3. Kreisbewegung

- Ein wichtiger technischer Sonderfall ist die Bewegung auf einer Kreisbahn.
- Dabei hat der Punkt zu jedem Zeitpunkt den gleichen Abstand vom Kreismittelpunkt.
- Wenn sich ein starrer Körper um eine feste Achse dreht, bewegen sich seine Punkte auf Kreisbahnen.

- Beispiele:
  - Punkte auf einem Rad
  - Zahnräder im Getriebe
  - Turbinenschaufeln
  - Hubschrauberrotor
  - Drehkran

3. Kreisbewegung

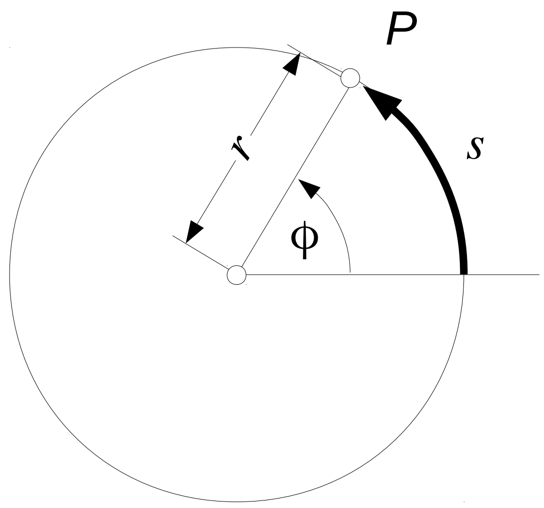
3.1 Kreisbewegung als eindimensionale Bewegung

- Die Kreisbewegung kann als Bewegung auf einer gegebenen Kreisbahn betrachtet werden.
- Bei einer Bewegung auf einer Kreisbahn kann als Ortskoordinate anstelle der Bogenlänge auch der Winkel gewählt werden.
- Die Wahl des Winkels als Ortskoordinate führt auf die Begriffe der Winkelgeschwindigkeit und der Winkelbeschleunigung.

3.1 Kreisbewegung als eindimensionale Bewegung

- Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit:
  - Für den auf der Kreisbahn zurückgelegten Weg gilt:

$$s(t) = r\,\phi(t)$$



  - Dabei muss der Winkel im Bogenmaß angegeben werden.
  - Die Bahngeschwindigkeit berechnet sich zu

$$v(t) = \frac{ds}{dt}(t) = \dot{s}(t) = r\,\dot{\phi}(t)$$

3.1 Kreisbewegung als eindimensionale Bewegung

- Die zeitliche Ableitung des Winkels wird als *Winkelgeschwindigkeit* bezeichnet:

$$\omega(t)=\dot{\phi}(t)$$

- Zwischen Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit besteht die Beziehung

$$\boxed{v(t)=\omega(t)\,r}$$

- Die Einheit der Winkelgeschwindigkeit ist 1 pro Zeiteinheit.

- Geläufige Einheiten: $\frac{1}{\mathrm{s}}=\frac{60}{\mathrm{min}}, \quad \frac{1}{\mathrm{min}}=\frac{1}{60}\frac{1}{\mathrm{s}}$

3.1 Kreisbewegung als eindimensionale Bewegung

- Bahnbeschleunigung und Winkelbeschleunigung:
  - Die Bahnbeschleunigung ist die zeitliche Ableitung der Bahngeschwindigkeit:

$$a_t(t)=\dot{v}(t)=\ddot{s}(t)=r\,\ddot{\phi}(t)$$

  - Die zeitliche Ableitung der Winkelgeschwindigkeit wird als *Winkelbeschleunigung* bezeichnet:

$$\dot{\omega}(t)=\ddot{\phi}(t)$$

  - Zwischen Bahnbeschleunigung und Winkelbeschleunigung besteht die Beziehung

$$\boxed{a_t(t)=r\,\dot{\omega}(t)}$$

3.1 Kreisbewegung als eindimensionale Bewegung

- Die Einheit der Winkelbeschleunigung ist 1 pro Zeit zum Quadrat.
- Eine gängige Einheit ist $1/s^2$.

• Starre rotierende Scheibe:

- Auf einer starren rotierenden Scheibe haben alle Punkte die gleiche Winkelgeschwindigkeit und die gleiche Winkelbeschleunigung.
- Bahngeschwindigkeit und Bahnbeschleunigung sind für Punkte mit unterschiedlichem Radius verschieden.

