Drehprüfung

Biophysikalische Grundlagen

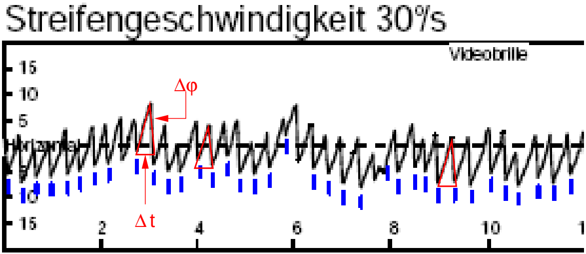
Stefan Langenberg

universitätbonn

Optokinetik

Ermittlung der GLP (Geschwindigkeit der langsamen Phase)

Projektion eines Streifenmusters auf einen Schirm, videonystagmographische Registrierung der Augenbewegung:

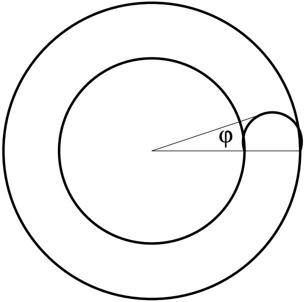


Bestimmung der GLP

$$\mathrm{GLP} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \tag{1}$$

Drehpendelexperiment

Die Bogengänge als gedämpftes Torsionspendel

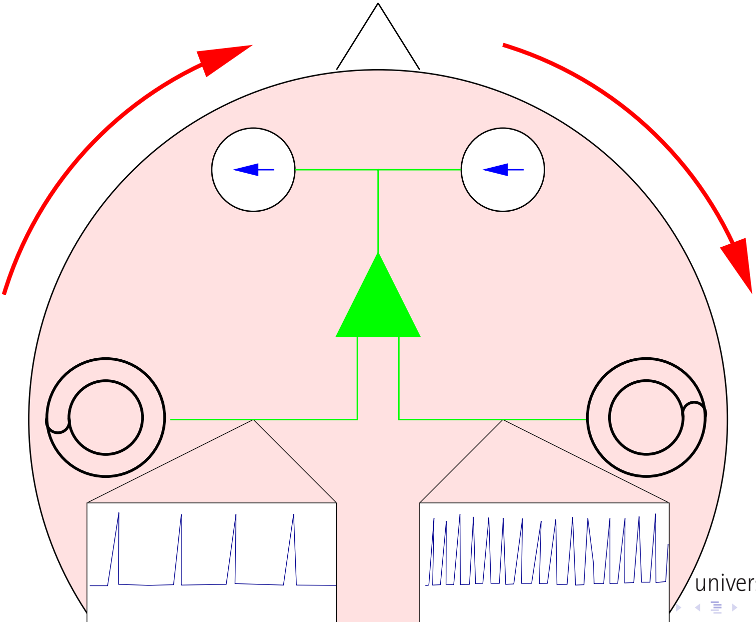


Schwingungsgleichung

$$\ddot{\varphi}(t) + 2\delta\dot{\varphi}(t) + \omega_0^2\varphi(t) = \hat{\alpha}\cos\omega t \tag{2}$$

Drehpendelexperiment

Verarbeitung des Cupulaauslenkungssignals



Lösung der Schwingungsgleichung

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cos(\omega t - \zeta) \tag{3}$$

Für die anatomische Geometrie der Bogengänge ergeben sich:
Eigenkreisfrequenz des Torsionspendel $\omega_0 = 7\ \mathrm{s}^{-1}$.
Dämpfungsgeschwindigkeitskonstante $\delta = 125\ \mathrm{s}^{-1}$.
In Abhängigkeit von der Periodendauer der Schwingung T ist die Winkelgeschwindigkeit der erzwungenen Schwingung

