

A close-up photograph of a mechanical assembly. In the center, a red ring is mounted on a vertical shaft. This ring is positioned between two triangular-shaped components that form a cage-like structure. The entire assembly is housed within a larger, circular metal component with several small holes around its perimeter. The text is overlaid on the image in a bold, yellow font with a black outline.

**Rotor-Stator-Kontakt
in
polygonförmigen Fanglagern**

Dipl.-Ing. Ulrich Simon

Inhalt

Einleitung

Modelle und Bewegungsgleichungen

- Einfaches Kontaktmodell
- Laval-Rotor mit Fanglager

Numerische Ergebnisse (Laval-Rotor)

- Periodische Bewegungen
- Parametereinflüsse
- Resonanzdurchlauf

Messungen

- Quasi-periodische Bewegungen (Laval-Rotor)
- Resonanzdurchlauf (Laval-Rotor)
- Video (Pendelrotor)

Zusammenfassung

Einleitung

Aufgabe von Fanglagern:

- Begrenzung des Rotorausschlags
 - bei Notfallsituationen oder
 - bei Resonanzdurchfahrten

Bauformen von Fanglagern:

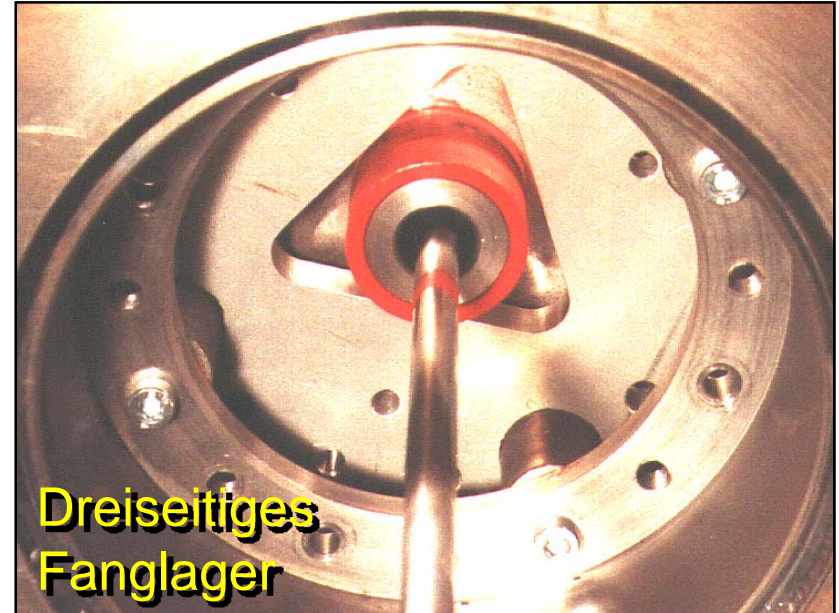
- *runde* Fanglager
- *polygonförmige* Fanglager

Problem bei runden Fanglagern:

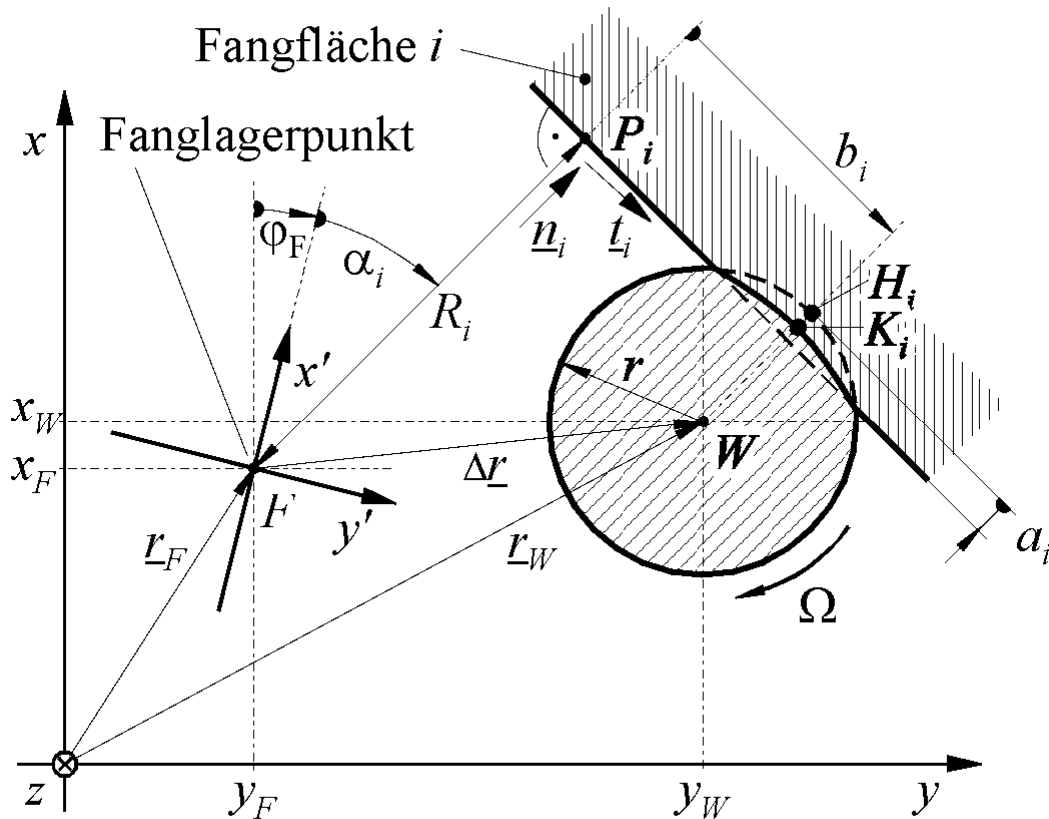
- *backward whirl*

Fragen:

- Sind polygonförmige Fanglager besser als runde Fanglager ?
- Welches Polygon liefert die günstigste Fanglagerform ?
- Parametereinflüsse ?



Einfaches Kontakt-Modell: **Kontaktkinematik**



Lage von Welle und Fanglager:

$$\underline{q}_W = [x_W, y_W, \varphi_W]^t,$$

$$\underline{q}_F = [x_F, y_F, \varphi_F]^t$$

Eindringung:

$$a_i = a_i(\underline{q}_W, \underline{q}_F)$$

Relativgeschwindigkeit
normal und tangential:

$$v_{ni} = v_{ni}(\underline{q}_W, \underline{q}_F, \dot{\underline{q}}_W, \dot{\underline{q}}_F) = \dot{a}_i,$$

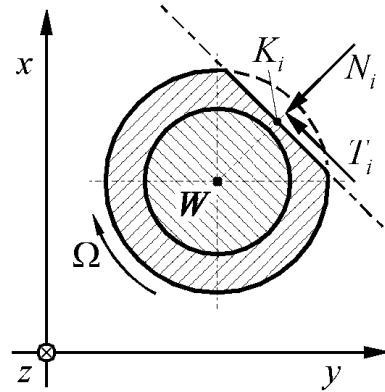
$$v_{ti} = v_{ti}(\underline{q}_W, \underline{q}_F, \dot{\underline{q}}_W, \dot{\underline{q}}_F)$$

Einfaches Kontakt-Modell: **Kontaktkraft-Kennlinien**

Normalkraft:

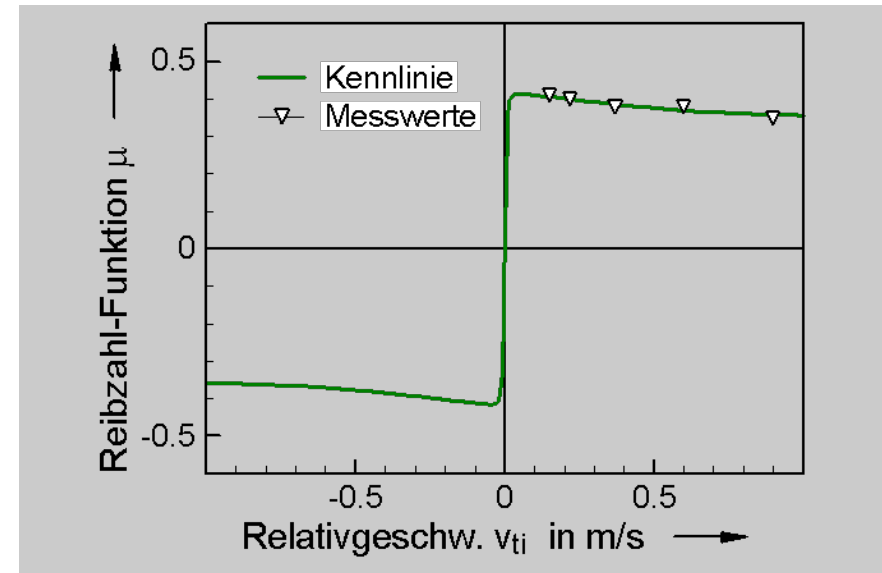
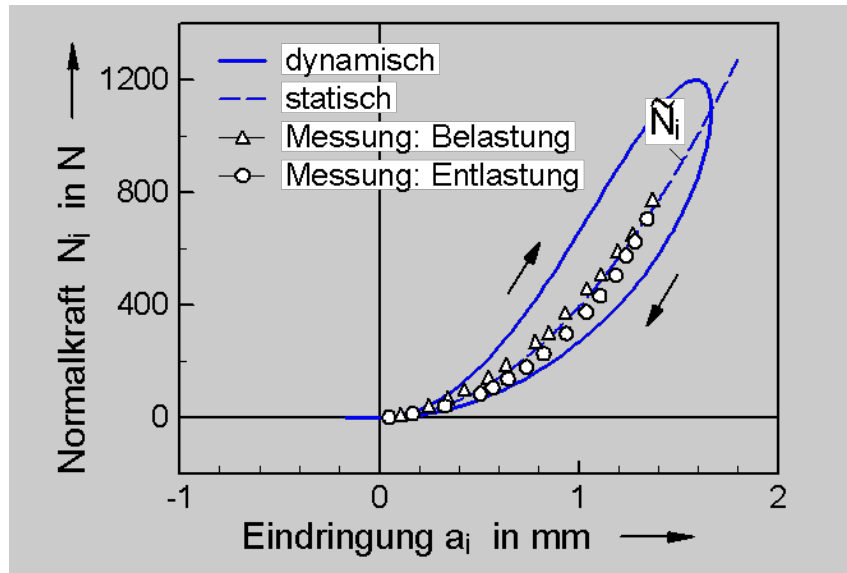
$$N_i = \tilde{N}_i(a_i) e^{(b_K v_{ni})}$$

$$\tilde{N}_i = \begin{cases} 0 & \forall a_i < 0 \\ k_K a_i^p & \forall a_i \geq 0 \end{cases}$$



