Innotesting 2016, Workshop Vibration

Beitrag zu den Koppelfrequenzen aus Schwingarmaturaufhängung und Prüflingseigenfrequenz

Dr.-Ing. Werner Kuitzsch, Spectral Dynamics GmbH

INHALT

Schwinger und Prüfobjekt

Schwinger und Prüfobjekt als gekoppeltes System

Gekoppeltes System

Freie, ungedämpfte Schwingung

- Rechengang
- Eigenwerte, Eigenform
- Abhängigkeit von Abstimmungsverhältnis α und Massenverhältnis μ

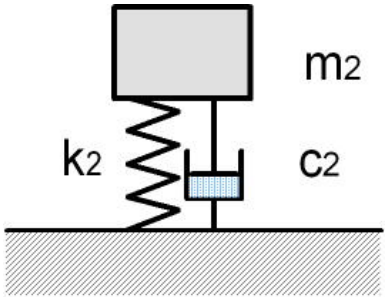
Erzwungene, gedämpfte Schwingung

- Sonderfall α=1, μ=1
- Einzelfall α=30, μ=2.5
- Vergleich α=30, μ=variabel

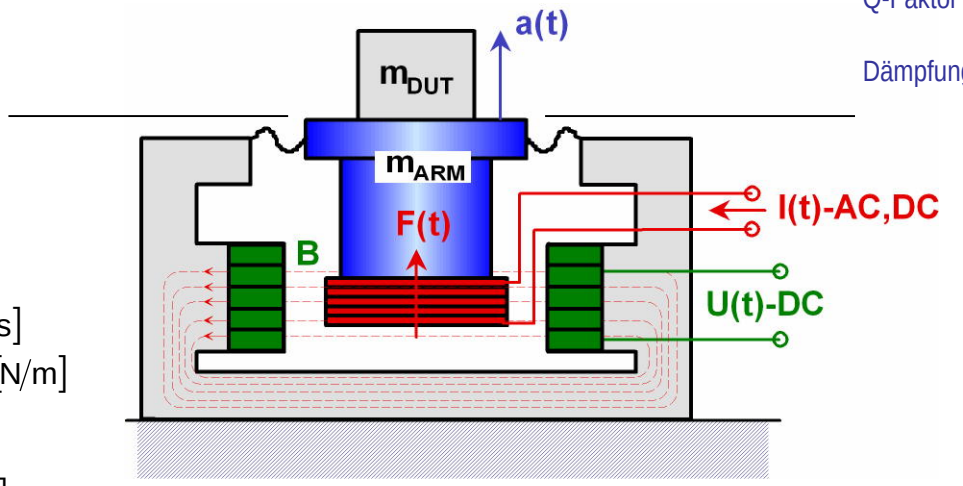
Schwingungsregelung

Schwingerreger mit Prüfobjekt

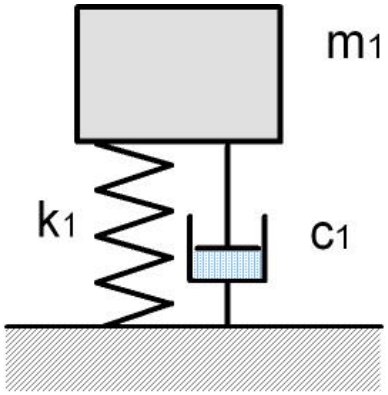
Prüfobjekt
– Lineares Verhalten
– 1. Eigenfrequenz



Masse	m_2 [kg]
Eigenfrequenz	f_2 [Hz]
Eigenkreisfrequenz	$\omega_2 = 2\pi f_2$ [1/s]
Federrate	$k_2 = \omega_2^2 \cdot m_2$ [N/m]
Dämpfungsmaß	D_2 [1]
Q-Faktor	$Q_2 = \frac{1}{2 \cdot D_2}$ [1]
Dämpfungsrate	$c_2 = 2 \cdot D_2 \cdot m_2 \cdot \omega_2$ [N/(m/s)]

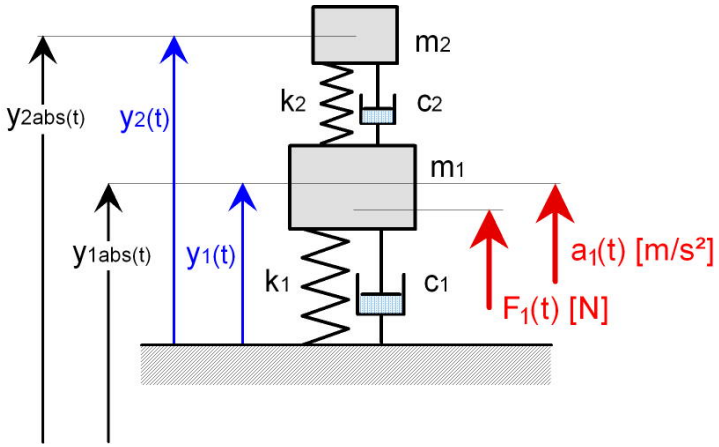


Masse	m_1 [kg]
Eigenfrequenz	f_1 [Hz]
Eigenkreisfrequenz	$\omega_1 = 2\pi f_1$ [1/s]
Federrate	$k_1 = \omega_1^2 \cdot m_1$ [N/m]
Dämpfungsmaß	D_1 [1]
Q-Faktor	$Q_1 = \frac{1}{2 \cdot D_1}$ [1]
Dämpfungsrate	$c_1 = 2 \cdot D_1 \cdot m_1 \cdot \omega_1$ [N/(m/s)]



Schwingarmatur
– Masse
– Elastische Aufhängung
– Lineares Verhalten
– 1. Eigenfrequenz

Schwingerreger mit Prüfobjekt als gekoppeltes System



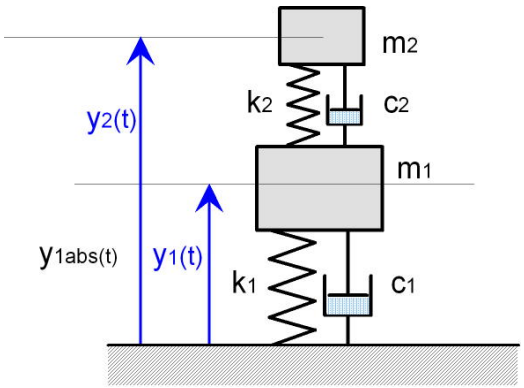
Massenverhältnis $\mu = \frac{m_2}{m_1}$