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \tag{4}$$

Drehpendelexperiment

Phasenverschiebung der erzwungenen Schwingung

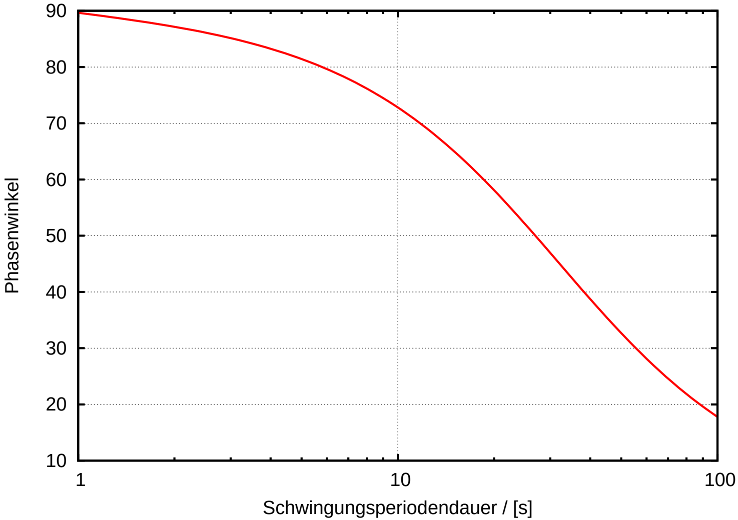
Für die Phasenverschiebung zwischen Anregung und Cupulaauslenkung gilt

$$\tan\zeta = \frac{2\omega\delta}{\omega_0^2 - \omega^2} \tag{5}$$

Für Anregungsperiodenauern von 1 – 10 s liegt die Phasenverschiebung in der Größenordnung vom 90^o.
Die Cupulaauslenkung und somit auch die GLP verläuft bei der harmonischen Pendelbewegung mit dem Winkelgeschwindigkeitsverlauf des Drehstuhls zeitsynchron.

Drehpendelexperiment

Phasenverschiebung der erzwungenen Schwingung



Drehpendelexperiment

Abschwächung der Übertragung der Drehpendelbewegung auf die Cupula

Die maximale Winkelbeschleunigung ist $\hat{\alpha} = \omega\hat{\dot{\varphi}}$, wobei $\hat{\dot{\varphi}}$ die maximale Winkelgeschwindigkeit des Drehpendels ist.
Für den Verstärkungsfaktor *(gain)* des physikalischen Drehpendels gilt

$$\frac{\hat{\varphi}}{\hat{\varphi_{\mathrm{ST}}}} = \frac{\omega\sqrt{1 + (2\delta)^2}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\delta\omega)^2}}. \tag{6}$$

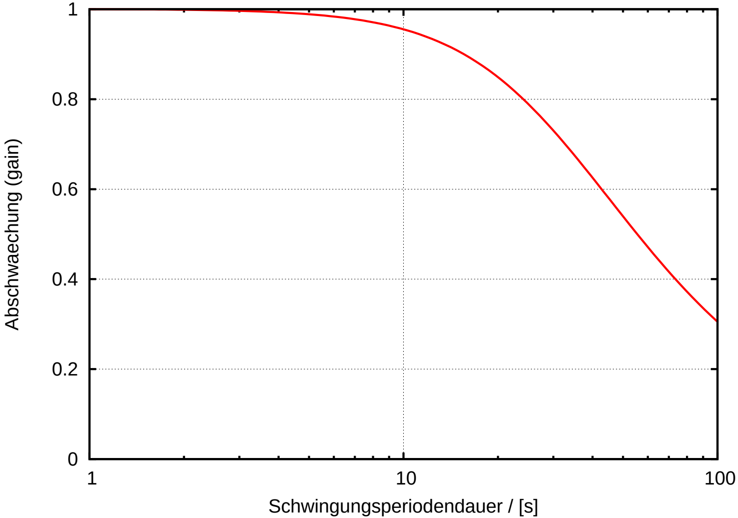
Für die maximal mögliche Auslenkung der Cupula gilt

$$\hat{\varphi_{\mathrm{ST}}} = \frac{\hat{\dot{\varphi}}T}{2\pi} \tag{7}$$

Bei gleicher Scheitelwinkelgeschwindigkeit des Drehstuhls bewirken höhere Periodendauern einen geringeren Verstärkungsfaktor.