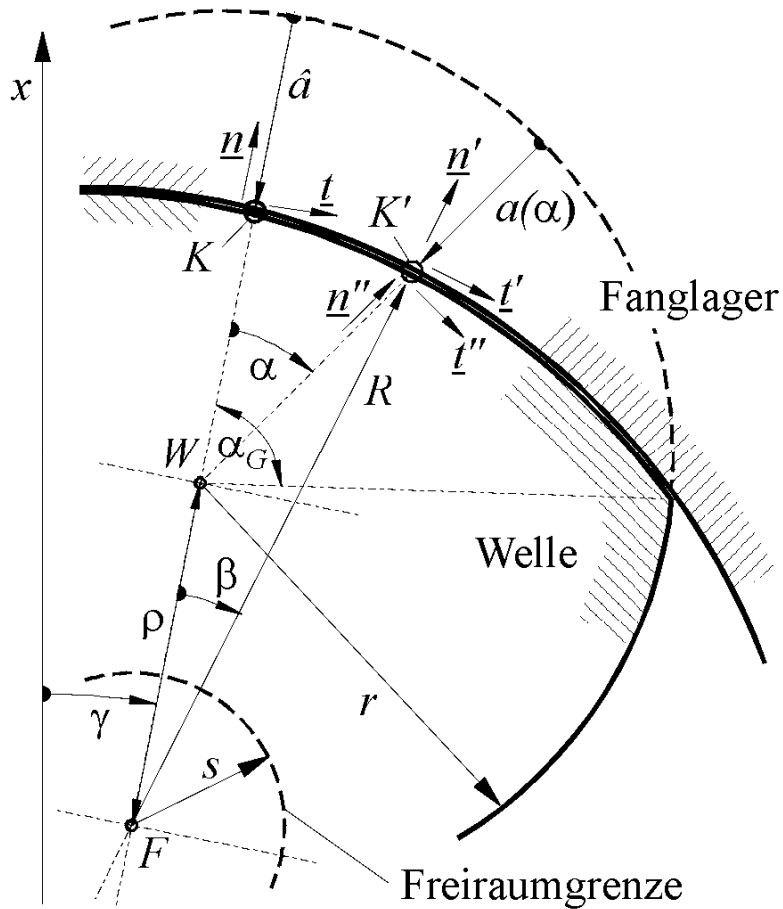
Umfangskraft:

$$T_i = N_i(a_i, v_{ni}) \mu_i(v_{ti})$$

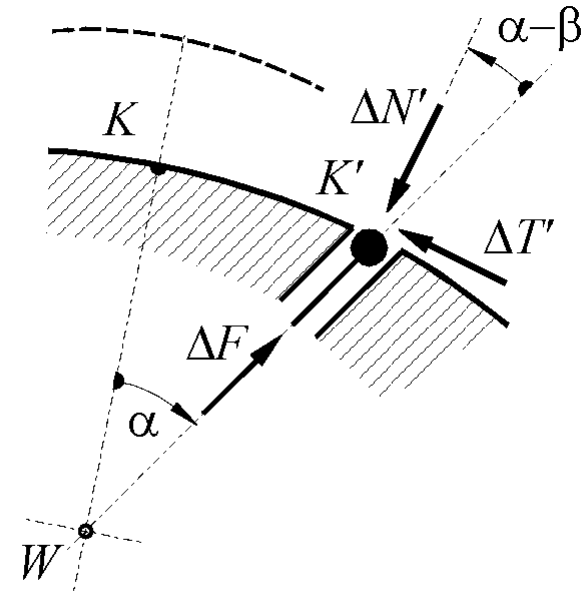


Erweitertes Kontakt-Modell für permanenten Kontakt

Flächenhafter Kontakt



Verteilte Kontaktkräfte



$$N = \int_{\text{Kontaktgebiet}} (\Delta N' \cos \beta - \Delta T' \sin \beta)$$

$$T = \int_{\text{Kontaktgebiet}} (\Delta N' \sin \beta + \Delta T' \cos \beta)$$

Bewegungsgleichung: Laval-Rotor mit Fanglager

Bewegungsgleichung:

$$\underline{\underline{M}} \underline{\ddot{q}} + \underline{\underline{D}} \underline{\dot{q}} + \underline{\underline{K}} \underline{q} + \underline{F}(\underline{q}, \underline{\dot{q}}) = \underline{u}(t)$$

$$\underline{q} = \begin{bmatrix} \underline{q}_W \\ \underline{q}_F \end{bmatrix} \quad \text{Auslenkungen}$$

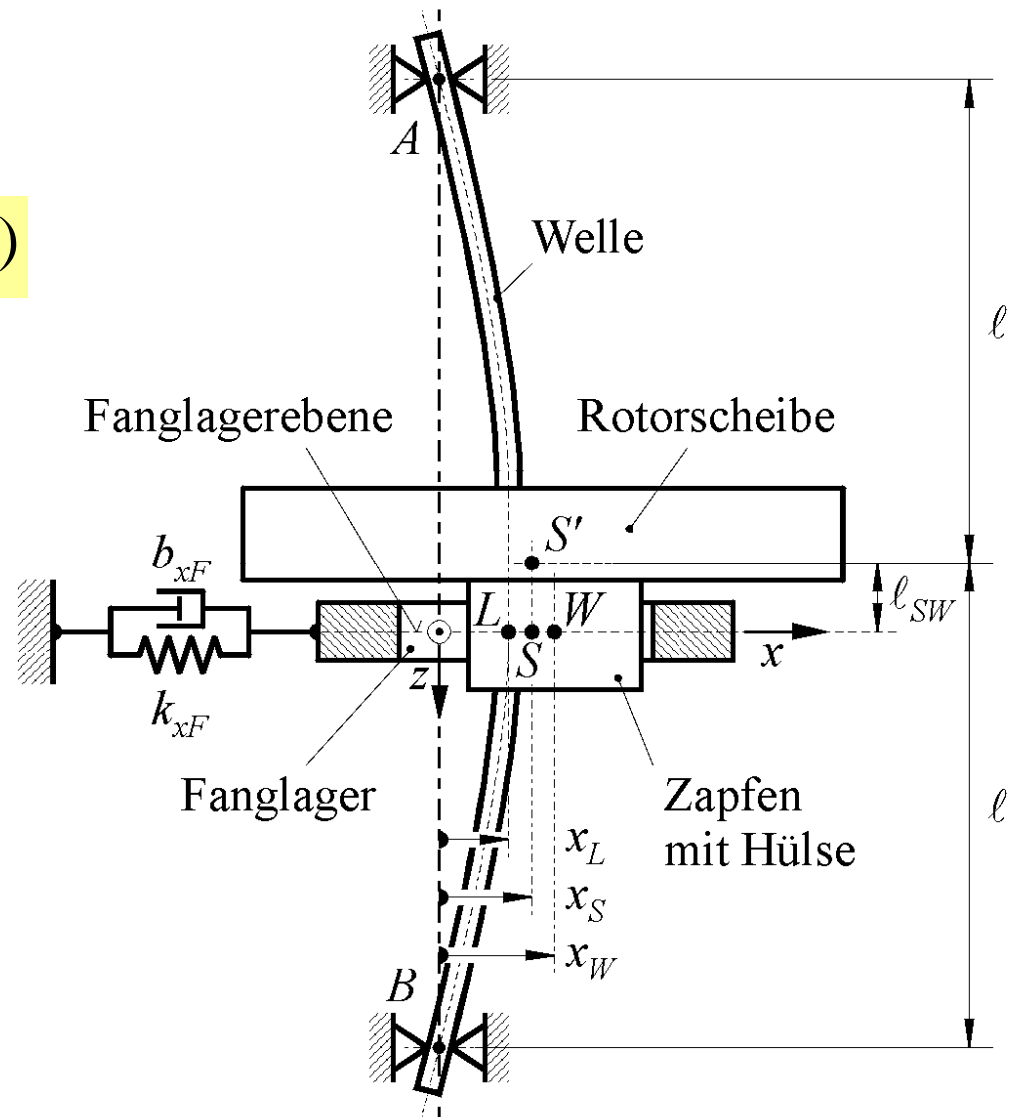
$$\underline{\underline{M}} \quad \text{Massenmatrix}$$

$$\underline{\underline{D}} \quad \text{Dämpfungsmatrix}$$

$$\underline{\underline{K}} \quad \text{Steifigkeitsmatrix}$$

$$\underline{F}(\underline{q}, \underline{\dot{q}}) \quad \text{Kontaktkräfte}$$

$$\underline{u}(t) \quad \text{Erregung}$$



Bewegungsgleichung: Pendel-Rotor mit Fanglager

Bewegungsgleichung:

$$\underline{\underline{M}} \underline{\underline{\ddot{q}}} + [\underline{\underline{B}} + \Omega \underline{\underline{G}}] \underline{\underline{\dot{q}}} + \underline{\underline{K}} \underline{\underline{q}} + \underline{F}(\underline{\underline{q}}, \underline{\underline{\dot{q}}}) = \underline{u}(t)$$

$$\underline{\underline{q}} = \begin{bmatrix} \underline{q}_W \\ \underline{q}_F \end{bmatrix} \quad \text{Auslenkungen}$$

