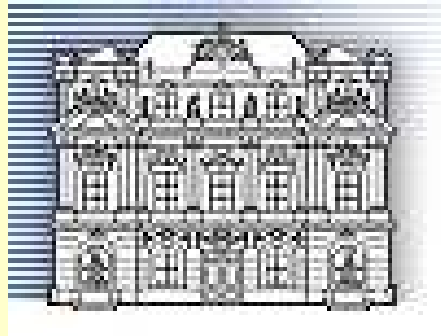
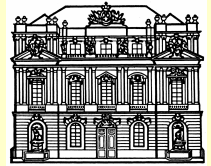


Unwuchtbestimmung in rotierenden Systemen – Theorie und Anwendungen

Ronny Ramlau

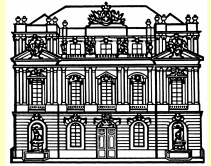


**Johann Radon Institute for Computational and Applied Mathematics, Linz
Österreichische Akademie der Wissenschaften**



Inhalt:

1. Problembeschreibung und industrielle Anwendungen
2. Modellierung der Unwucht und Inversion
3. Auswuchten von Flugzeugturbinen (Rolls Royce)
4. Modelloptimierung für Generatoren (Siemens AG Berlin)
5. Condition Monitoring für Windkraftanlagen (FIELAX GmbH, Bremerhaven)

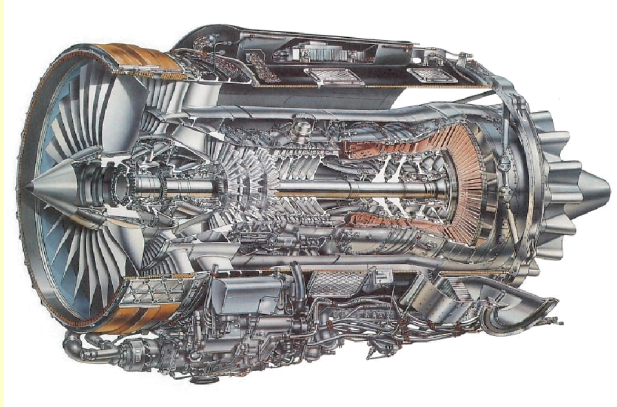


1. Problembeschreibung und industrielle Anwendungen

Unwuchten = Asymmetrische Massenverteilungen in rotierenden Systemen

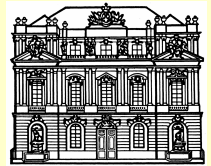
Auswuchten = Anbringen von Korrekturgewichten am Rotor zur Symmetrisierung

Flugzeugturbinen



Berechnung von Wuchtgewichten / Positionen für

- Flugzeugtriebwerke
- Generatoren
- Elektromotoren
- Vakuumpumpen
- Windkraftanlagen



Industriekooperationen:

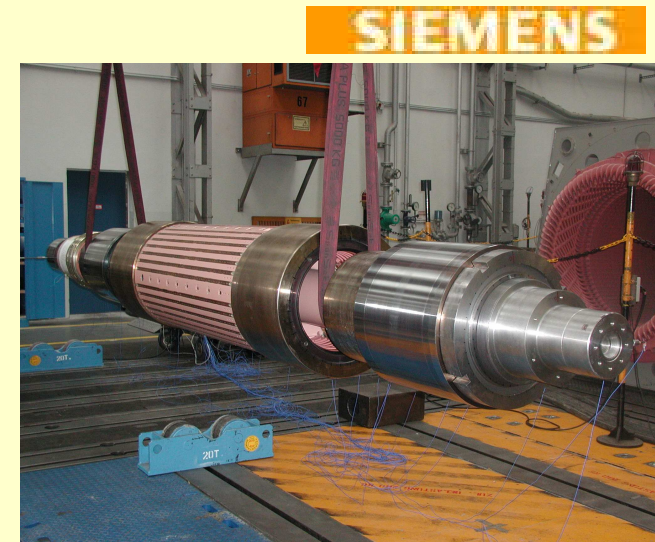
Windkraftwerke



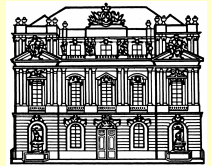
3. FIELAX GmbH
(Windkraftwerke; Fokus:
Schwingungsüberwachung,
Rotorunwuchten)