Abstimmungsverhältnis $\alpha = \frac{\omega_2}{\omega_1}$

Bewegungsdifferentialgleichung des gekoppelten Systems

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & +c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & +k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -m_1 \cdot a_1(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Gekoppeltes System: freie, ungedämpfte Schwingung, Rechengang



Parameter wie die 1-Freiheitgrad-Systeme, dazu kommt

Massenverhältnis $\mu = \frac{m_2}{m_1}$

Abstimmungsverhältnis $\alpha = \frac{\omega_2}{\omega_1}$

Bewegungsdifferentialgleichung des gekoppelten Systems

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & +k_2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad (2)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 + \mu\cdot\omega_2^2 & -\mu\cdot\omega_2^2 \\ -\omega_2^2 & +\omega_2^2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Schwingungsgemäßer Ansatz für den unbekannten Eigenwert λ

$$y_1 = Y_1 \cdot e^{\lambda t} \quad \rightarrow \quad \ddot{y}_1 = \lambda^2 Y_1 \cdot e^{\lambda t} \qquad (3.1)$$

$$y_2 = Y_2 \cdot e^{\lambda t} \quad \rightarrow \quad \ddot{y}_2 = \lambda^2 Y_2 \cdot e^{\lambda t} \qquad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda^2 + \left(\omega_1^2 + \mu\cdot\omega_2^2\right) & -\mu\cdot\omega_2^2 \\ -\omega_2^2 & \lambda^2 + \omega_2^2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad (4)$$

Gekoppeltes System: freie, ungedämpfte Schwingung, Eigenwerte, Eigenform

Eigenwertproblem

$$\begin{bmatrix} \lambda^2 + \left(\omega_1^2 + \mu\cdot\omega_2^2\right) & -\mu\cdot\omega_2^2 \\ -\omega_2^2 & \lambda^2 + \omega_2^2 \end{bmatrix} = 0 \qquad (5)$$

führt auf quadratischer Gleichung in λ^2, die noch per Hand lösbar ist.

Eigenwerte

$$\lambda_{I,II} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(\omega_1^2 + \mu\cdot\omega_2^2\right) \mp \sqrt{\left(\omega_1^2 + \mu\cdot\omega_2^2\right)^2 - 4\omega_1^2\omega_2^2}\right]} \qquad (6)$$

Bei (schwach) gedämpften Systemen sind die Eigenwerte komplex $\lambda_{I,II} = \sigma_{I,II} + i\omega_{I,II}$ (7.1)

Bei ungedämpften Systemen sind die Eigenwerte gleich den Eigenfrequenzen $\lambda_{I,II} = i\omega_{I,II}$ (7.2)

Bezogene Eigenwerte

$$\frac{\omega_{I,II}}{\omega_1} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(1+\alpha^2(1+\mu)\right) \mp \sqrt{\left(1+\alpha^2(1+\mu)\right)^2 - 4\alpha^2}\right]} \qquad (8)$$

ausgewertet im Diagramm

Eigenformen, in den Eigenschwingungen stehen die Amplituden Y_2, Y_1 in einem festen Verhältnis zueinander, abhängig vom Eigenwert; ergibt sich aus (4) bei den nun bekannten Eigenwerten ω_I bzw. ω_{II}.

aus MatCad™

Eigenwertproblem

$$\text{EigenMat} := \begin{bmatrix} \omega1^2 + \left(\mu\cdot\omega2^2\right) & -\left(\mu\cdot\omega2^2\right) \\ -\omega2^2 & \omega2^2 \end{bmatrix}$$

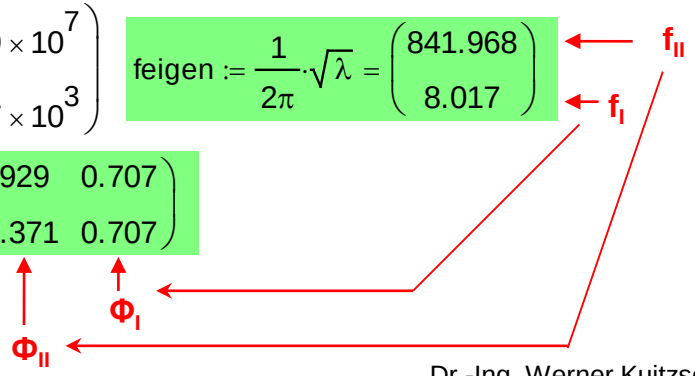
Zahlenbeispiel:
m_1=2kg, m_2=5kg→μ=2,5
f_1=15Hz, f_2=450Hz→α=30

Eigenwerte

$$\lambda := \text{eigenwerte}(\text{EigenMat}) = \begin{pmatrix} 2.799\times10^7 \\ 2.537\times10^3 \end{pmatrix} \qquad \text{feigen} := \frac{1}{2\pi}\cdot\sqrt{\lambda} = \begin{pmatrix} 841.968 \\ 8.017 \end{pmatrix}$$

Eigenvektoren

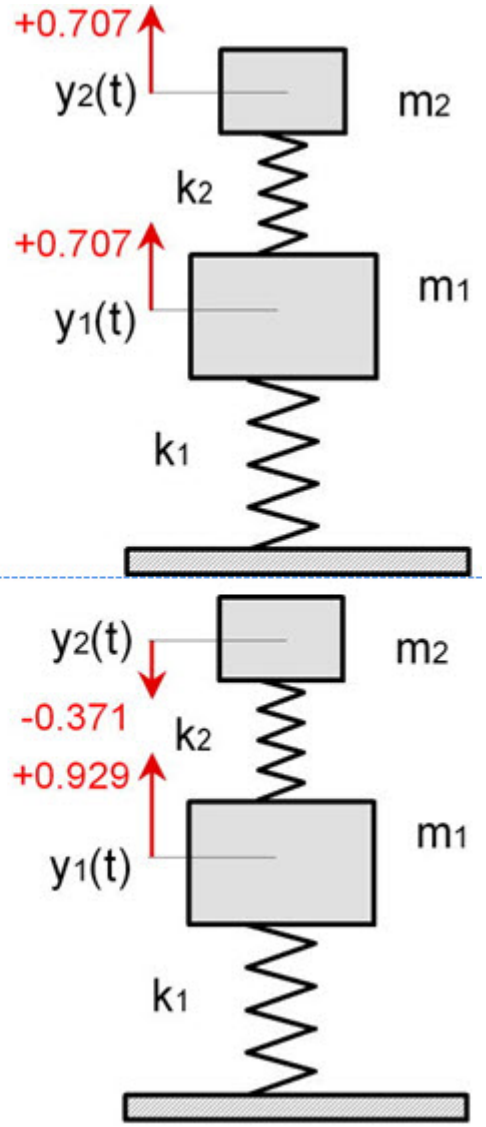
$$\Phi := \text{eigenvektoren}(\text{EigenMat}) = \begin{pmatrix} 0.929 & 0.707 \\ -0.371 & 0.707 \end{pmatrix}$$