$\underline{\underline{M}}$ Massenmatrix

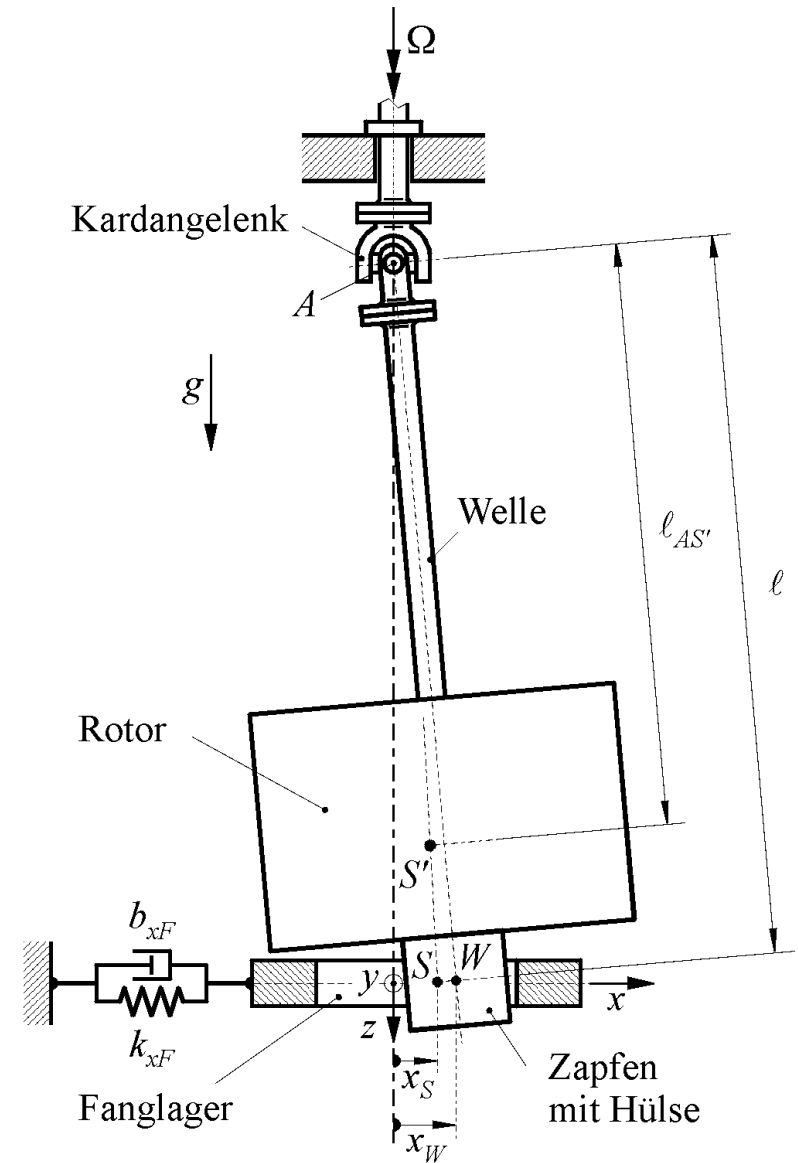
$\underline{\underline{B}}$ Dämpfungsmatrix

$\underline{\underline{G}}$ Gyroskopische Terme

$\underline{\underline{K}}$ Steifigkeitsmatrix

$\underline{F}(\underline{\underline{q}}, \underline{\underline{\dot{q}}})$ Kontaktkräfte

$\underline{u}(t)$ Erregung



Simulationsrechnungen

Lösen der Bewegungsgleichung durch numerische Integration

- Runge-Kutta-Verfahren (5. Ord.) mit Schrittweitensteuerung
- Schießverfahren

Systemparameter gemäß Versuchsstand:

Lavalrotor:

Rotormasse: $m_W = 10,25 \text{ kg}$

Steifigkeit, Welle: $k_W = 8940 \text{ N/m}$

Dämpfung, Welle: $b_W = 5 \text{ Ns/m}$

Eigenfrequenz: $f_0 = 4,70 \text{ Hz}$

Fanglager:

Fanglagermasse: $m_F = 12,47 \text{ kg}$

Massenmoment: $J_F = 4260 \text{ Nmm}^2$

Durchmesser: $R, R_i = 29 \text{ mm}$

Fanglagerspiel: $s, s_i = 4 \text{ mm}$

PVC-Hülse:

Exponent (Normalkraft): $p = 1,7$

Steifigkeitsfaktor: $k_K = 5,6 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^{1,7}$