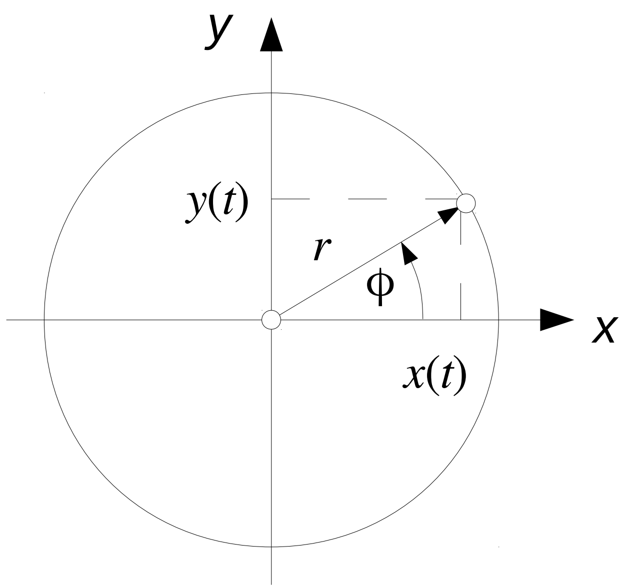
3.2 Kreisbewegung als räumliche Bewegung

- Bei der Betrachtung der Kreisbewegung als räumliche Bewegung kann neben der Bahnbeschleunigung auch die Normalbeschleunigung ermittelt werden.
- Für die Untersuchung der Bewegung wird ein kartesisches Koordinatensystem eingeführt.
- Das Koordinatensystem kann so gewählt werden, dass die Bewegung in der *xy*-Ebene stattfindet.

3.2 Kreisbewegung als räumliche Bewegung

- Ortsvektor:
  - Für die Ortskoordinaten eines Punktes auf der Kreisbahn gilt:

$$x(t) = r\cos(\phi(t))$$
$$y(t) = r\sin(\phi(t))$$



  - Die Ortskoordinaten sind die Komponenten des Ortsvektors:

$$\boldsymbol{r}(t) = r\cos(\phi(t))\,\boldsymbol{e}_x + r\sin(\phi(t))\,\boldsymbol{e}_y \text{ oder } [\boldsymbol{r}(t)] = \begin{bmatrix} r\cos(\phi(t)) \\ r\sin(\phi(t)) \end{bmatrix}$$

  - Für den Betrag gilt:

$$|\boldsymbol{r}(t)| = \sqrt{r^2\sin^2\phi(t) + r^2\cos^2\phi(t)} = r\sqrt{\sin^2\phi(t) + \cos^2\phi(t)} = r$$

3.2 Kreisbewegung als räumliche Bewegung

- Geschwindigkeitsvektor:
  - Die zeitliche Ableitung des Ortsvektors ergibt:

$$\boldsymbol{v}(t)=\dot{\boldsymbol{r}}(t)=-r\sin(\phi(t))\dot{\phi}(t)\boldsymbol{e}_x+r\cos(\phi(t))\dot{\phi}(t)\boldsymbol{e}_y$$
$$=\omega(t)\left(-y(t)\boldsymbol{e}_x+x(t)\boldsymbol{e}_y\right)$$

$$\left[\boldsymbol{v}(t)\right]=r\dot{\phi}(t)\begin{bmatrix}-\sin(\phi(t))\\ \cos(\phi(t))\end{bmatrix}=\omega(t)\begin{bmatrix}-y(t)\\ x(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}v_x(t)\\ v_y(t)\end{bmatrix}$$

  - Mit der Bahngeschwindigkeit $v(t) = \omega(t)r$ gilt auch:

$$\boldsymbol{v}(t)=v(t)\left(-\sin(\phi(t))\boldsymbol{e}_x+\cos(\phi(t))\boldsymbol{e}_y\right)$$

$$\left[\boldsymbol{v}(t)\right]=v(t)\begin{bmatrix}-\sin(\phi(t))\\ \cos(\phi(t))\end{bmatrix}$$

3.2 Kreisbewegung als räumliche Bewegung

- Für den Einheitstangentenvektor gilt:

$$\boldsymbol{e}_t(t)=\frac{\boldsymbol{v}(t)}{v(t)}=-\sin(\phi(t))\,\boldsymbol{e}_x+\cos(\phi(t))\,\boldsymbol{e}_y$$