Koppelfrequenzen

Gekoppeltes System: freie, ungedämpfte Schwingung, Eigenformen für α=30, μ=2.5

1. Eigenwert	$\lambda_I = -\sigma_I + i\omega_I$
1. Eigenfrequenz	$f_I = \omega_I/(2\pi) = 8.02\text{Hz}$
1. Eigenform	$\Phi_I = \begin{Bmatrix} +0.707 \\ +0.707 \end{Bmatrix}$
2. Eigenwert	$\lambda_{II} = -\sigma_{II} + i\omega_{II}$
2. Eigenfrequenz	$f_{II} = \omega_{II}/(2\pi) = 841{,}97\text{Hz}$
2. Eigenform	$\Phi_{II} = \begin{Bmatrix} +0.929 \\ -0.371 \end{Bmatrix}$

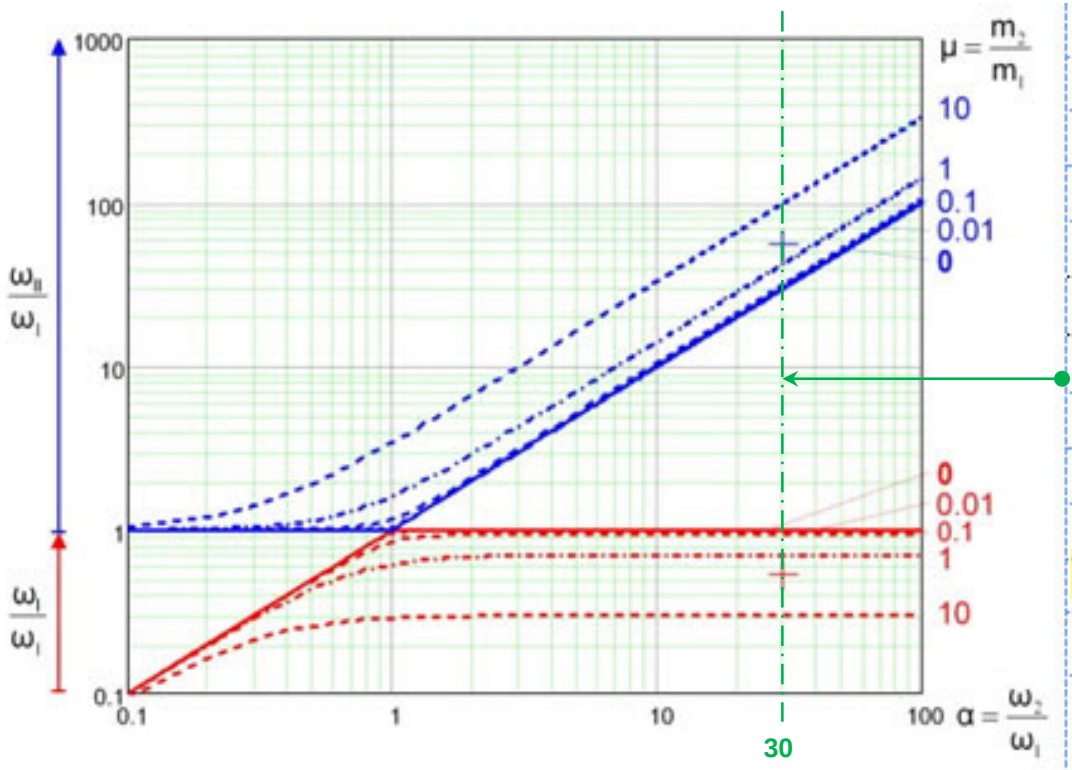


Zahlenbeispiel:
m_1=2kg, m_2=5kg→μ=2,5
f_1=15Hz, f_2=450Hz→α=30

Gekoppeltes System: freie, ungedämpfte Schwingung, Eigenwerte in Abhängigkeit von α, μ

Bezogene Eigenwerte

$$\frac{\omega_{I,II}}{\omega_1} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(1+\alpha^2(1+\mu)\right) \mp \sqrt{\left(1+\alpha^2(1+\mu)\right)^2 - 4\alpha^2}\right]}$$

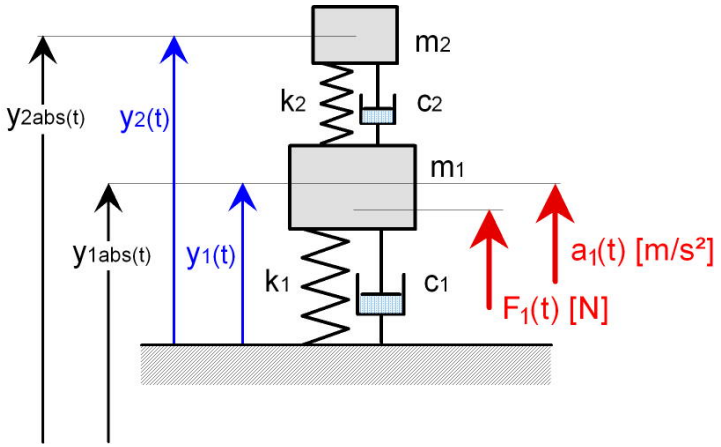


Prüflingsmasse	m_2=5kg
Prüflingseigenfrequenz	f_2=450Hz
Armatureigenfrequenz	f_1=15Hz
Abstimmungsverhältnis	$\alpha=f_2/f_1$=30
Armaturmasse m_1	

m_1 [kg]	$\mu=m_2/m_1$	f_I [Hz]	f_{II} [Hz]
∞	0	15.0	450
500	0.01	14.9	452
50	0.1	14.3	472
5	1	10.6	636
2	2.5	8.0	841
0.5	10	4.5	1492