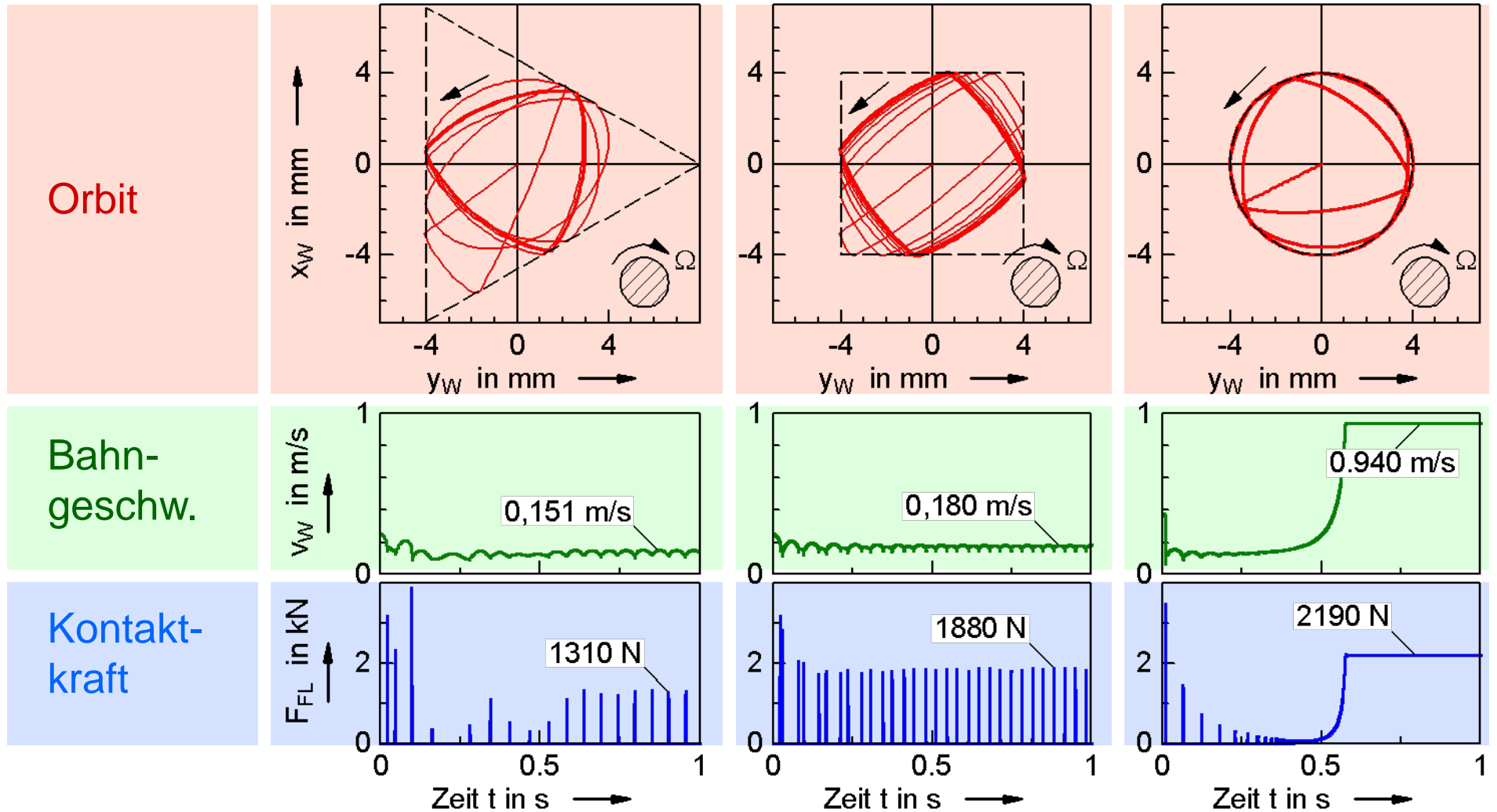
Verlustbeiwert: $b_K = 12 \text{ s/m}$

Reibzahl (Maximalwert): $\mu_0 = 0,19$

Simulation: Periodische Bewegungen

Laval-Rotor: Drehfrequenz $f = 6 \text{ Hz}$

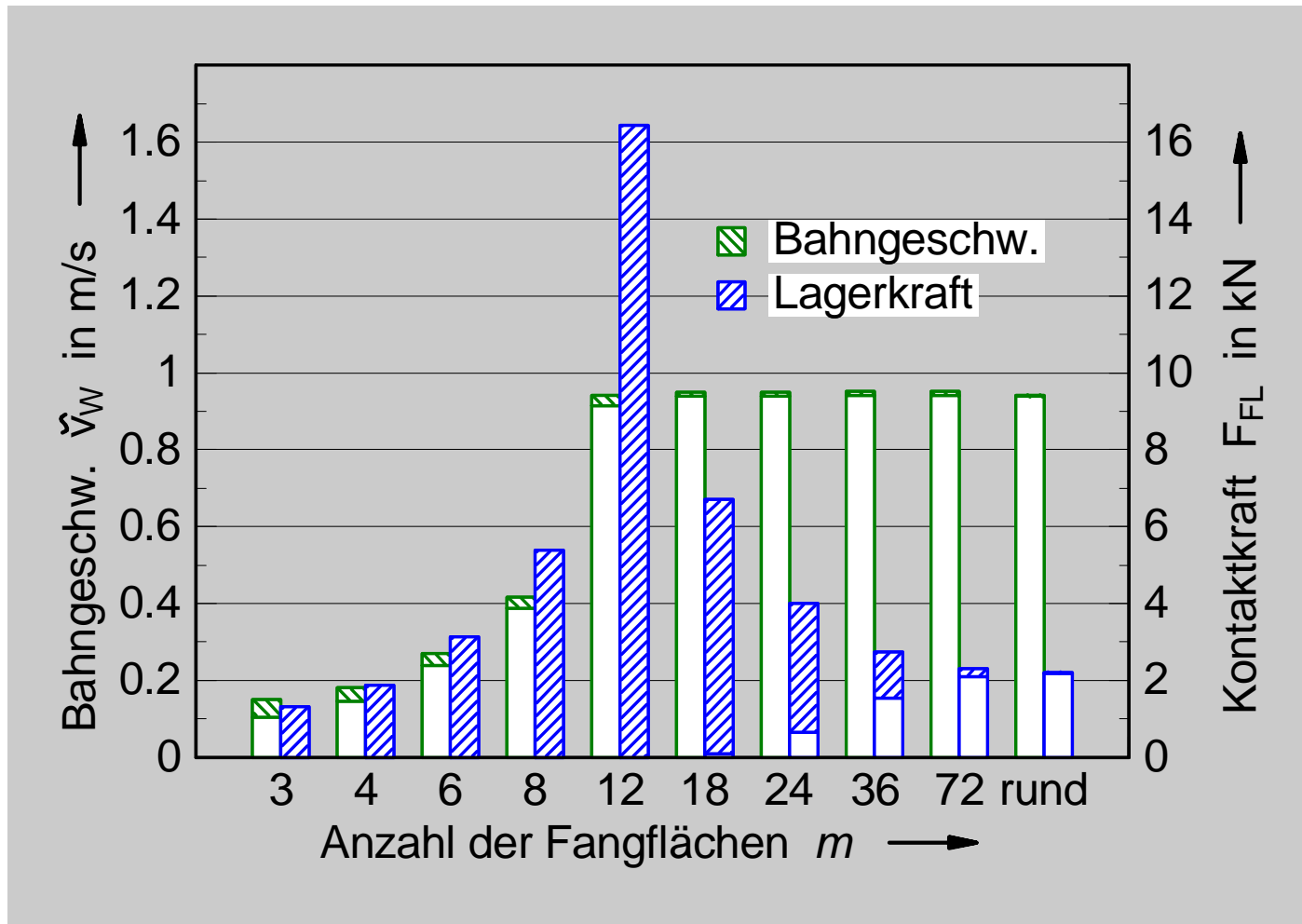
Fanglager: starre Aufhängung, PVC-Hülse



Simulation: Einfluss der Anzahl der Fangflächen

Laval-Rotor: Drehfrequenz $f = 6$ Hz

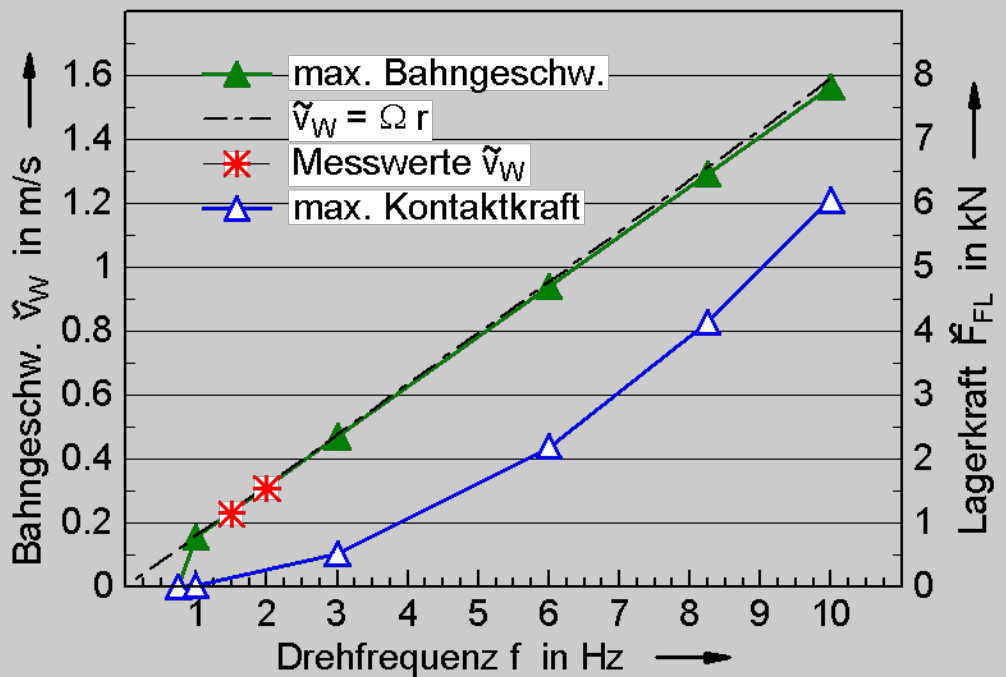
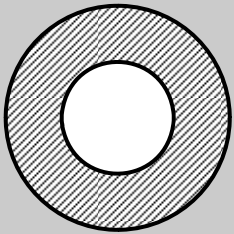
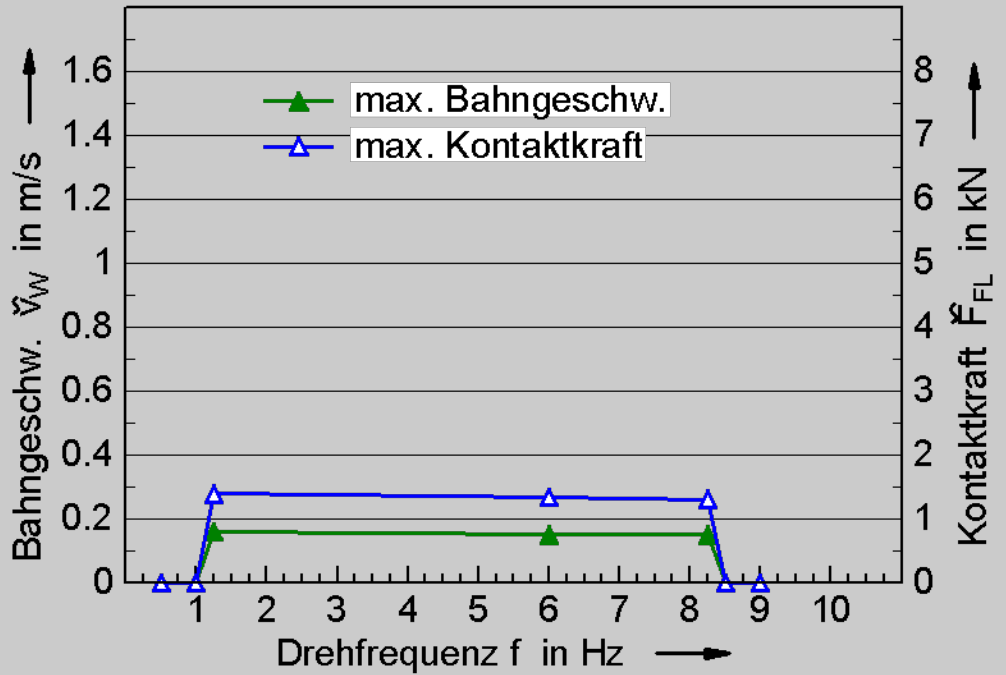
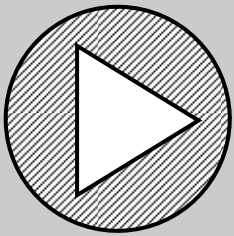
Fanglager: starre Aufhängung, PVC-Hülse