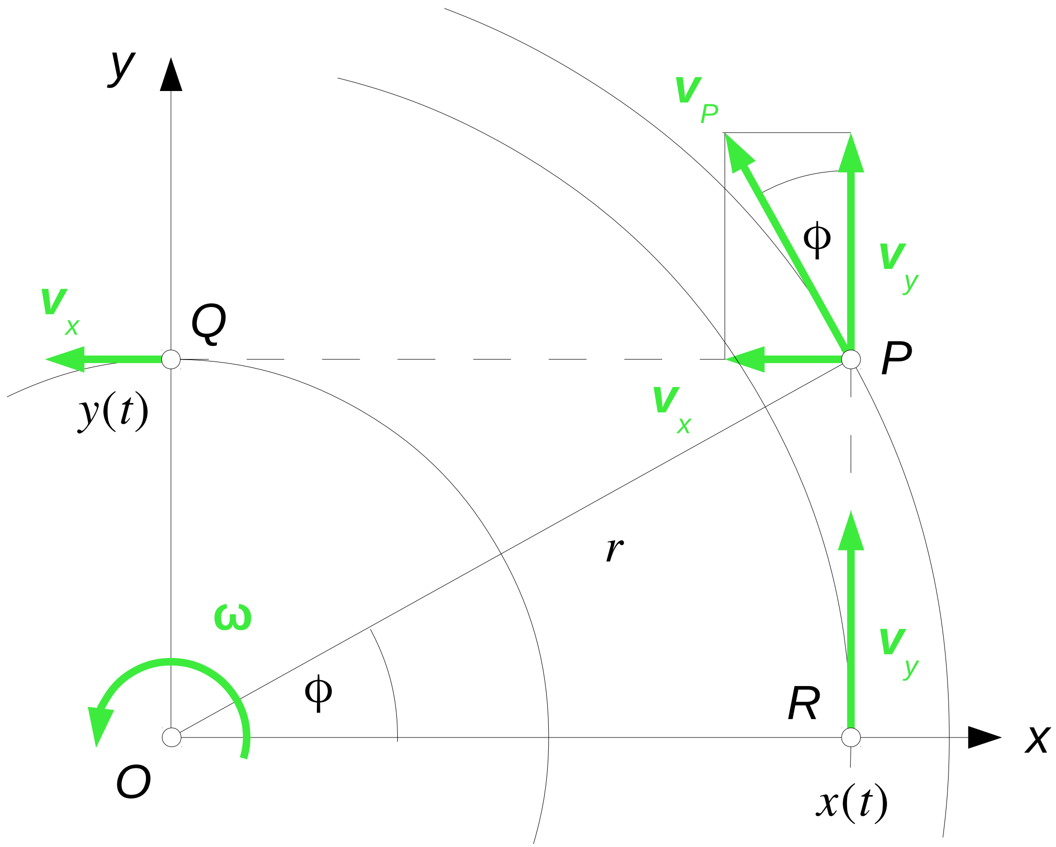
$$[\boldsymbol{e}_t(t)]=\begin{bmatrix}-\sin(\phi(t))\\ \cos(\phi(t))\end{bmatrix}$$

- Er steht senkrecht auf dem Ortsvektor:

$$\boldsymbol{r}(t)\cdot\boldsymbol{e}_t(t)=r\left[-\cos(\phi(t))\sin(\phi(t))+\sin(\phi(t))\cos(\phi(t))\right]=0$$

$$[\boldsymbol{r}(t)]^T[\boldsymbol{e}_t(t)]=r\begin{bmatrix}\cos(\phi(t)) & \sin(\phi(t))\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-\sin(\phi(t))\\ \cos(\phi(t))\end{bmatrix}=0$$

3.2 Kreisbewegung als räumliche Bewegung



$$v_P = \omega r$$

$$\begin{aligned} v_x &= -v_P \sin(\phi) \\ &= -\omega r \sin(\phi) \\ &= -\omega y \\ &= v_Q \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_y &= v_P \cos(\phi) \\ &= \omega r \cos(\phi) \\ &= \omega x \\ &= v_R \end{aligned}$$

3.2 Kreisbewegung als räumliche Bewegung

- Beispiel:
  - Der Punkt *P* bewegt sich auf einer Kreisbahn. Zum Zeitpunkt t hat er die Koordinaten $x = 4\ \mathrm{cm}$ und $y = 3\ \mathrm{cm}$ und die Winkelgeschwindigkeit $\omega = 5\ \mathrm{s}^{-1}$.
  - Die Komponenten des Geschwindigkeitsvektors sind:

$$v_x = -0{,}03\,\mathrm{m}\cdot 5\,\frac{1}{\mathrm{s}} = -0{,}15\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}, \quad v_y = 0{,}04\,\mathrm{m}\cdot 5\,\frac{1}{\mathrm{s}} = 0{,}20\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

  - Für die Bahngeschwindigkeit folgt:

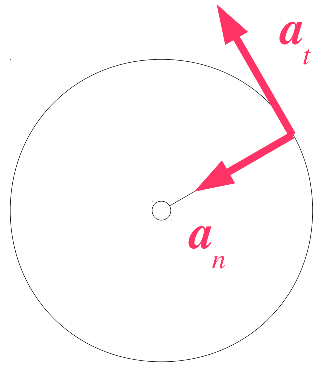
$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{0{,}15^2 + 0{,}20^2}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 0{,}25\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

  - Der Radius der Kreisbahn ist: $r = \sqrt{4^2 + 3^2}\,\mathrm{cm} = 5\,\mathrm{cm}$

3.2 Kreisbewegung als räumliche Bewegung

- Beschleunigungsvektor:
  - Die zeitliche Ableitung des Geschwindigkeitsvektors führt auf

$$\boldsymbol{a}(t)=\dot{\boldsymbol{v}}(t)=\frac{d}{dt}\left(v(t)\boldsymbol{e}_t(t)\right)=\dot{v}(t)\boldsymbol{e}_t(t)+v(t)\dot{\boldsymbol{e}}_t(t)$$
$$=\boldsymbol{a}_t(t)+v(t)\dot{\phi}(t)\left(-\cos\left(\phi(t)\right)\boldsymbol{e}_x-\sin\left(\phi(t)\right)\boldsymbol{e}_y\right)$$
$$=\boldsymbol{a}_t(t)-\dot{\phi}^2(t)r\left(\cos\left(\phi(t)\right)\boldsymbol{e}_x+\sin\left(\phi(t)\right)\boldsymbol{e}_y\right)$$
$$=\boldsymbol{a}_t(t)-\omega^2(t)\boldsymbol{r}(t)=\boldsymbol{a}_t(t)+\boldsymbol{a}_n(t)$$



3.2 Kreisbewegung als räumliche Bewegung

- Normalbeschleunigung: $\boldsymbol{a_n} = -\omega^2 \boldsymbol{r}$
  - Die Normalbeschleunigung $\boldsymbol{a}_n$ ist entgegen dem Ortsvektor $\boldsymbol{r}$ gerichtet. Sie wird daher als *Zentripetalbeschleunigung* bezeichnet.
  - Für den Betrag der Normalbeschleunigung gilt:

$$a_n = |\boldsymbol{a_n}| = \omega^2 r = \frac{v^2}{r^2} \cdot r = \frac{v^2}{r}$$

- Bahnbeschleunigung: $\boldsymbol{a_t} = \dot{v}\, \boldsymbol{e_t}$
  - Für den Betrag der Bahnbeschleunigung gilt:

$$|a_t| = |\boldsymbol{a_t}| = |\dot{v}| = r\,|\dot{\omega}| = r\,|\ddot{\phi}|$$

3.2 Kreisbewegung als räumliche Bewegung

- Für die Komponenten im kartesischen Koordinatensystem gilt:

$$[\boldsymbol{a}_n(t)] = -\omega^2(t)\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix}$$

$$[\boldsymbol{a}_t(t)] = \dot{\omega}(t)\, r \begin{bmatrix} -\sin(\phi(t)) \\ \cos(\phi(t)) \end{bmatrix} = \dot{\omega}(t)\begin{bmatrix} -y(t) \\ x(t) \end{bmatrix}$$

$$[\boldsymbol{a}(t)] = \begin{bmatrix} -\dot{\omega}(t)\, y(t) - \omega^2(t)\, x(t) \\ \dot{\omega}(t)\, x(t) - \omega^2(t)\, y(t) \end{bmatrix}$$

3.2 Kreisbewegung als räumliche Bewegung

- Beispiel:
  - Der Punkt *P* bewegt sich auf einer Kreisbahn. Zum Zeitpunkt t hat er die Koordinaten $x = 4\ \mathrm{cm}$ und $y = 3\ \mathrm{cm}$, die Winkelgeschwindigkeit $\omega = 5\ \mathrm{s}^{-1}$ und die Winkelbeschleunigung $\dot{\omega} = 10\ \mathrm{s}^{-2}$.
  - Die Beschleunigungen berechnen sich zu