μ = 0.0001 ... 0.001 entspricht Test auf großem Shaker
μ = 0.1 entspricht mittlerem Shaker
Typischer Bereich der Aerospace-Tests:
μ = 1 entspricht kleinem Shaker im Vergleich zur Prüflingsmasse
μ = 10 entspricht großer Prüflingsmasse im Vergleich zum Shaker

Gekoppeltes System: erzwungene, gedämpfte Schwingung, Rechengang



Harmonische Anregung

$$a_1(t) = a_1 \cdot \sin(\Omega_1 \cdot t) \equiv a_1 \cdot e^{i\Omega t} \left[m/s^2\right]$$

Bewegungsdifferentialgleichung des gekoppelten Systems

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & +c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & +k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -m_1 \cdot a_1 \cdot e^{i\Omega t} \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{9}$$

Schwingungsgemäßer Ansatz für die unbekannten, komplexen Amplituden $\underline{Y}_1$, $\underline{Y}_2$

$$y_1 = \underline{Y}_1 \cdot e^{i\Omega t} \rightarrow \dot{y}_1 = i\Omega \cdot \underline{Y}_1 \cdot e^{i\Omega t} \rightarrow \ddot{y}_1 = -\Omega^2 \cdot \underline{Y}_1 \cdot e^{i\Omega t} \tag{10.1}$$

$$y_2 = \underline{Y}_2 \cdot e^{i\Omega t} \rightarrow \dot{y}_2 = i\Omega \cdot \underline{Y}_2 \cdot e^{i\Omega t} \rightarrow \ddot{y}_2 = -\Omega^2 \cdot \underline{Y}_2 \cdot e^{i\Omega t} \tag{10.2}$$

Bestimmungsgleichung für die unbekannten, komplexen Amplituden $\underline{Y}_1$, $\underline{Y}_2$

$$\begin{bmatrix} \left(-\Omega^2 m_1 + k_1 + k_2\right) + i\Omega\left(c_1 + c_2\right) & -k_2 - i\Omega c_2 \\ -k_2 - i\Omega c_2 & \left(-\Omega^2 m_2 + k_2\right) + i\Omega c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{Y}_1 \\ \underline{Y}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -m_1 \cdot a_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{11}$$

Gekoppeltes System: erzwungene, gedämpfte Schwingung, komplexe Amplitudenantwort

Bestimmungsgleichung für die unbekannten, komplexen Weg!-Amplituden $\underline{Y}_1$, $\underline{Y}_2$ [m]

$$\begin{bmatrix} \left(-\Omega^2 m_1 + k_1 + k_2\right) + i\Omega\left(c_1 + c_2\right) & -k_2 - i\Omega c_2 \\ -k_2 - i\Omega c_2 & \left(-\Omega^2 m_2 + k_2\right) + i\Omega c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{Y}_1 \\ \underline{Y}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -m_1 \cdot a_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{12.1}$$

Cramersche Regel für die unbekannten, komplexen Weg!-Amplitude $\underline{Y}_1$ [m]

$$\underline{Y}_1 = \frac{\begin{vmatrix} -m_1 \cdot a_1 & -k_2 - i\Omega c_2 \\ 0 & \left(-\Omega^2 m_2 + k_2\right) + i\Omega c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \left(-\Omega^2 m_1 + k_1 + k_2\right) + i\Omega\left(c_1 + c_2\right) & -k_2 - i\Omega c_2 \\ -k_2 - i\Omega c_2 & \left(-\Omega^2 m_2 + k_2\right) + i\Omega c_2 \end{vmatrix}} = \frac{a + ib}{c + id} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + i\frac{bc - ad}{c^2 + d^2} \tag{12.2}$$

Cramersche Regel für die unbekannten, komplexen Weg!-Amplitude $\underline{Y}_2$ [m]

$$\underline{Y}_2 = \frac{\begin{vmatrix} \left(-\Omega^2 m_1 + k_1 + k_2\right) + i\Omega\left(c_1 + c_2\right) & -m_1 \cdot a_1 \\ -k_2 - i\Omega c_2 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \left(-\Omega^2 m_1 + k_1 + k_2\right) + i\Omega\left(c_1 + c_2\right) & -k_2 - i\Omega c_2 \\ -k_2 - i\Omega c_2 & \left(-\Omega^2 m_2 + k_2\right) + i\Omega c_2 \end{vmatrix}} = \frac{a + ib}{c + id} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + i\frac{bc - ad}{c^2 + d^2} \tag{12.3}$$

Betrag der Wege [m] | Betrag der Beschleunigungen [m/s²] | Phase | Phasendifferenz

$$\left|\underline{Y}_1\right| = \sqrt{\mathrm{Real}\left(\underline{Y}_1\right)^2 + \mathrm{Imag}\left(\underline{Y}_1\right)^2} \quad \rightarrow \quad \left|\ddot{\underline{Y}}_1\right| = \Omega^2 \left|\underline{Y}_1\right| \qquad \varphi_1 = \arctan\left(\frac{\mathrm{Imag}\left(\underline{Y}_1\right)}{\mathrm{Real}\left(\underline{Y}_1\right)}\right) \tag{13.1}$$

$$\left|\underline{Y}_2\right| = \sqrt{\mathrm{Real}\left(\underline{Y}_2\right)^2 + \mathrm{Imag}\left(\underline{Y}_2\right)^2} \quad \rightarrow \quad \left|\ddot{\underline{Y}}_2\right| = \Omega^2 \left|\underline{Y}_2\right| \qquad \varphi_2 = \arctan\left(\frac{\mathrm{Imag}\left(\underline{Y}_2\right)}{\mathrm{Real}\left(\underline{Y}_2\right)}\right) \tag{13.2}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$$

Gekoppeltes System: erzwungene, gedämpfte Schwingung, Sonderfall α=1, μ=1

Berechnung des Sonderfalls Schwinger 1 = Schwinger 2, (aus Vortrag „Kraftregelung“)

	Masse [kg]	Eigenfrequenz [Hz]		Federsteifigkeit [N/m]	Dämpfungsmaß, Q-Faktor		
Shaker	$m1 := 5$	$f1 := 450$	$\omega1 := 2\cdot\pi\cdot f1 = 2827.4$	$k1 := \omega1^2\cdot m1 = 4\times10^7$	$D1 := 0.01$	$Q1 := \frac{1}{2D1} = 50$	$c1 := 2D1\cdot m1\cdot\omega1 = 282.74$
DUT	$m2 := 5$	$f2 := 450$	$\omega2 := 2\cdot\pi\cdot f2 = 2827.4$	$k2 := \omega2^2\cdot m2 = 4\times10^7$	$D2 := 0.01$	$Q2 := \frac{1}{2D2} = 50$	$c2 := 2D2\cdot m2\cdot\omega2 = 282.74$