Simulation: Einfluss der Rotordrehzahl

Laval-Rotor: Drehfrequenz $f = 6$ Hz

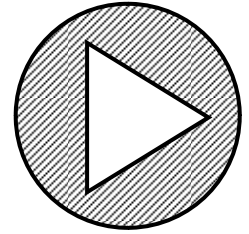
Fanglager: starre Aufhängung, PVC-Hülse



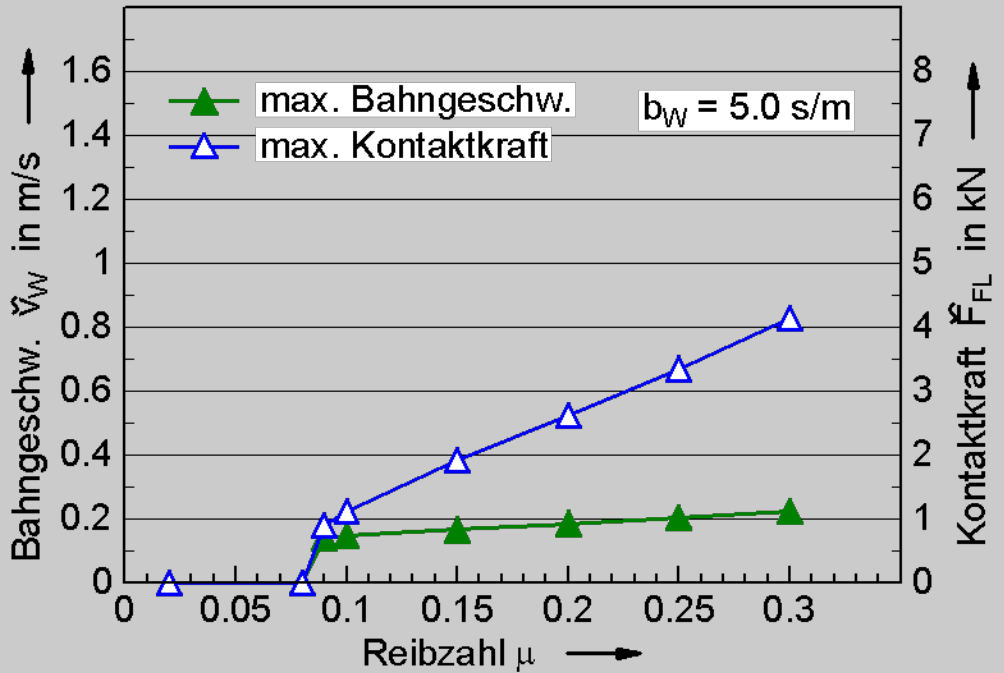
Einfluss von Reibung und Kontaktdämpfung

Laval-Rotor: Drehfrequenz $f = 6 \text{ Hz}$

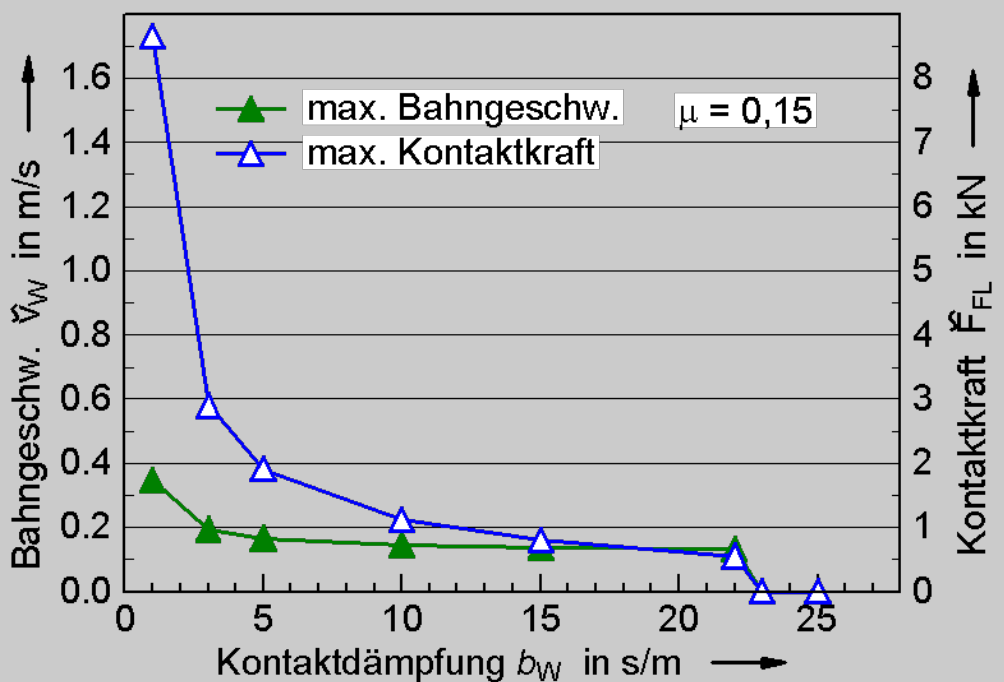
Fanglager: dreiseitig, starre Aufhängung, PVC-Hülse



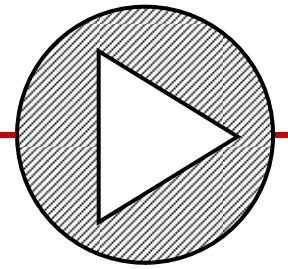
Einfluss
der
Reibung



Einfluss
der
Dämpfung



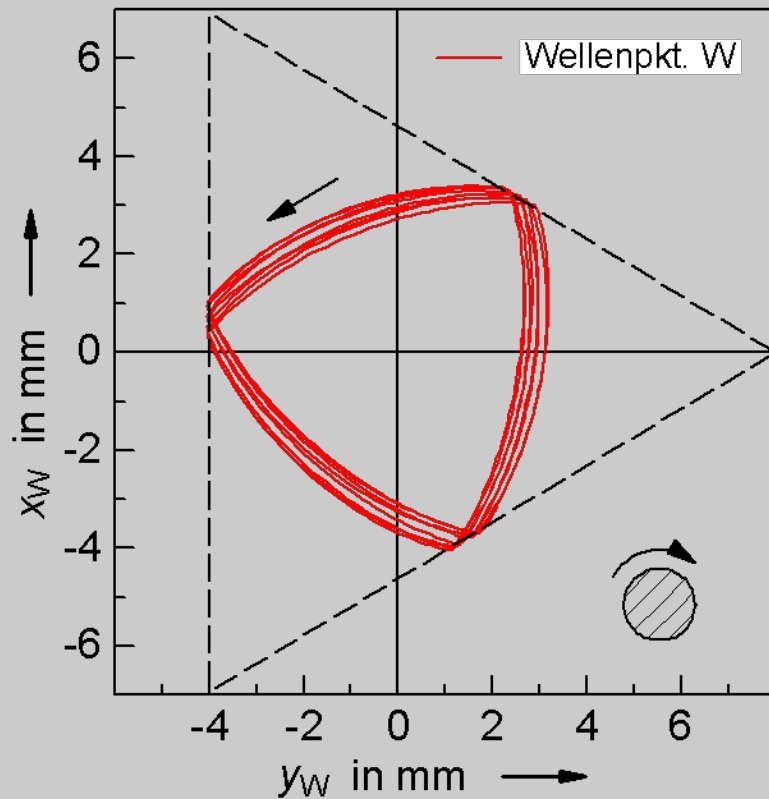
Simulation: Einfluss von Unwucht



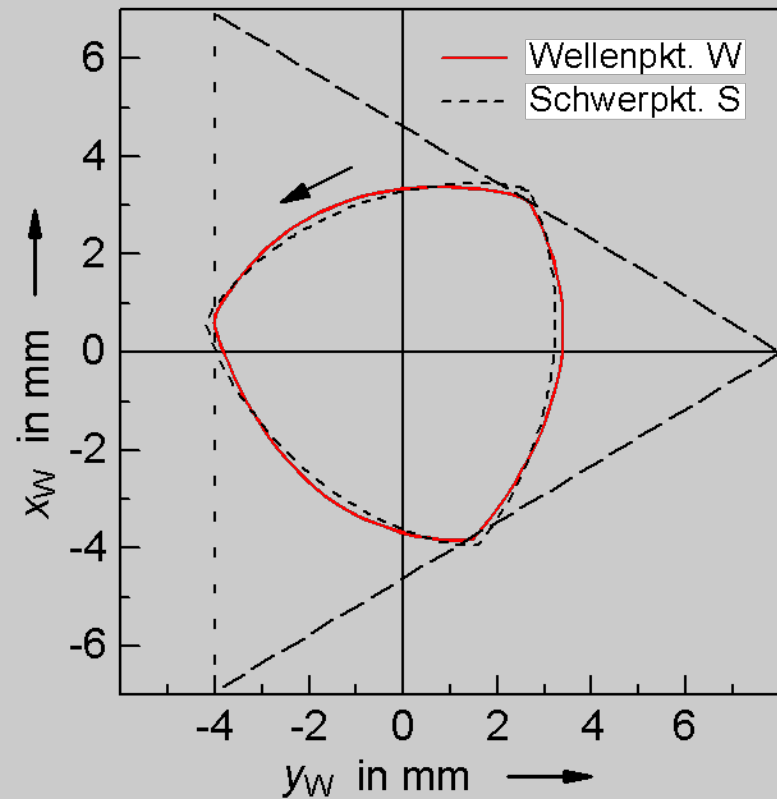
Laval-Rotor: Drehfrequenz $f = 6 \text{ Hz}$