1. Rolls Royce Germany
und Derby
(Triebwerke; Fokus:
Rekonstruktion von
Punktunwuchten)

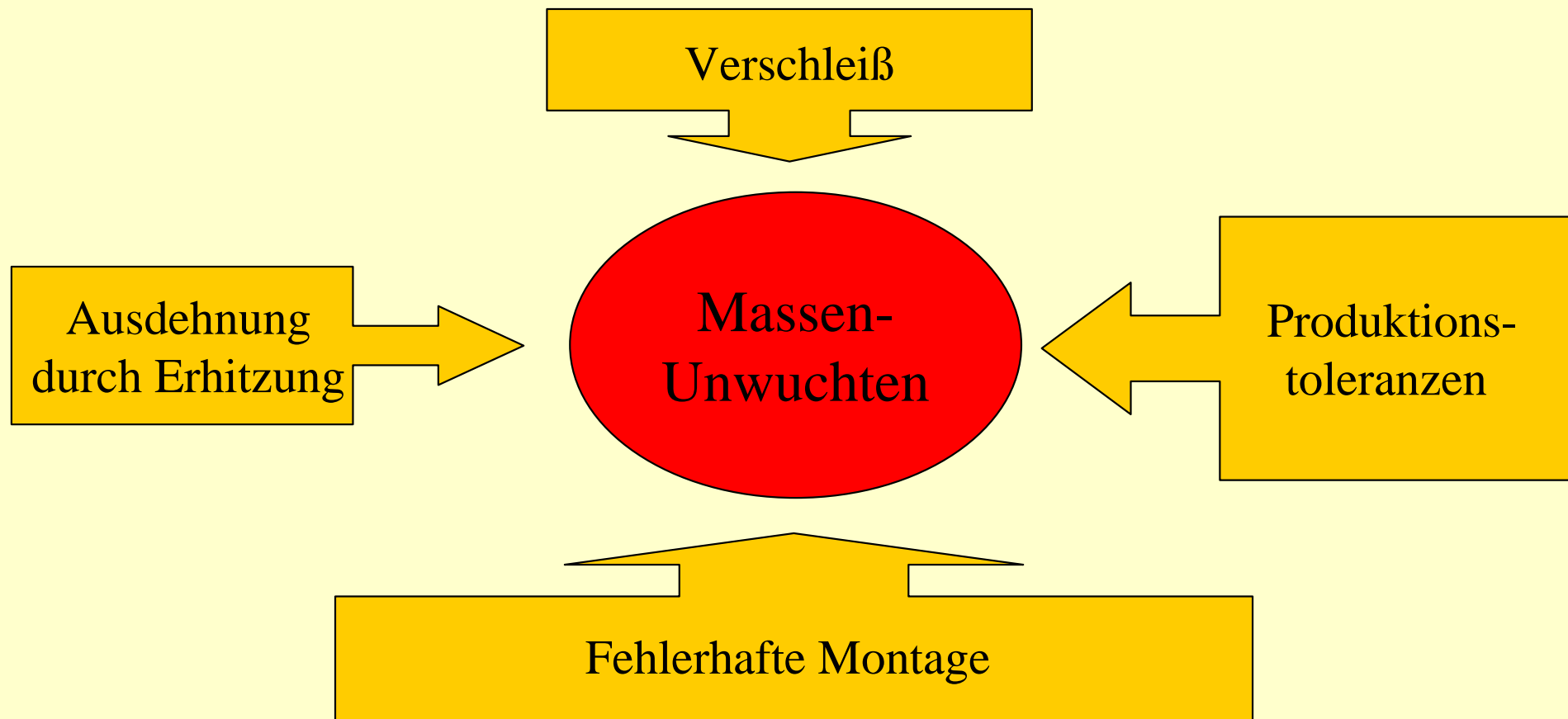
2. Siemens AG
Berlin
(Generatoren; Fokus:
Auswuchten, Modell -
Update)

