie jene Stellen, wo die Krümmung extremal ist.

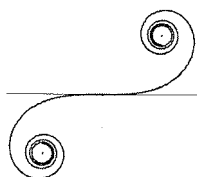
$$y' = \frac{1}{2}x \quad , \quad y'' = \frac{1}{2} \quad \Rightarrow \quad \kappa(x) = \frac{\frac{1}{2}}{\left(1 + \frac{x^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{4}{(4+x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Damit  $\kappa(0) = \frac{1}{2}$  ,  $\kappa(1) = \frac{4}{5^{\frac{3}{2}}} \approx 0.358$

$$\kappa(x) \text{ extremal} \Rightarrow \kappa'(x) = -\frac{12x}{(4+x^2)^{\frac{5}{2}}} = 0 \Rightarrow x = 0.$$

**Beispiel. (Klothoide oder Cornu-Spirale)**

$$\vec{x}(t) = \begin{pmatrix} \int_0^t \cos \frac{\pi u^2}{2} du \\ \int_0^t \sin \frac{\pi u^2}{2} du \end{pmatrix} \quad , \quad t \in \mathbb{R}$$



$$\dot{\vec{x}}(t) = \begin{pmatrix} \cos \frac{\pi t^2}{2} \\ \sin \frac{\pi t^2}{2} \end{pmatrix} .$$

Damit ist die Bogenlänge von  $t = 0$  bis  $t = a > 0$  gegeben durch

$$s = \int_0^a \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} dt = \int_0^a dt = a$$

Für die Berechnung der Krümmung gilt

$$y'(x) = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \tan \frac{\pi t^2}{2}$$

$$y''(x) = \frac{d}{dx} \left( \frac{dy}{dx} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{dy}{dx} \right) \cdot \frac{dt}{dx} = \frac{\pi t}{\cos^3 \frac{\pi t^2}{2}}$$

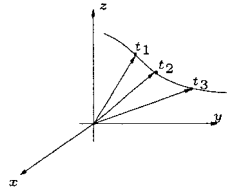
Folglich ist  $\kappa = \frac{|y''|}{|1+(y')^2|^{\frac{3}{2}}} = \dots = \pi t$

Dies bedeutet, dass die Krümmung linear mit  $t$  zunimmt.

In analoger Weise stellt die vektorwertige Funktion

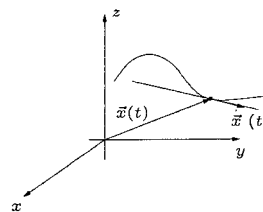
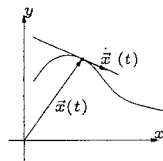
$$\vec{x} = \vec{x}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix}, \quad t \in [a, b]$$

wobei die (Komponenten-)Funktionen stückweise stetig differenzierbar sind, eine **Raumkurve** dar.



Die **Ableitung** der Vektorfunktion  $\vec{x}(t)$  ist erklärt durch

$$\frac{d}{dt} \vec{x}(t) = \dot{\vec{x}}(t) = \begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{z}(t) \end{pmatrix}$$



**Bemerkung.** Der Vektor  $\dot{\vec{x}}(t)$  ist ein Vektor, der in Richtung der Tangente weist.

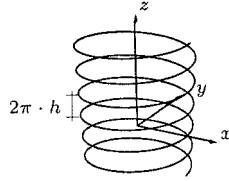
Wird die Variable  $t$  als Zeit interpretiert, dann ist  $\vec{v}(t) = \dot{\vec{x}}(t)$  der **Geschwindigkeitsvektor** und die Momentangeschwindigkeit ist durch  $|\vec{v}(t)|$  gegeben.

Die **Bogenlänge** einer Raumkurve  $\vec{x}(t)$  ist erklärt durch

$$s = \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} dt = \int_{t_0}^{t_1} |\dot{\vec{x}}(t)| dt$$

**Beispiel.** Die **Schraubenlinie** hat die Parameterdarstellung

$$\vec{x}(t) = \begin{pmatrix} a \cos t \\ a \sin t \\ h \cdot t \end{pmatrix}, \text{ wobei } a, h \text{ Konstante sind.}$$



Die Ganghöhe ist offenbar  $2\pi h$ .

Ist  $a = 0$ , erhalten wir eine Gerade ( $z$ -Achse). Ist  $h = 0$ , dann entspricht die Schraubenlinie der Kreislinie in der  $xy$ -Ebene.

Für die (allgemeine) Bogenlänge ergibt sich

$$\begin{aligned} s &= \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} dt = \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{(-a \sin t)^2 + (a \cos t)^2 + h^2} dt = \\ &= \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{a^2 + h^2} dt = \sqrt{a^2 + h^2} \cdot t \Big|_{t_0}^{t_1} \end{aligned}$$

Speziell ist die Bogenlänge für einen Gang (einen Umlauf) damit

$$s = \sqrt{a^2 + h^2} \cdot t \Big|_0^{2\pi} = 2\pi \sqrt{a^2 + h^2}$$