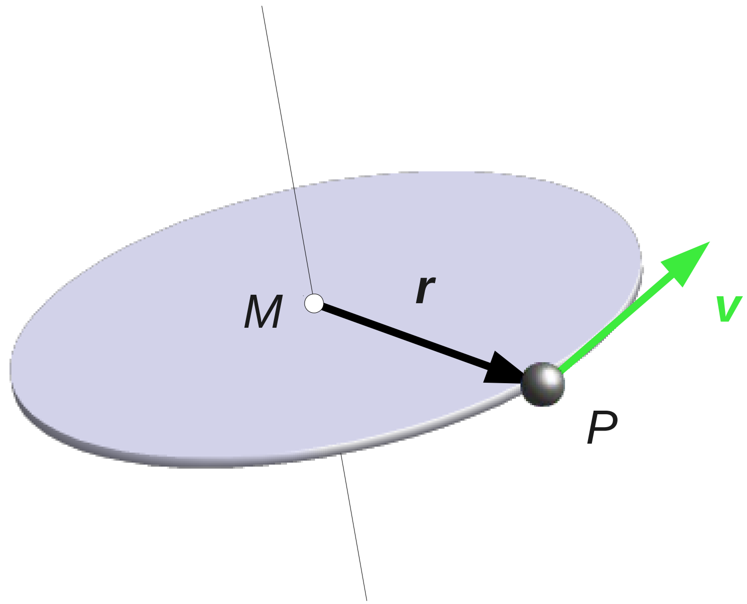
$$[\boldsymbol{a}_n] = -25\,\frac{1}{\mathrm{s}^2}\begin{bmatrix}0{,}04\\0{,}03\end{bmatrix}\mathrm{m} = -\begin{bmatrix}1{,}00\\0{,}75\end{bmatrix}\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

$$[\boldsymbol{a}_t] = 10\,\frac{1}{\mathrm{s}^2}\begin{bmatrix}-0{,}03\\0{,}04\end{bmatrix}\mathrm{m} = \begin{bmatrix}-0{,}3\\0{,}4\end{bmatrix}\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

$$[\boldsymbol{a}] = \begin{bmatrix}-1{,}30\\-0{,}35\end{bmatrix}\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

3.2 Kreisbewegung als räumliche Bewegung

- Drehachse:
  - Die Gerade, die senkrecht auf der Kreisebene steht und durch den Mittelpunkt des Kreises verläuft, wird als Drehachse bezeichnet.

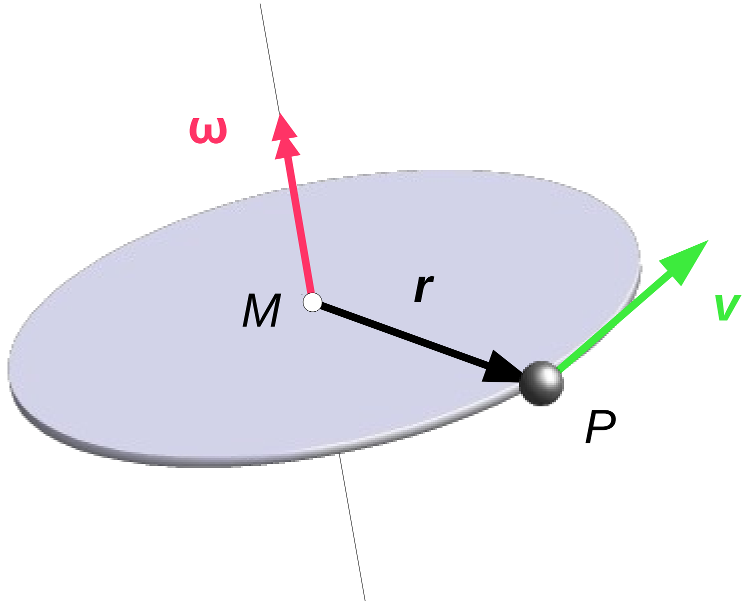


3.2 Kreisbewegung als räumliche Bewegung

- Vektor der Winkelgeschwindigkeit:
  - Der Betrag stimmt mit der Winkelgeschwindigkeit überein:

$$|\boldsymbol{\omega}| = |\omega|$$

  - Die Richtung stimmt mit der Drehachse überein.
  - Die Orientierung wird durch die Rechthandregel festgelegt.



  - Dann gilt:

$$\boxed{\boldsymbol{v} = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}}$$

3.2 Kreisbewegung als räumliche Bewegung

- Nachweis:
  - Der Vektor $\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}$ zeigt in Richtung von $\boldsymbol{v}$.
  - Für den Betrag gilt:

$$|\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}| = |\omega| r \sin(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{r}) = |\omega| r \sin(90°) = |\omega| r = |v|$$

- Für den Beschleunigungsvektor folgt:

$$\boldsymbol{a} = \dot{\boldsymbol{v}} = \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \boldsymbol{r} + \boldsymbol{\omega} \times \dot{\boldsymbol{r}} = \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \boldsymbol{r} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{v} = \boldsymbol{a}_t + \boldsymbol{a}_n$$