Fanglager: dreiseitig, starre Aufhängung, PVC-Hülse

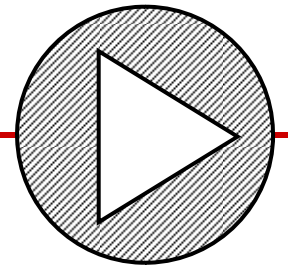
Quasi-period. Beweg. ($f = 5 \text{ Hz}$)



Halb-drehfreq. Beweg. ($f = 12 \text{ Hz}$)



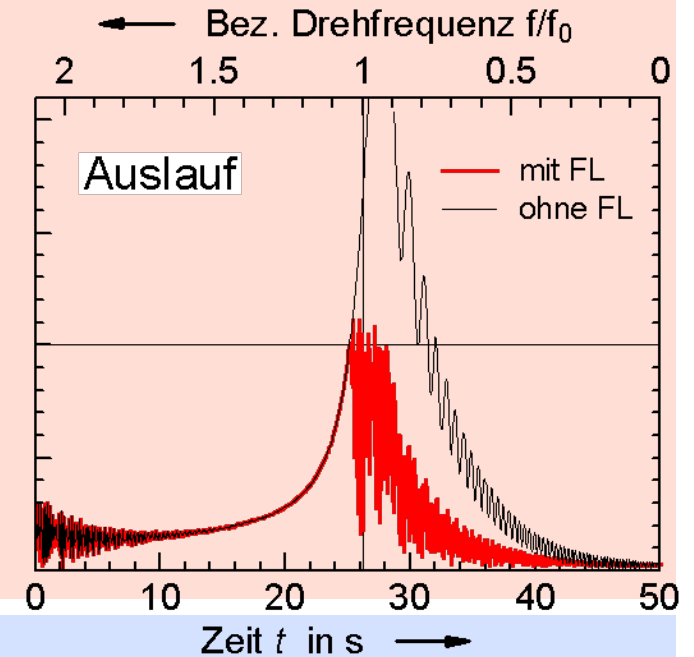
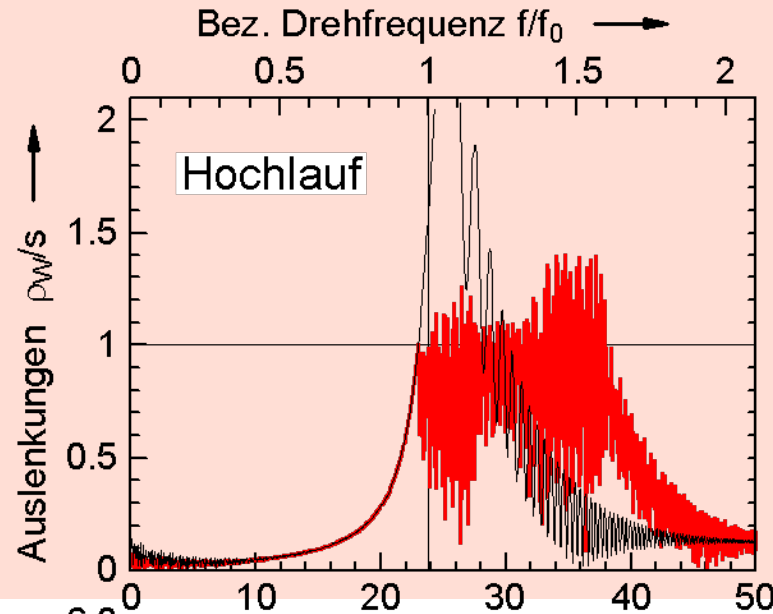
Simulation: Resonanzdurchlauf



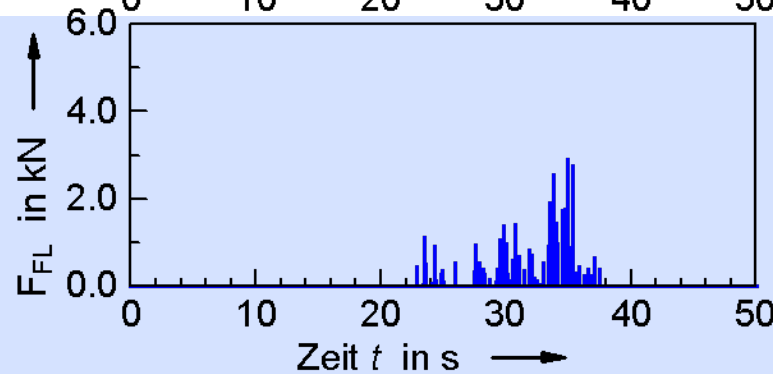
Laval-Rotor: Drehfrequenz $f = 0 \dots 10$ Hz, Eigenfrequenz $f_0 = 4,7$ Hz