$\mu := \frac{m2}{m1} = 1$ $\quad \alpha := \frac{\omega2}{\omega1} = 1$

Anregung [m/s²] Shaker $a1 := 10$ $\quad$ DUTdirekt $a2 := 0$

komplexe Amplitudenfunktion $f := f2 = 450$ $\quad \Omega := 2\cdot\pi\cdot f = 2827.43$

Cramersche Regel

Nennerdeterminante

$$DeterNenner := \begin{bmatrix} -\Omega^2\cdot m1 + (k1+k2) + \Omega\cdot(c1+c2)\,i & -k2-(\Omega\cdot c2)i \\ -k2-(\Omega\cdot c2)i & -\Omega^2\cdot m2 + k2 + (\Omega\cdot c2)i \end{bmatrix} = -1.6\times10^{15} - 3.2i\times10^{13}$$

Zählerdeterminante Y1

$$DeterY1 := \begin{bmatrix} -a1\cdot m1 & -k2-(\Omega\cdot c2)i \\ -a2\cdot m2 & -\Omega^2\cdot m2 + k2 + (\Omega\cdot c2)i \end{bmatrix} = -4i\times10^7$$

Amplitude Y1 $\quad Y1 := \frac{DeterY1}{DeterNenner} = 5\times10^{-10} + 2.5i\times10^{-8}$

Amplitudenbetrag Y1

$Y1real := Re(Y1) = 5\times10^{-10}$ $\quad$ **Weg [m]**

$Y1imag := Im(Y1) = 2.5\times10^{-8}$ $\quad Dis1 := \sqrt{Y1real^2 + Y1imag^2} = 2.5\times10^{-8}$

Beschleunigung [m/s²]

$Acc1 := \Omega^2\cdot Dis1 = 0.2$

Zählerdeterminante Y2

$$DeterY2 := \begin{bmatrix} -\Omega^2\cdot m1 + (k1+k2) + \Omega\cdot(c1+c2)\,i & -a1\cdot m1 \\ -k2-(\Omega\cdot c2)i & -a2\cdot m2 \end{bmatrix} = -2\times10^9 - 4i\times10^7$$

Amplitude Y2 $\quad Y2 := \frac{DeterY2}{DeterNenner} = 1.25\times10^{-6} + 10i\times10^{-12}$

Amplitudenbetrag Y2

$Y2real := Re(Y2) = 1.25\times10^{-6}$ $\quad$ **Weg [m]**

$Y2imag := Im(Y2) = 10\times10^{-12}$ $\quad Dis2 := \sqrt{Y2real^2 + Y2imag^2} = 1.25\times10^{-6}$

Beschleunigung [m/s²]

$Acc2 := \Omega^2\cdot Dis2 = 10$

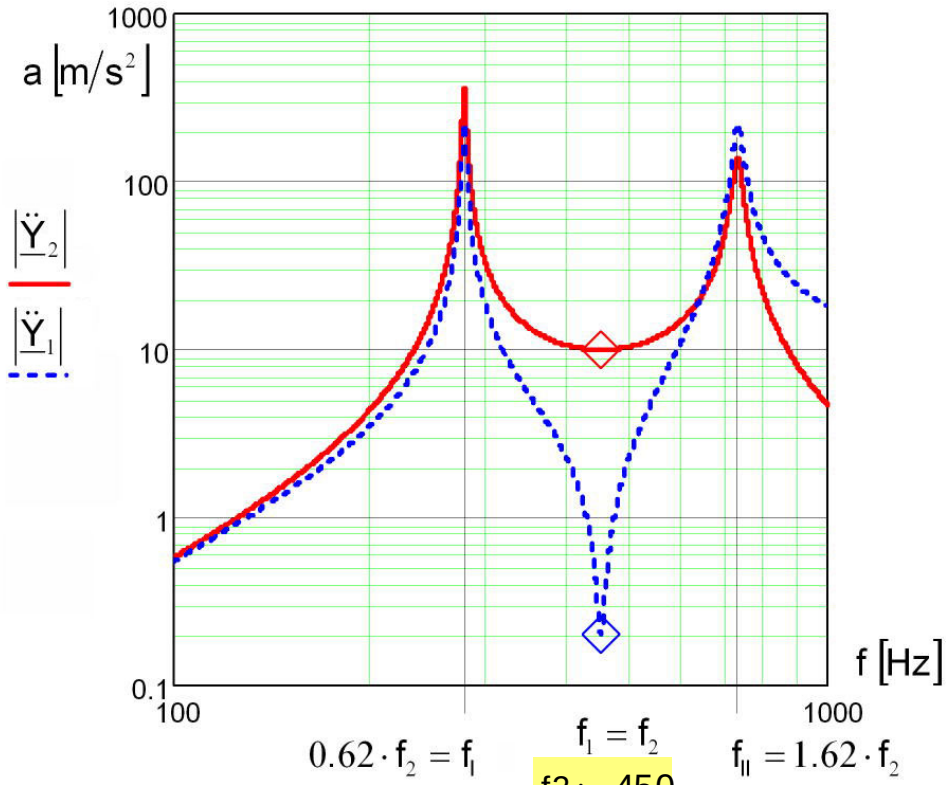
Gekoppeltes System: erzwungene, gedämpfte Schwingung, Sonderfall α=1, μ=1

Berechnung des Sonderfalls Schwinger 1 = Schwinger 2, (aus Vortrag „Kraftregelung“)

	Masse [kg]	Eigenfrequenz [Hz]		Federsteifigkeit [N/m]	Dämpfungsmaß, Q-Faktor		
Shaker	$m1 := 5$	$f1 := 450$	$\omega1 := 2\cdot\pi\cdot f1 = 2827.4$	$k1 := \omega1^2\cdot m1 = 4\times10^7$	$D1 := 0.01$	$Q1 := \frac{1}{2D1} = 50$	$c1 := 2D1\cdot m1\cdot\omega1 = 282.74$
DUT	$m2 := 5$	$f2 := 450$	$\omega2 := 2\cdot\pi\cdot f2 = 2827.4$	$k2 := \omega2^2\cdot m2 = 4\times10^7$	$D2 := 0.01$	$Q2 := \frac{1}{2D2} = 50$	$c2 := 2D2\cdot m2\cdot\omega2 = 282.74$