  - Bahnbeschleunigung: $\boldsymbol{a}_t = \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \boldsymbol{r}$
  - Zentripetalbeschleunigung: $\boldsymbol{a}_n = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{v} = \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r})$

3.3 Gleichförmige Kreisbewegung

- Definition:
  - Bei einer gleichförmigen Kreisbewegung ist die Winkelgeschwindigkeit ω konstant: $\omega(t)=\omega_0=const$.
- Überstrichener Winkel:
  - Der Punkt bewegt sich mit der konstanten Bahngeschwindigkeit $v_0=\omega_0 r$ auf der Kreisbahn.
  - Für die Ortskoordinate gilt:

$$s(t)-s_0=v_0(t-t_0) \rightarrow r(\phi(t)-\phi_0)=\omega_0 r(t-t_0)$$

  - Daraus folgt für den Winkel: $\boxed{\phi(t)=\phi_0+\omega_0(t-t_0)}$

3.3 Gleichförmige Kreisbewegung

- Umlaufzeit und Drehzahl:
  - Während einer Umdrehung wird ein Winkel von 2π überstrichen.
  - Die dafür benötigte *Umlaufzeit* T berechnet sich aus

$$2\pi = \phi(t+T) - \phi(t) = \omega_0 T \quad \rightarrow \quad \boxed{T = \frac{2\pi}{\omega_0}}$$

  - Die *Drehzahl* n gibt die Anzahl der Umdrehungen pro Zeit an:

$$\boxed{n = \frac{1}{T} = \frac{\omega_0}{2\pi}}$$

3.3 Gleichförmige Kreisbewegung

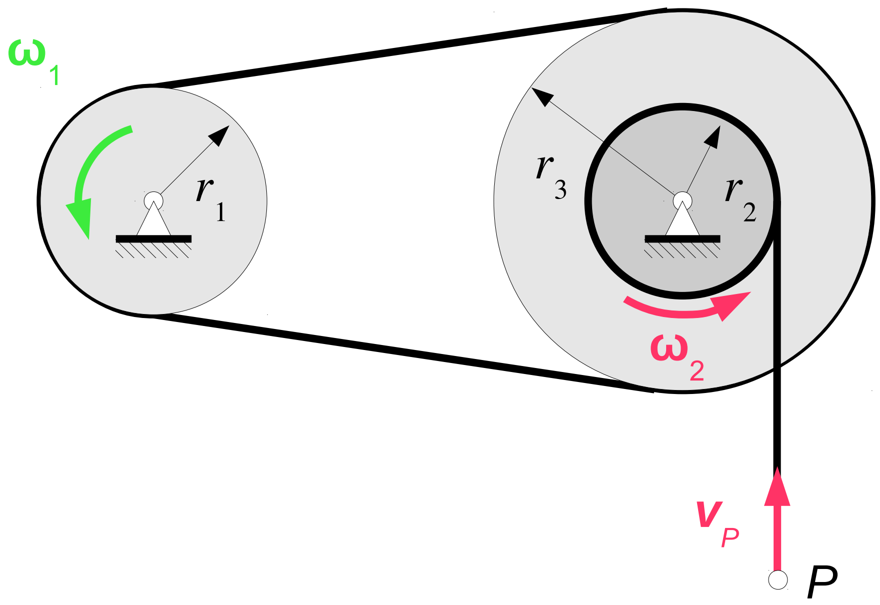
- Die Drehzahl wird in Umdrehungen pro Minute angegeben.
- Der Zusammenhang zwischen Drehzahl n in $1/\mathrm{min}$ und Winkelgeschwindigkeit in $1/\mathrm{s}$ ist gegeben durch

$$\omega_0 = \frac{2\pi n}{60\,\mathrm{s}/\mathrm{min}} = \frac{\pi n}{30\,\mathrm{s}/\mathrm{min}}$$

- Geschwindigkeit und Beschleunigung:
  - Bahngeschwindigkeit: $v = \dot{s} = \omega_0 r = const.$
  - Zentripetalbeschleunigung: $a_n = \omega_0^2 r = \dfrac{v^2}{r} = const.$
  - Bahnbeschleunigung: $a_t = \dot{\omega} r = 0$

3.3 Gleichförmige Kreisbewegung

- Beispiel:
  - Die beiden Rollen sind durch einen dehnstarren Riemen verbunden.
  - Punkt *P* hängt an einem dehnstarren Seil, das auf Rolle 2 aufgewickelt wird.
  - Gesucht:
    - Winkelgeschwindigkeit ω_2 von Rolle 2 und Geschwindigkeit v_P von Punkt *P*