Fanglager: dreiseitig, starre Aufhängung, PVC-Hülse

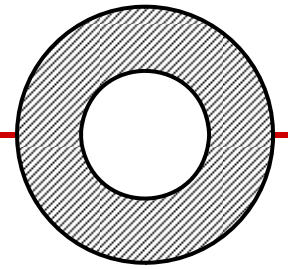
Resonanz-
kurve



Kontakt-
kraft



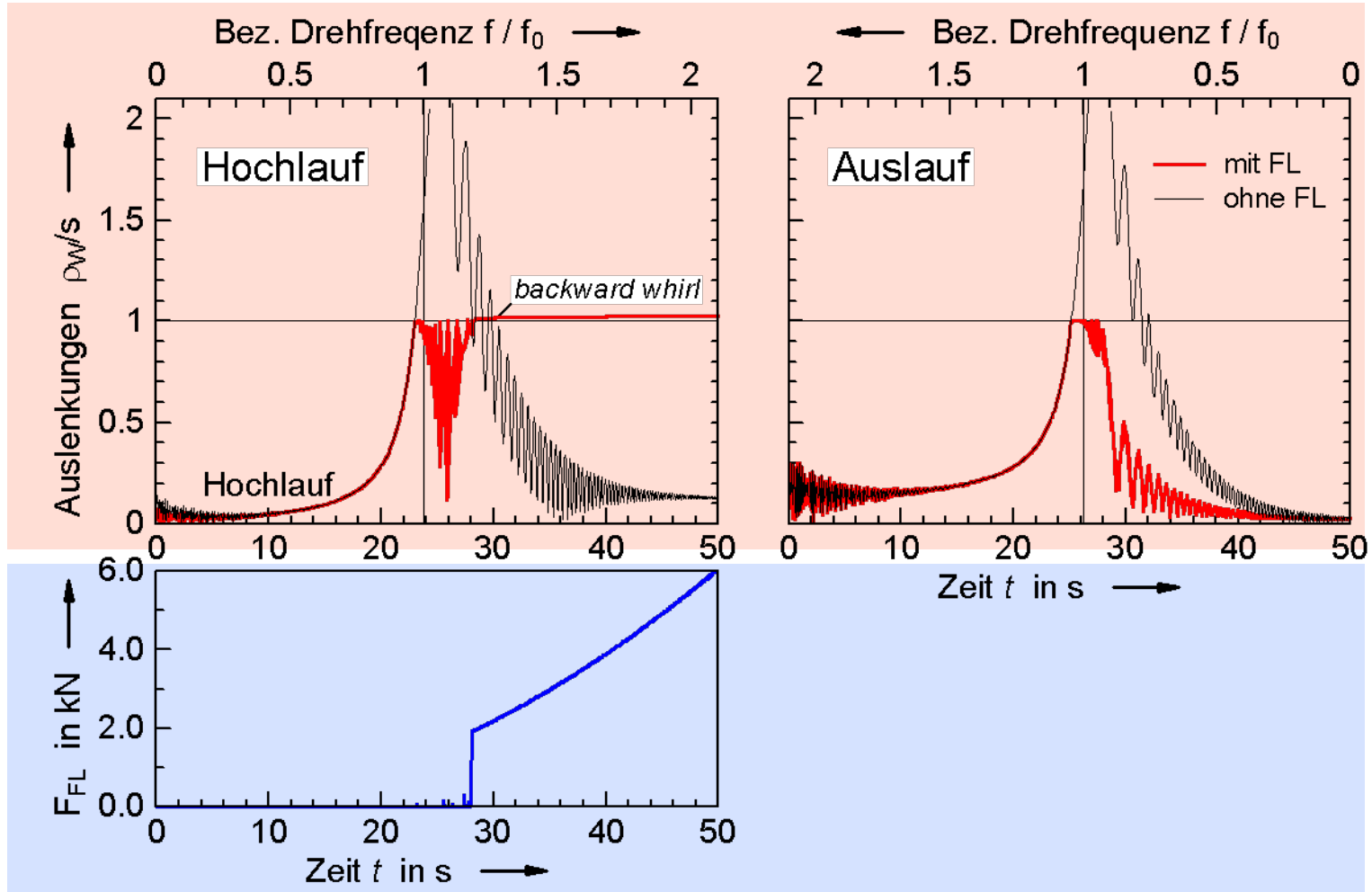
Simulation: Resonanzdurchlauf



Laval-Rotor: Drehfrequenz $f = 0 \dots 10$ Hz, Eigenfrequenz $f_0 = 4,7$ Hz

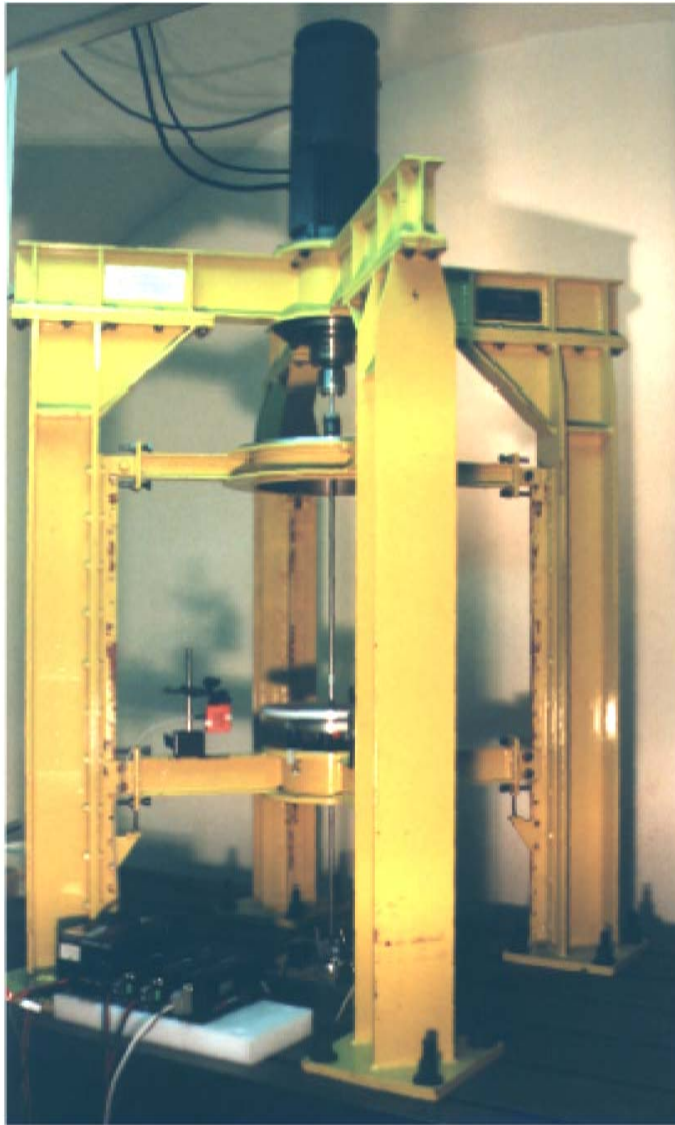
Fanglager: rund, starre Aufhängung, PVC-Hülse

Resonanzkurve



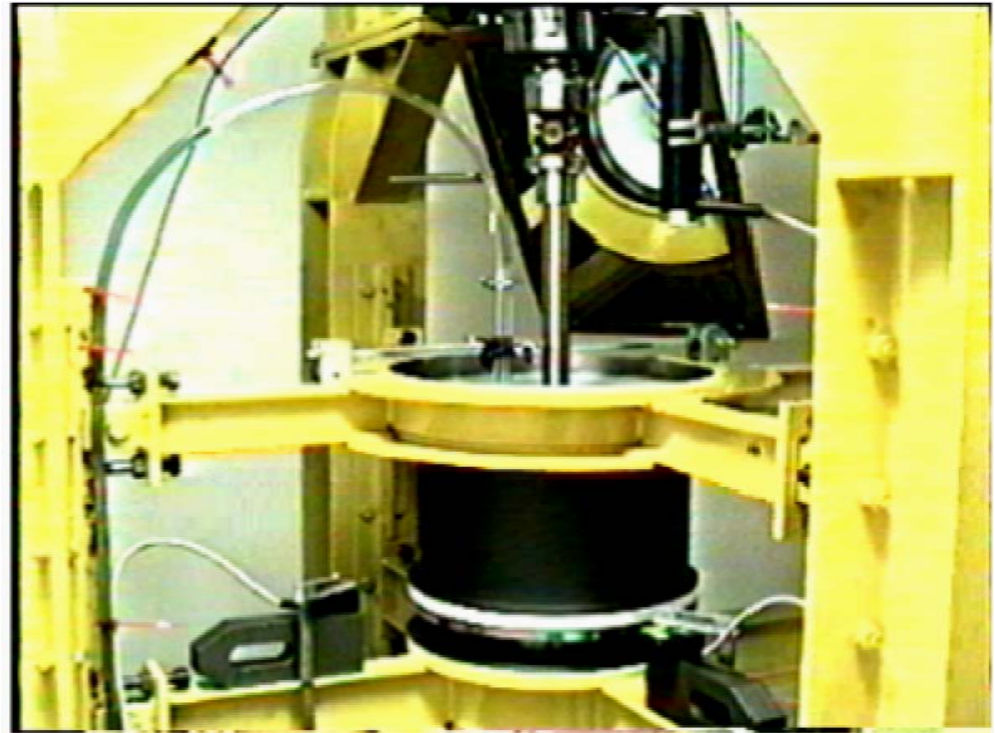
Kontaktkraft

Messungen am Versuchsstand:



Laval-Rotor

Pendelrotor

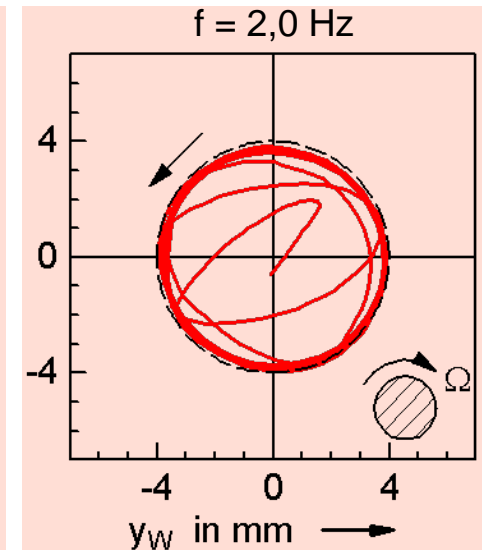
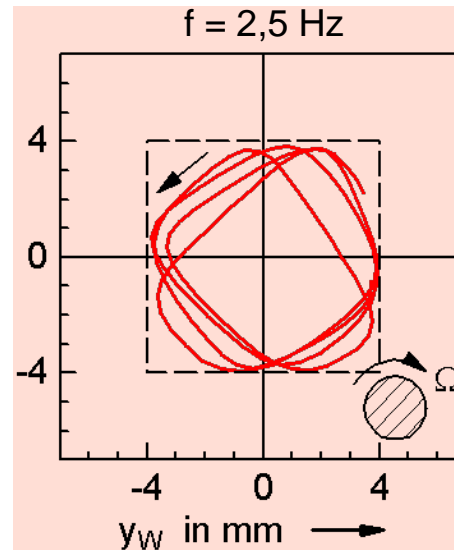
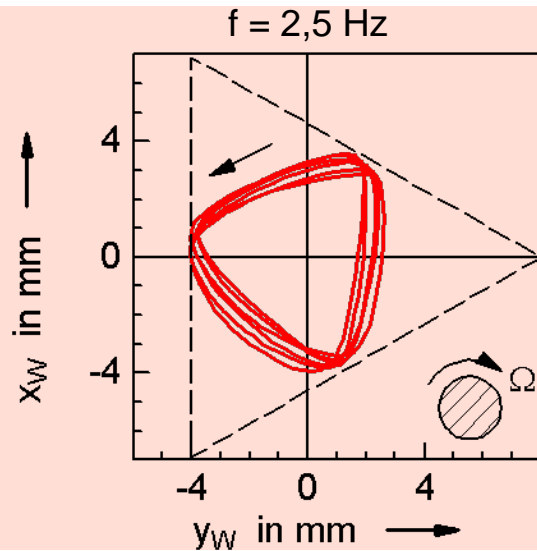


Messung: Quasi-periodische Bewegungen

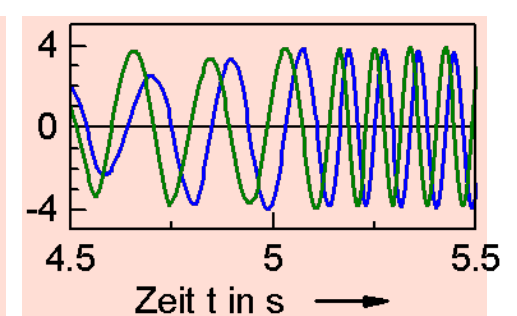
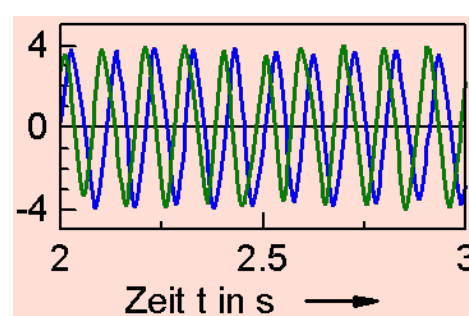
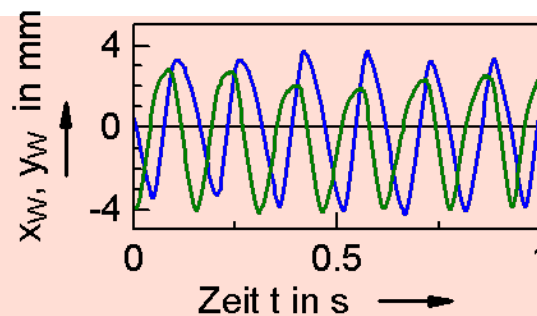
Laval-Rotor: Drehfrequenz f

Fanglager: starre Aufhängung, PVC-Hülse

Orbit



Auslenkungen



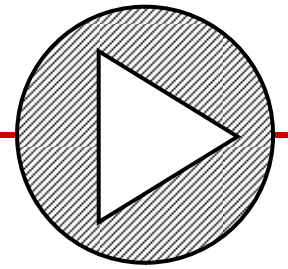
Bahngeschw.