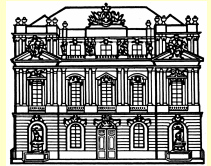


Generators

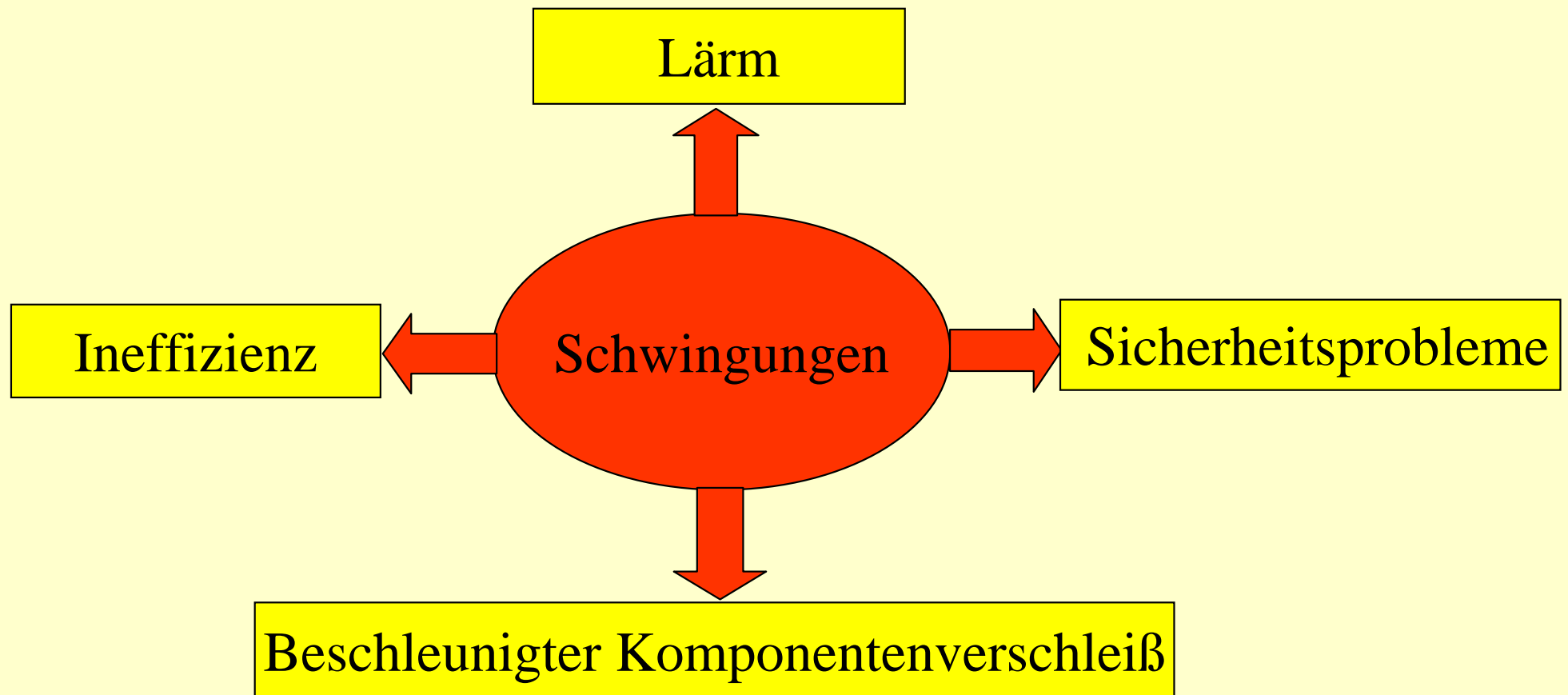


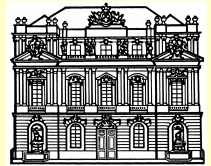
Unwuchtursachen:



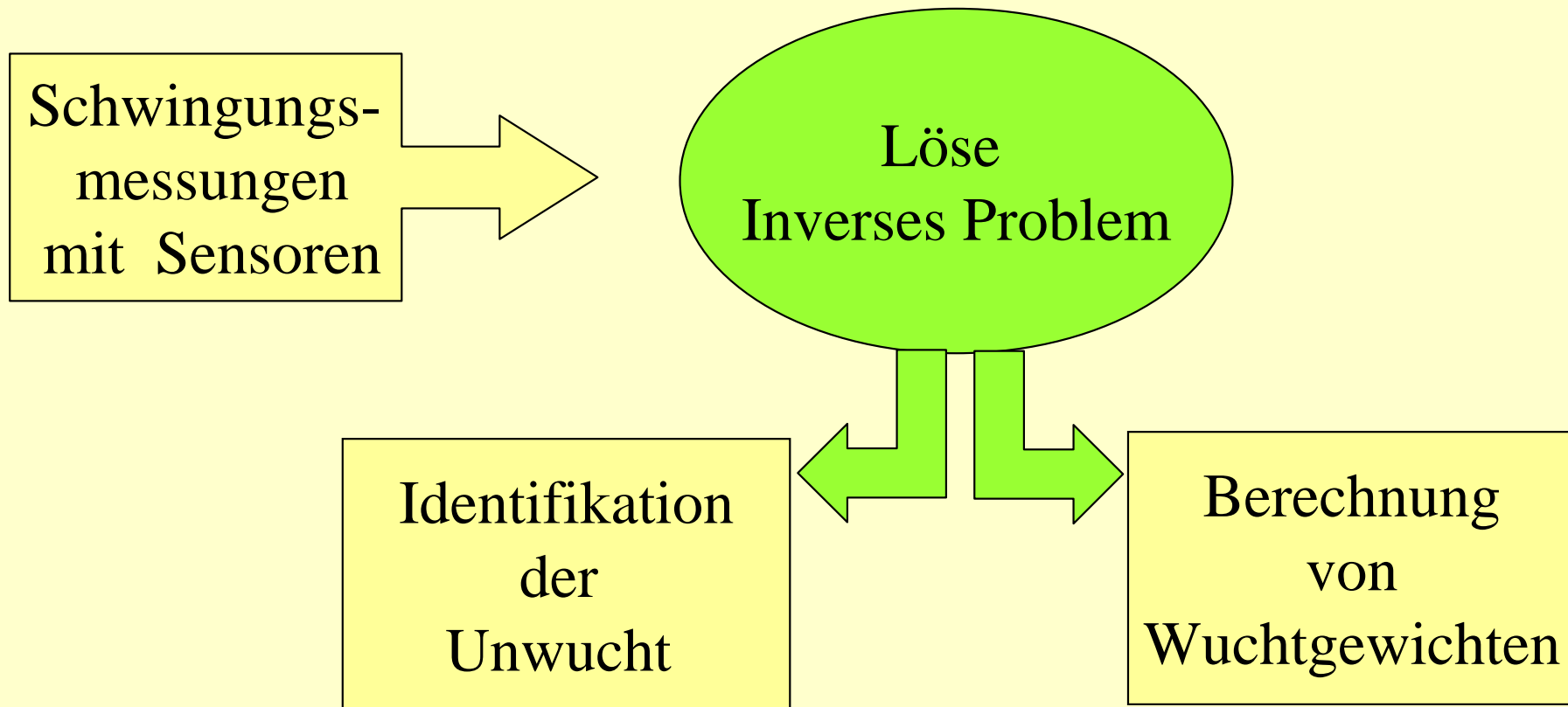


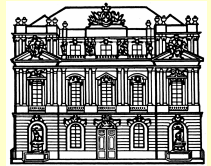
Unwuchtbedingte Folgen:





Aufgabe: Unwuchtbestimmung

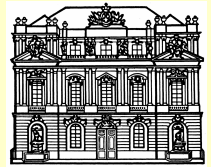




2. Modellierung der Unwucht und Inversion

- Definition möglicher Unwuchtursachen
 - Disks im Hochdruckteil der Turbine
 - Knick oder Versatz in der Kupplung
 - Flügel einer Windmühle
- Modellierung der unwuchterzeugten Schwingungen

$$Mu''(t) + D(u)u'(t) + Su(t) = \Omega^2 Pf(t)$$



Lösungsansatz:

$$u(t) = ue^{-i\Omega T}$$

$$f(t) = fe^{-i\Omega T}$$

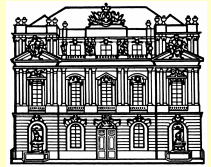
$$\implies u = (-\Omega^2 M + i\Omega D(u) + S)^{-1} \Omega^2 P f$$

Inverses Problem: Löse

$$Af = g$$

$$g = u|_{Sensor} = Qu$$

$$A = Q(-M + i\Omega^{-1}D(u) + \Omega^{-2}S)^{-1}P$$



3. Auswuchten von Flugzeugturbinen

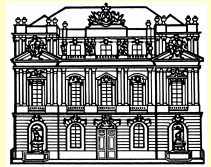
- Kooperation mit Rolls Royce Germany/Derby
- mit J. Niebsch, I. Menz, V. Dicken, R. R.
- insbesondere Einzelunwuchten (Schaufelflug) nicht detektierbar
- Ziele: Erhöhung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer, Lärmreduktion



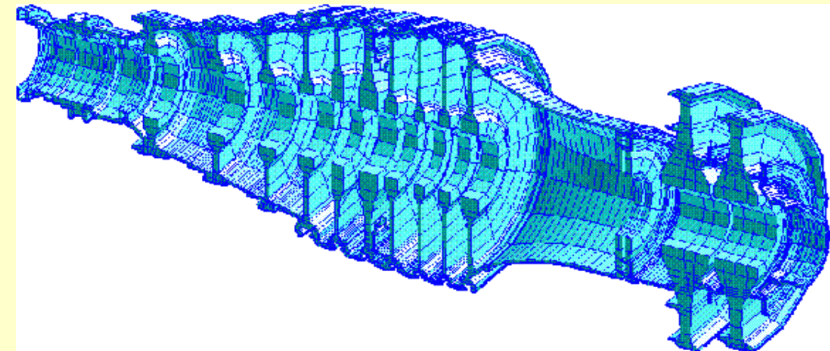
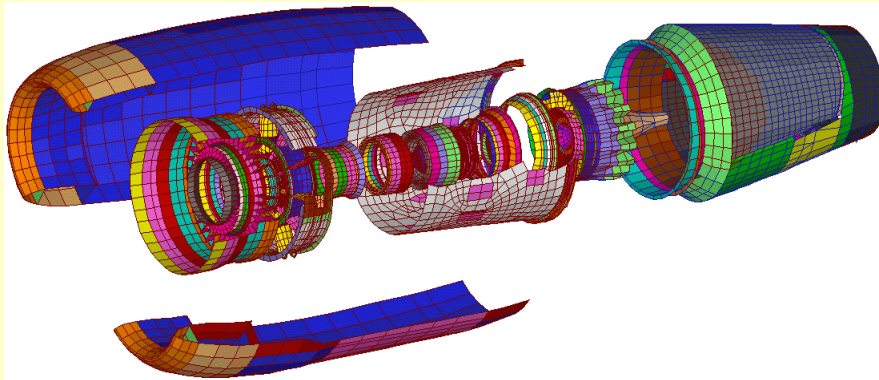
•Auswuchtprozess:

- Trial and Error
- 3 Ingenieure, 10 Techniker
- Dauer: 3 – 7 Tage
- Kosten \approx 25.000 €



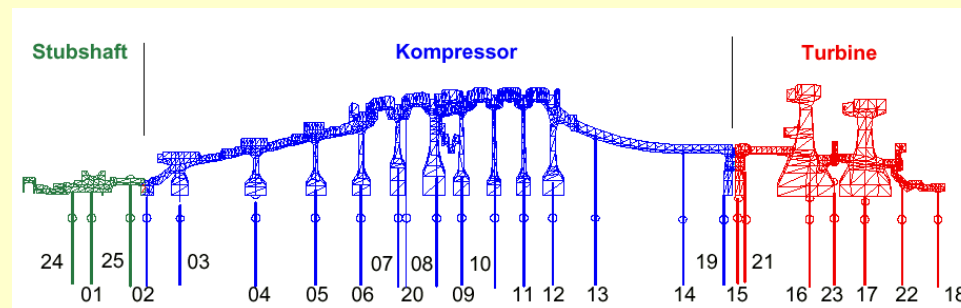


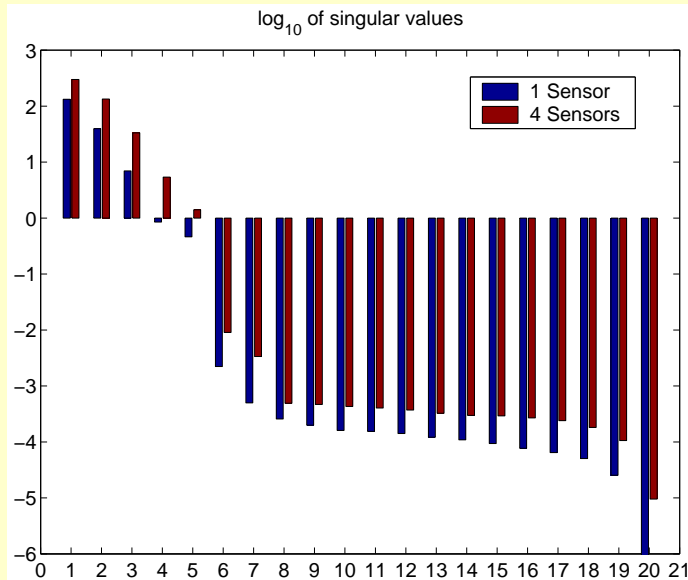
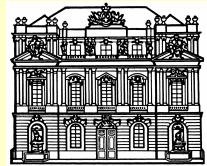
Lineares NASTRAN - Modell