  - Gegeben:
    - Winkelgeschwindigkeit ω_1 von Rolle 1

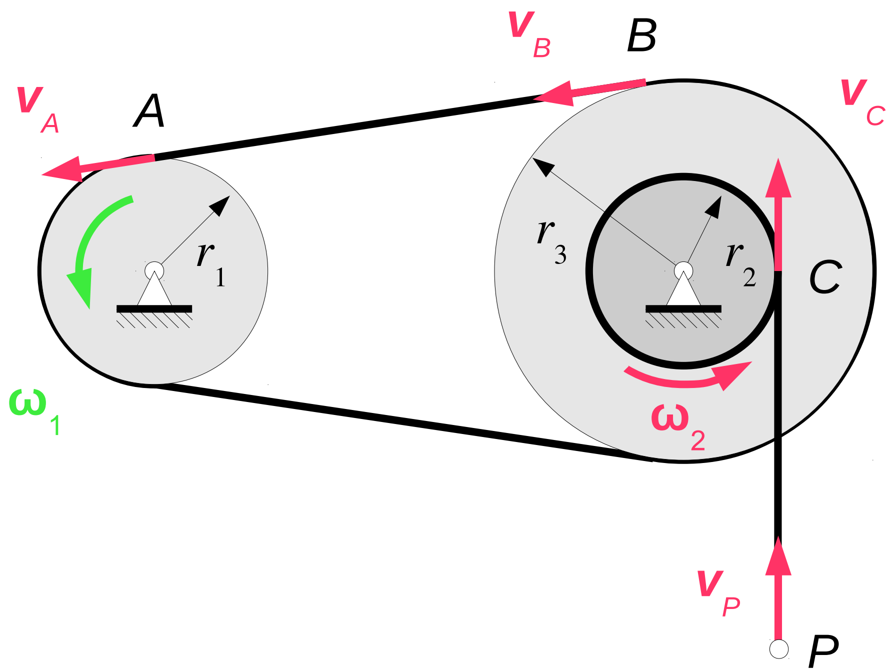
3.3 Gleichförmige Kreisbewegung

- Punkt *A* bewegt sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω_1 auf einer Kreisbahn mit Radius r_1. Daher gilt:

$$v_A = \omega_1 r_1$$

- Die Punkte *A* und *B* sind durch einen dehnstarren Riemen verbunden. Daher gilt:

$$v_B = v_A$$



3.3 Gleichförmige Kreisbewegung

- Punkt *B* bewegt sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω_2 auf einer Kreisbahn mit Radius r_3. Daher gilt:

$$v_A = v_B = \omega_2 r_3 \rightarrow \omega_1 r_1 = \omega_2 r_3 \rightarrow \omega_2 = \omega_1 \frac{r_1}{r_3}$$

- Punkt *C* bewegt sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω_2 auf einer Kreisbahn mit Radius r_2. Daher gilt:

$$v_C = \omega_2 r_2 = \omega_1 \frac{r_1 r_2}{r_3}$$

- Punkt *P* ist über ein dehnstarres Seil mit Punkt *C* verbunden. Daher gilt:

$$v_P = v_C = \omega_1 \frac{r_1 r_2}{r_3}$$

3.4 Gleichmäßig beschleunigte Kreisbewegung

- Definition:
  - Bei einer gleichmäßig beschleunigten Kreisbewegung ist die Winkelbeschleunigung konstant: $\dot{\omega}(t)=\dot{\omega}_0=const$.
- Winkelgeschwindigkeit und Winkel:
  - Der Punkt führt auf der Kreisbahn eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung mit der konstanten Bahnbeschleunigung

$$a_t=\dot{\omega}_0 r$$

aus.
  - Für die Bahngeschwindigkeit gilt:

$$v(t)-v_0=a_t(t-t_0) \rightarrow r(\omega(t)-\omega_0)=\dot{\omega}_0 r(t-t_0)$$

3.4 Gleichmäßig beschleunigte Kreisbewegung

- Daraus folgt für die Winkelgeschwindigkeit:

$$\boxed{\omega(t) = \omega_0 + \dot{\omega}_0 (t - t_0)}$$

- Für die Ortskoordinate gilt:

$$s(t) - s_0 = v_0 (t - t_0) + \frac{1}{2} a_t (t - t_0)^2$$

$$\rightarrow \quad r(\phi(t) - \phi_0) = \omega_0 r (t - t_0) + \frac{1}{2} \dot{\omega}_0 r (t - t_0)^2$$

- Daraus folgt für den Winkel:

$$\boxed{\phi(t) = \phi_0 + \omega_0 (t - t_0) + \frac{1}{2} \dot{\omega}_0 (t - t_0)^2}$$