$\mu := \frac{m2}{m1} = 1$ $\quad \alpha := \frac{\omega2}{\omega1} = 1$

Anregung [m/s²] Shaker $a1 := 10$ DUTdirekt $a2 := 0$



Eigenwertproblem

Eigenwerte $\lambda := \text{eigenwerte(EigenMat)} = \begin{pmatrix} 2.093\times10^7 \\ 3.054\times10^6 \end{pmatrix}$

$\text{feigen} := \frac{1}{2\pi}\cdot\sqrt{\lambda} = \begin{pmatrix} 728.115 \\ 278.115 \end{pmatrix}$ ← f_{II} ← f_I

Eigenvektoren $\Phi := \text{eigenvektoren(EigenMat)} = \begin{pmatrix} 0.851 & 0.526 \\ -0.526 & 0.851 \end{pmatrix}$

Φ_{II} Φ_I

Koppelfrequenzen

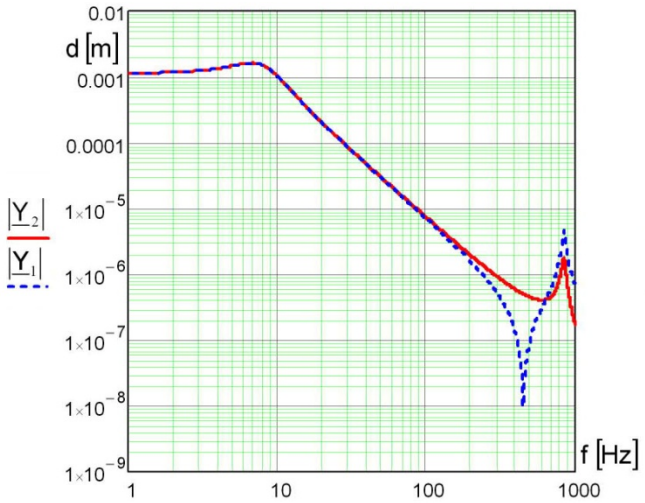
Gekoppeltes System: erzwungene, gedämpfte Schwingung, Amplituden für α=30, μ=2.5

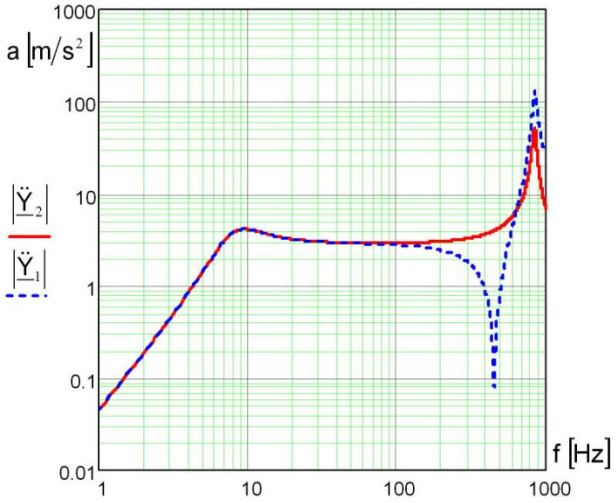
Berechnung des Shaker = Schwinger 1 mit m_1 konstant, Prüfobjekt = Schwinger 2 mit m_2 konstant

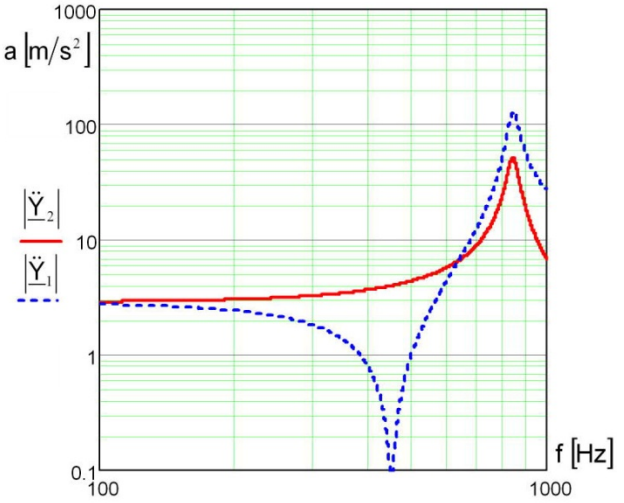
	Masse [kg]	Eigenfrequenz [Hz]		Federsteifigkeit [N/m]	Dämpfungsmaß, Q-Faktor		
Shaker	m1 := 2						
	m1 := 10						
	m1 := 50						
	m1 := 500	f1 := 15	ω1 := 2·π·f1 = 94.2	k1 := ω1²·m1 = 1.78×10⁴	D1 := 0.7	Q1 := 1/2D1 = 0.71	c1 := 2D1·m1·ω1 = 263.89
DUT	m2 := 5	f2 := 450	ω2 := 2·π·f2 = 2827.4	k2 := ω2²·m2 = 4×10⁷	D2 := 0.01	Q2 := 1/2D2 = 50	c2 := 2D2·m2·ω2 = 282.74