$\approx 0,15 \text{ m/s}$

$\approx 0,21 \text{ m/s}$

$\approx 0,31 \text{ m/s}$

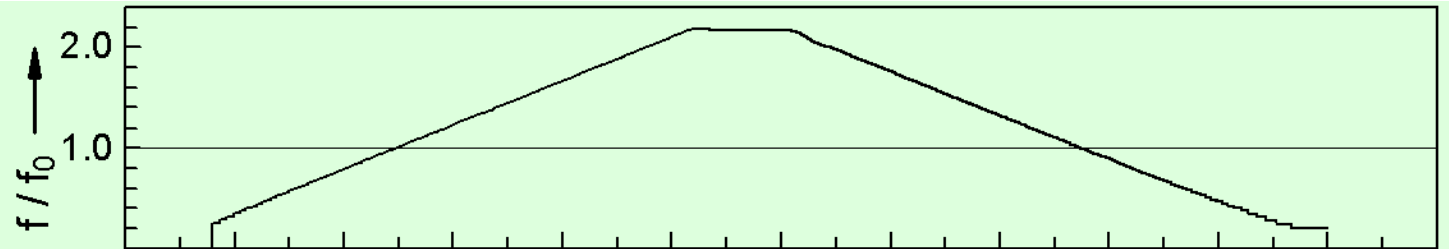
Messung: Resonanzdurchlauf



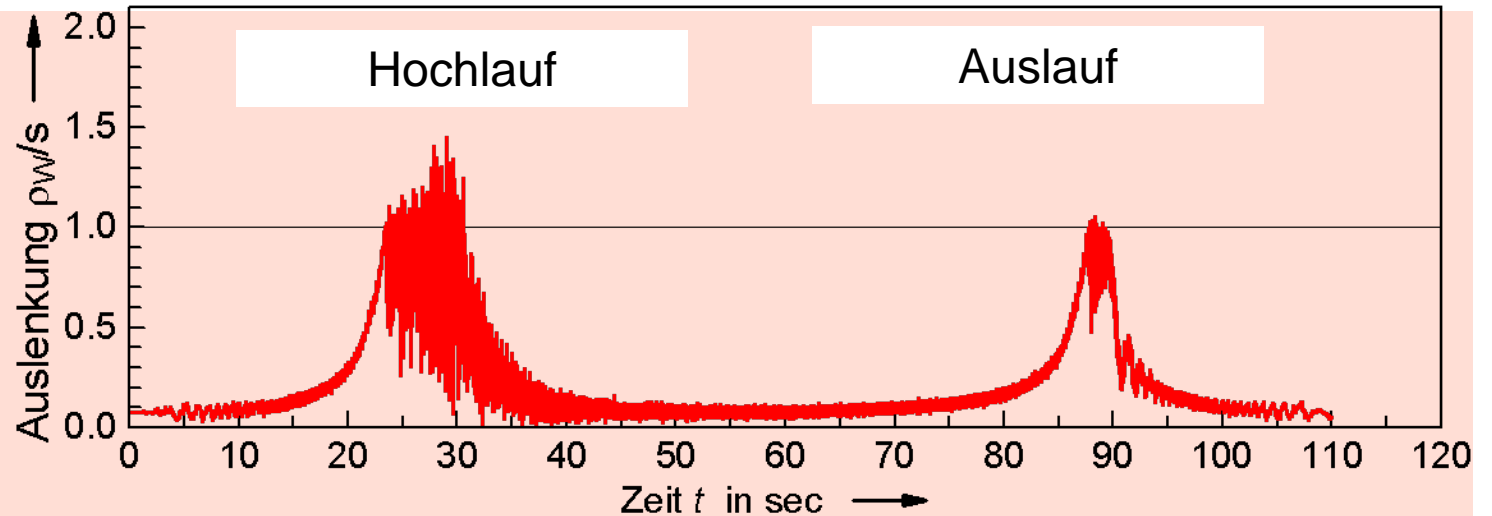
Laval-Rotor: Drehfrequenz $f = 0 \dots 10$ Hz, Eigenfrequenz $f_0 = 4,7$ Hz

Fanglager: dreiseitig, starre Aufhängung, PVC-Hülse

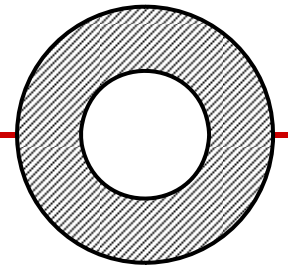
Dreh-
frequenz



Resonanz-
kurve



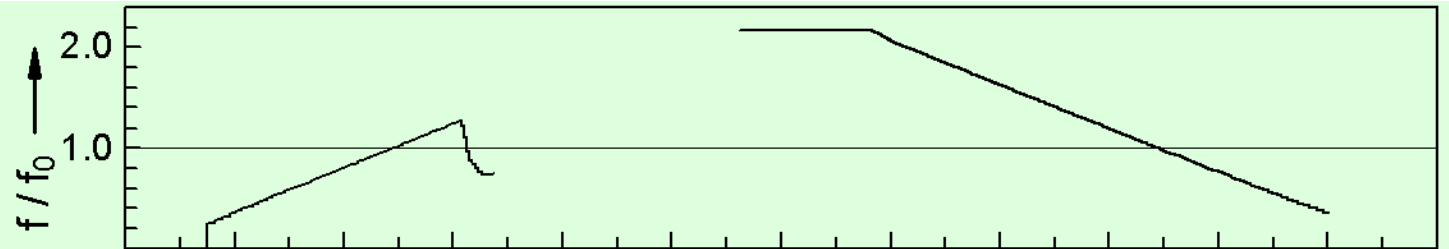
Messung: Resonanzdurchlauf



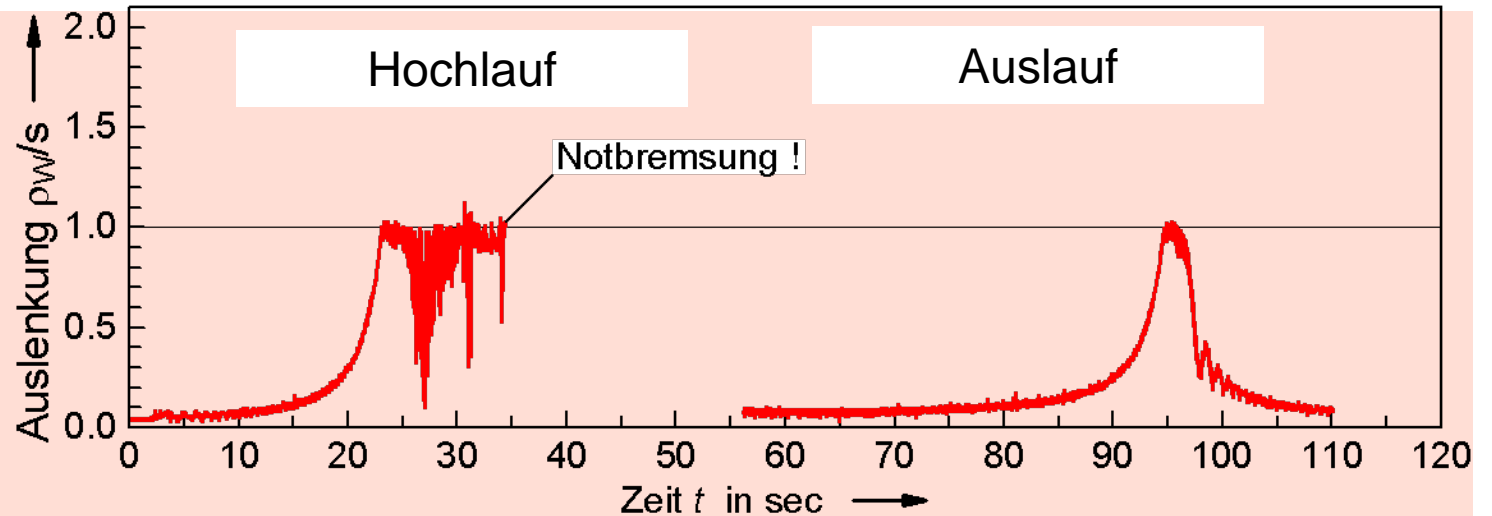
Laval-Rotor: Drehfrequenz $f = 0 \dots 10$ Hz, Eigenfrequenz $f_0 = 4,7$ Hz

Fanglager: rund, starre Aufhängung, PVC-Hülse

Dreh-
frequenz



Resonanz-
kurve



Zusammenfassung

Rechenmodelle können die Rotorbewegung bei Fanglagerkontakt vorhersagen.

Polygonförmige Fanglager bieten Vorteile gegenüber runden Fanglagern ...

- bei einfachen Konstruktionen, ohne Wälzlager, ohne Schmierung,
- bei Notfallsituationen und Resonanzdurchlauf,
- bei hohen Drehzahlen.

Faktoren zur Verminderung der Bahngeschwindigkeiten (Kontaktkräfte)

- Geringe Anzahl von Fangflächen.
- Kontakt mit geringer Reibung und großer Dämpfung.
- Nachgiebige, dämpfende Aufhängung des Fanglagers.

Empfehlung:

- Dreiseitiges, gleichseitiges Fanglager
- mit nachgiebiger, dämpfender Auflage und/oder Aufhängung.