3.4 Gleichmäßig beschleunigte Kreisbewegung

- Beispiel:
  - Ein Schwungrad (Durchmesser $d = 60\ \mathrm{cm}$) wird aus der Ruhelage gleichmäßig beschleunigt und hat nach $t_2 = 20\ \mathrm{s}$ eine Drehzahl von $n = 1000\ \mathrm{min}^{-1}$ erreicht.
  - Gesucht:
    - Winkelbeschleunigung
    - Anzahl der Umdrehungen in der Zeit t_2
    - Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Punktes auf dem Umfang zur Zeit $t_1 = 1\ \mathrm{s}$ nach dem Anlaufen

3.4 Gleichmäßig beschleunigte Kreisbewegung

- Anfangsbedingungen:
  - Die Zeit wird ab Beginn des Anlaufens gemessen: $t_0 = 0$
  - Der Winkel wird ab der Ruhelage gemessen: $\phi_0 = 0$
  - Die Bewegung startet aus der Ruhelage: $\omega_0 = 0$
- Winkelbeschleunigung:
  - Mit den gegebenen Anfangsbedingungen gilt:

$$\omega_2 = \omega(t_2) = \dot{\omega}_0 t_2 \rightarrow \dot{\omega}_0 = \frac{\omega_2}{t_2}$$

  - Für die Winkelgeschwindigkeit gilt:

$$\omega_2 = \frac{n\pi}{30\,\mathrm{s/min}} = 1000\frac{\pi}{30}\frac{1}{\mathrm{s}} = 104{,}7\frac{1}{\mathrm{s}}$$

3.4 Gleichmäßig beschleunigte Kreisbewegung

- Damit berechnet sich die Winkelbeschleunigung zu

$$\dot{\omega}_0 = \frac{104{,}7\,\mathrm{s}^{-1}}{20\,\mathrm{s}} = \underline{5{,}235\,\frac{1}{\mathrm{s}^2}}$$

– Anzahl der Umdrehungen:

- Für den überstrichenen Winkel gilt: $\phi_2 = \phi(t_2) = \frac{1}{2}\dot{\omega}_0 t_2^2 = \frac{1}{2}\omega_2 t_2$

- Zahlenwert: $\phi_2 = \frac{1}{2}\cdot 104{,}7\,\frac{1}{\mathrm{s}}\cdot 20\,\mathrm{s} = \underline{1047}$

- Bei einer Umdrehung wird ein Winkel von 2π überstrichen. Damit gilt für die Anzahl der Umdrehungen:

$$N_2 = \frac{\phi_2}{2\pi} = \frac{1047}{2\pi} = \underline{166{,}6}$$

3.4 Gleichmäßig beschleunigte Kreisbewegung

- Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Punktes auf dem Umfang:
  - Die Winkelgeschwindigkeit zum Zeitpunkt $t_1 = 1$ s beträgt

$$\omega_1 = \omega(t_1) = \dot{\omega}_0 t_1 = 5{,}235\,\frac{1}{\mathrm{s}^2}\cdot 1\,\mathrm{s} = \underline{5{,}235\,\frac{1}{\mathrm{s}}}$$

  - Ein Punkt auf dem Umfang hat den Radius

$$r = d/2 = 30\,\mathrm{cm} = 0{,}3\,\mathrm{m}$$

  - Seine Geschwindigkeit beträgt

$$v_1 = \omega_1 r = 5{,}235\,\frac{1}{\mathrm{s}}\cdot 0{,}3\,\mathrm{m} = \underline{1{,}571\,\mathrm{m/s}}$$

3.4 Gleichmäßig beschleunigte Kreisbewegung

- Seine Normalbeschleunigung (Zentripetalbeschleunigung) beträgt

$$a_{n1} = \omega_1^2 r = 5{,}235^2 \frac{1}{\mathrm{s}^2} \cdot 0{,}3\,\mathrm{m} = 8{,}221\,\mathrm{m/s}^2 = \underline{0{,}8380\,\mathrm{g}}$$

- Seine Bahnbeschleunigung beträgt

$$a_{t1} = \dot{\omega}_0 r = 5{,}235 \frac{1}{\mathrm{s}^2} \cdot 0{,}3\,\mathrm{m} = 1{,}571\,\mathrm{m/s}^2 = \underline{0{,}1601\,\mathrm{g}}$$

- Der Betrag der Gesamtbeschleunigung ist

$$a_1 = \sqrt{a_{n1}^2 + a_{t1}^2} = 8{,}370\,\mathrm{m/s}^2 = \underline{0{,}8532\,\mathrm{g}}$$