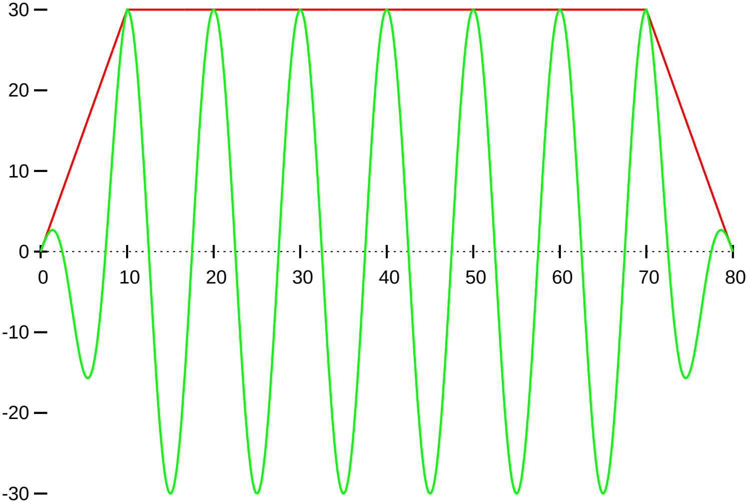
Drehpendelexperiment

Abschwächung der Übertragung der Drehpendelbewegung auf die Cupula



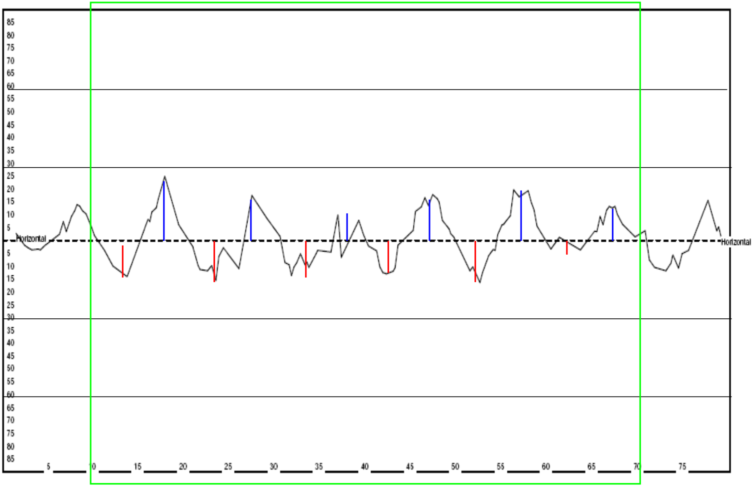
Drehpendelexperiment

Winkelgeschwindigkeitsverlauf des Drehstuhls



Drehpendelexperiment

Ermittlung der maximalen GLP pro Halbwelle



Das Richtungsüberwiegen *DP* wird nach folgender Formel ermittelt

$$\mathrm{DP} = \frac{\mathrm{GLP}_{\mathrm{max}}(\mathrm{R}) - \mathrm{GLP}_{\mathrm{max}}(\mathrm{L})}{\mathrm{GLP}_{\mathrm{max}}(\mathrm{R}) + \mathrm{GLP}_{\mathrm{max}}(\mathrm{L})} \tag{8}$$

Beim Gesunden wird ein Richtungsüberwiegen von bis zu 15% gefunden.

Drehpendelexperiment

Ermittlung des Richtungsüberwiegens

	GLPmax / [°/s]					
Anregung	30 °/s		60 °/s		90 °/s	
Welle	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts	Links
1	15	25	45	40	33	70
2	15	15	22	47	39	57
3	15	10	25	30	15	33
4	15	20	26	15	30	20
5	15	20	33	10	30	25
6	5	15	20	35	40	22
Mittelwert	$13,3$	$17,5$	$28,5$	$29,5$	$31,2$	$37,8$
DP	-14%		-2%		-10%	

universitätbonn

Anregung mit konstanter Winkelbeschleunigung

Lösung der Bewegungsgleichung

Für die Cupulaauslenkung gilt

$$\ddot{\varphi}(t) + 2\delta\dot{\varphi}(t) + \omega_0^2\varphi(t) = \alpha, \tag{9}$$

wobei α die Winkelbeschleunigung ist.
Die allgemeine Lösung dieser inhomogenen Differentialgleichung ist

$$\varphi(t) = C_1 e^{-\delta t + \omega' t} + C_2 e^{-\delta t - \omega' t} + \frac{\alpha}{\omega_0^2}, \tag{10}$$

wobei

$$\omega' = \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \approx \delta \tag{11}$$