$\mu := \frac{m2}{m1} = 2.5$ $\alpha := \frac{\omega 2}{\omega 1} = 30$

Anregung [m/s²] Shaker a1 := 10 DUTdirekt a2 := 0

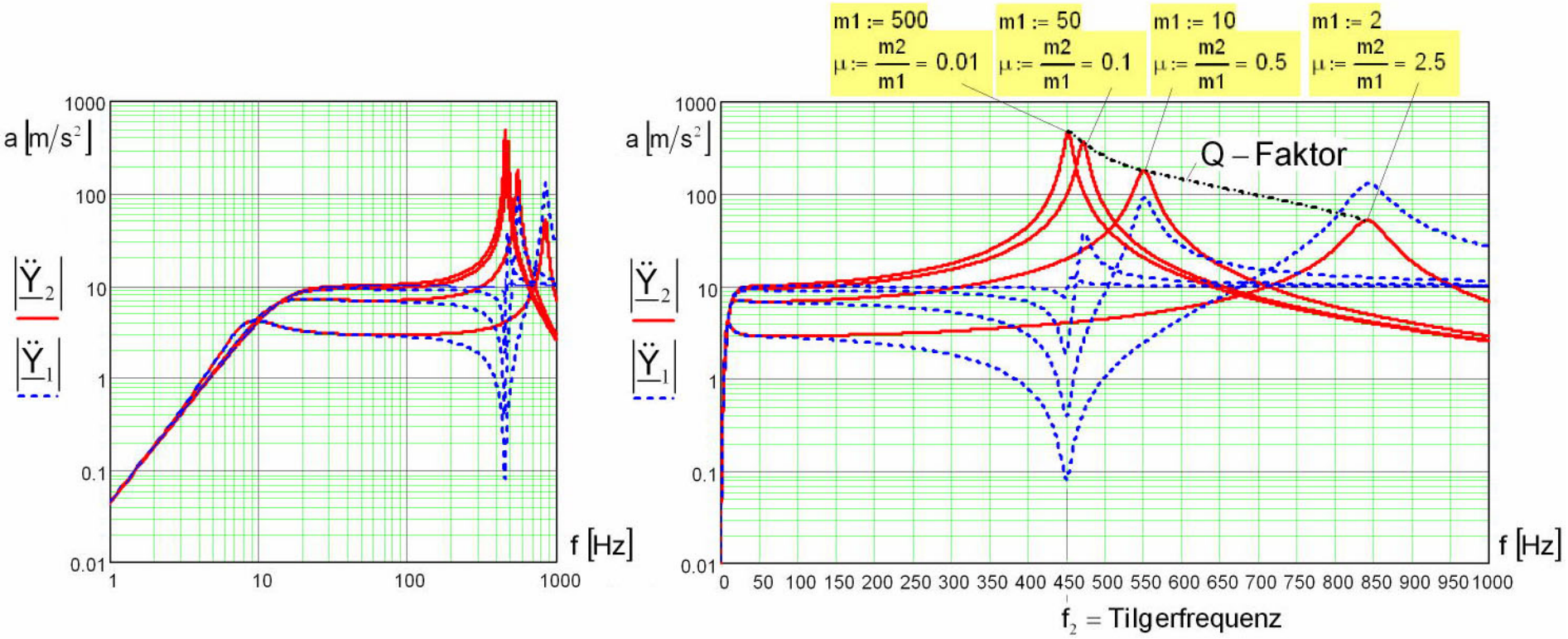






Gekoppeltes System: erzwungene, gedämpfte Schwingung, Amplituden in Abhängigkeit von α, μ

Berechnung: Shaker = Schwinger 1 mit m_1 variabel, Prüfobjekt = Schwinger 2 mit m_2 konstant



Bei abnehmender Armaturmasse m_1 tritt am Prüfobjekt auf:

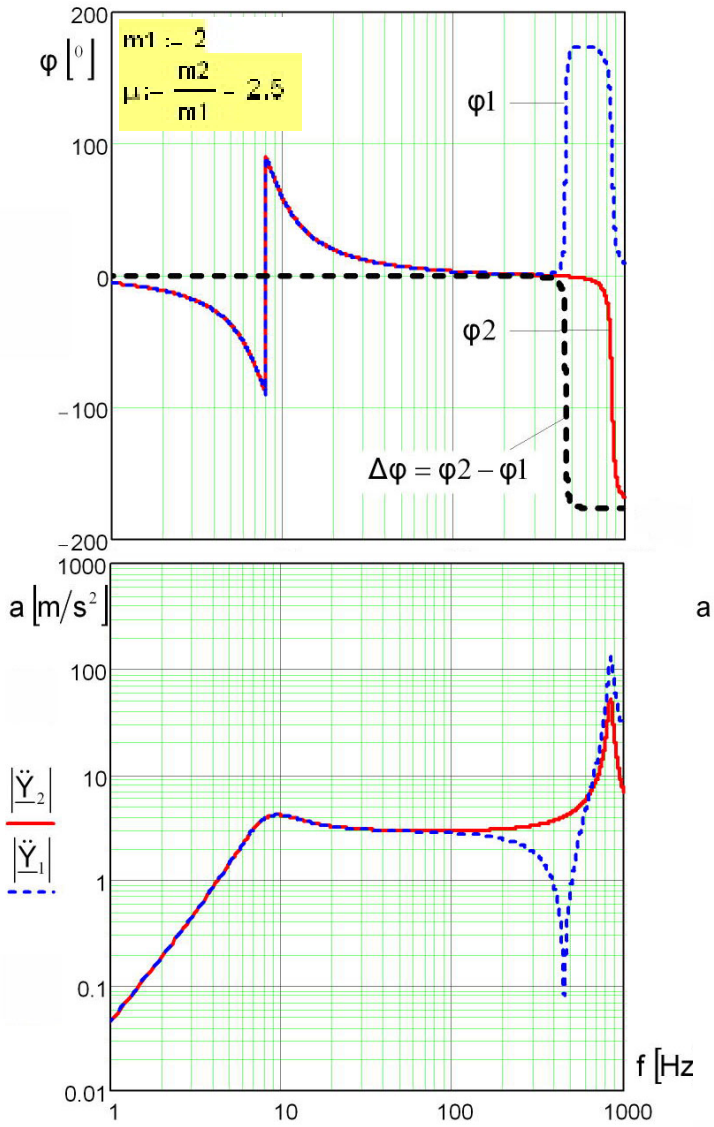
- Verschiebung der 1. Koppelfrequenz f_I und 1. (gleichphasigen) Eigenform zu tieferen Frequenzen hin.
- Verschiebung der 2. Koppelfrequenz f_{II} – die wesentliche Prüflingsresonanzfrequenz – zu höheren Frequenzen hin.
- Abnehmende Güte Q der Prüflingsresonanz.
- Eigenfrequenz f_2 des Prüfobjekts bleibt als Tilgerfrequenz und damit als eine „Antiresonanz“ erhalten.