und die Integrationskonstanten C_1 und C_2 von weiteren Randbedingungen abhängen

Anregung mit konstanter Winkelbeschleunigung

Konstante Winkelbeschleunigung aus der Ruhe

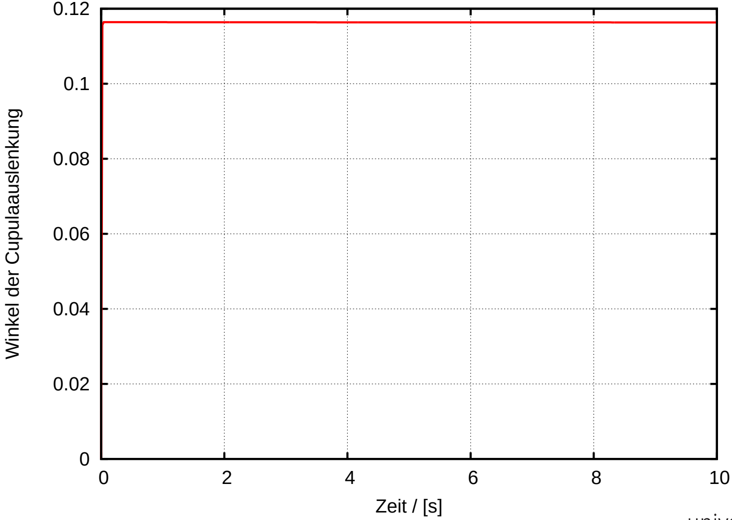
Mit den Randbedingungen $\varphi(0) = 0$ und $\dot{\varphi}(0) = 0\ \mathrm{s}^{-1}$ ergibt sich

$$\varphi(t) = \frac{\alpha}{\omega_0^2}\left(1 - \frac{\omega' - \delta}{2\omega'}e^{-\delta t + \omega' t} - \frac{\omega' + \delta}{2\omega'}e^{-\delta t - \omega' t}\right) \approx \frac{\alpha}{\omega_0^2}\left(1 - e^{-2\delta t}\right) \tag{12}$$

Bei konstanter Winkelbeschleunigung ist die Cupulaauslenkung nach einer extrem kurzen Einstellzeit der Winkelbeschleunigung proportional.

Anregung mit konstanter Winkelbeschleunigung

Zeitlicher Verlauf der Winkelauslenkung der Cupula bei Einwirkung einer konstanten Winkelbeschleunigung



Anregung mit konstanter Winkelbeschleunigung

Zeitlicher Verlauf der Winkelauslenkung der Cupula nach Einwirkung einer konstanten Winkelbeschleunigung

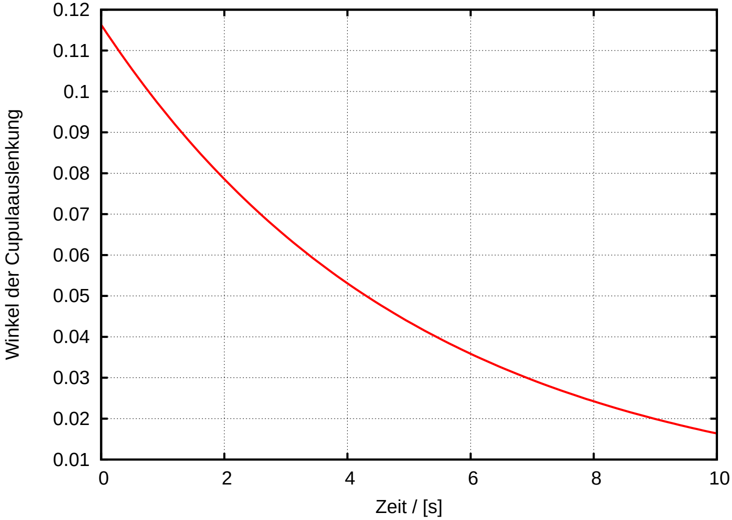
In diesem Fall ist $\alpha = 0\ \mathrm{s}^{-2}$. Für die Bewegungsgleichung der Cupula gilt analog zu einem stark gedämpften Pendel

$$\varphi(t) = \frac{\alpha}{\omega_0^2} e^{-(\delta-\omega')t}. \tag{13}$$

Nach Einwirkung einer Winkelbeschleunigung geht die Cupulaauslenkung exponentiell mit einer Zeitkonstante von 5 s gegen 0.

Anregung mit konstanter Winkelbeschleunigung

Zeitlicher Verlauf der Winkelauslenkung der Cupula



universitätbonn

Zusammenfassung

- Eine Beschleunigung führt zu einem gleichgerichteten Nystagmus
- Eine Rotationsbewegung ohne Winkelbeschleunigung ist kein Gleichgewichtsreiz