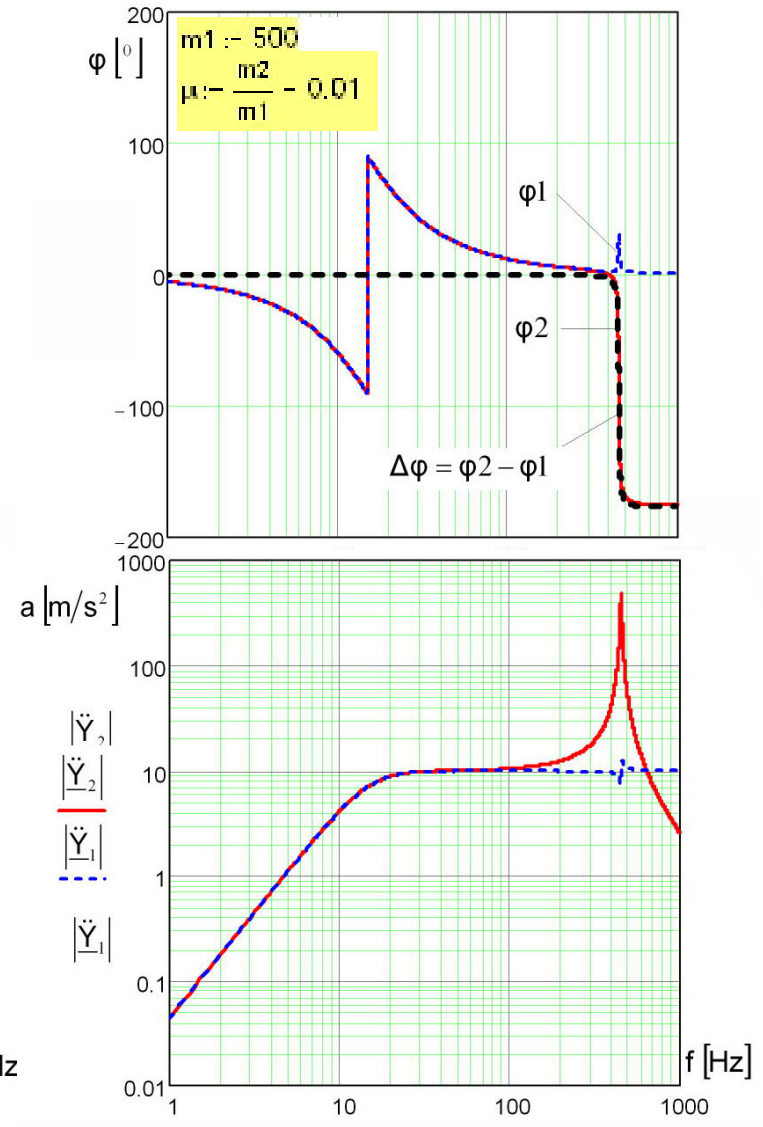
Gekoppeltes System: erzwungene, gedämpfte Schwingung, Amplituden und Phasen in Abhängigkeit von α, μ

Berechnung:

Shaker :
Schwinger 1 mit m_1, Y_1, φ_1

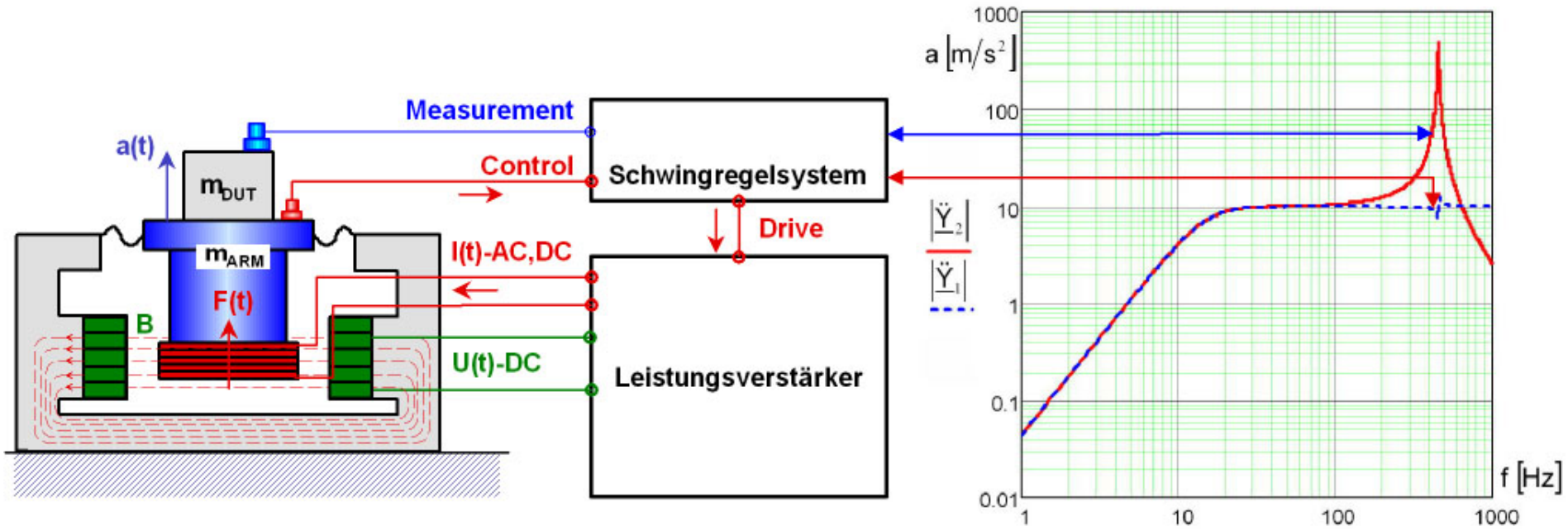
Prüfobjekt:
Schwinger 2 mit m_2 , Y_2, φ_2





Bei der großen Armaturmasse m_1=500kg bleibt die Phase bei der Resonanzfrequenz erhalten.

Gekoppeltes System: Schwingungsregelung



Der Vergleich von gemessenem Prüfobjektverhalten bei einem geregelten Resonanzsuchlauftest (Control) und den gerechneten Diagrammen des 2-Freiheitgrad-Schwingers zeigt:

- Die Schwingungsregelung regelt die „Antiresonanz“ in der Beschleunigung a_1 der Masse m_1 weitestgehend aus.
- Die Regelung simuliert damit eine hohe „Armaturmasse“ (wie hier mit m_1=500kg), was bei gleicher Aufhängeeigenfrequenz ω_1 auch eine größere Aufhängesteifigkeit k_1 bedeutet.
- Der Schwingerreger müsste dafür eine Kraft von $F_1=a_1 \cdot m_1=10m/s^2 \cdot 500kg=5000N$ vorhalten.
- Eine begrenzte bzw. nicht ausreichende Shakerkraft F_1 mindert den Antiresonanzausgleich und würde
  - eine Verschiebung der Prüflingsresonanzfrequenzen zu höheren Frequenzen hin,
  - bei gleichzeitig abnehmender Resonanzgüte

  bewirken.