Whole Engine Finite Elemente Structure, 450.000 Freiheitsgrade, HP – Rotor

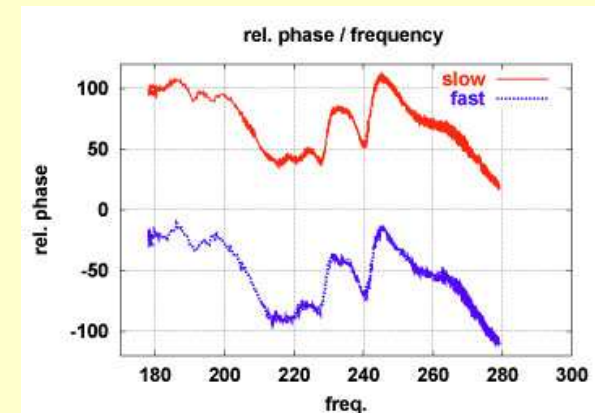
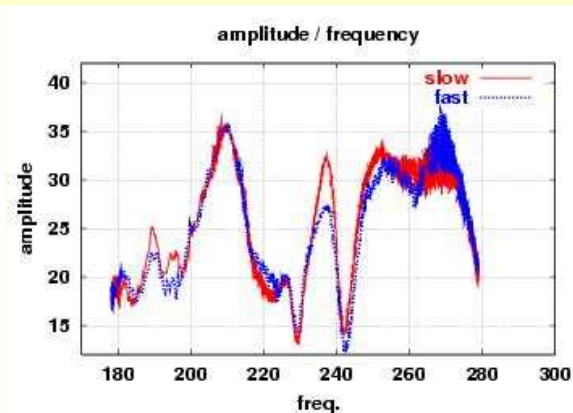
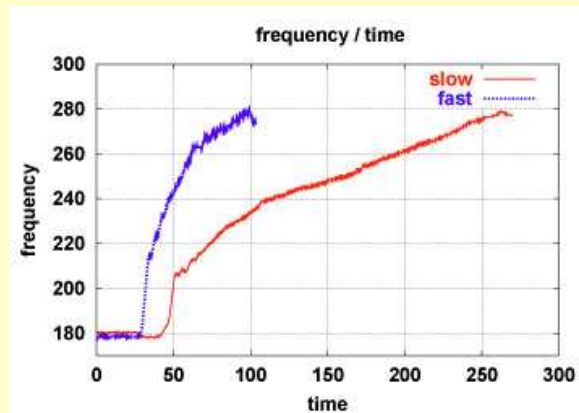
Einschränkung auf wenige mögliche Unwuchtpositionen $f = (f_l)_{l=1}^N \in \mathbb{C}^N$



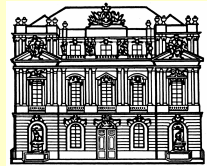


SVZ der mit NASTRAN erzeugten Systemmatrix A zur Lösung von

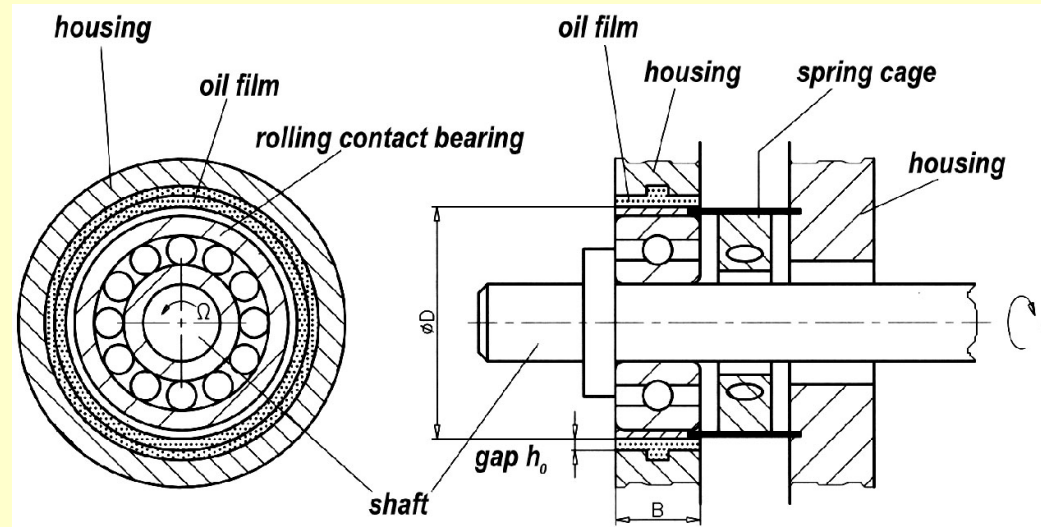
$$Af = g$$



$$g(\Omega) = a(\Omega) \exp(-ip(\Omega))$$

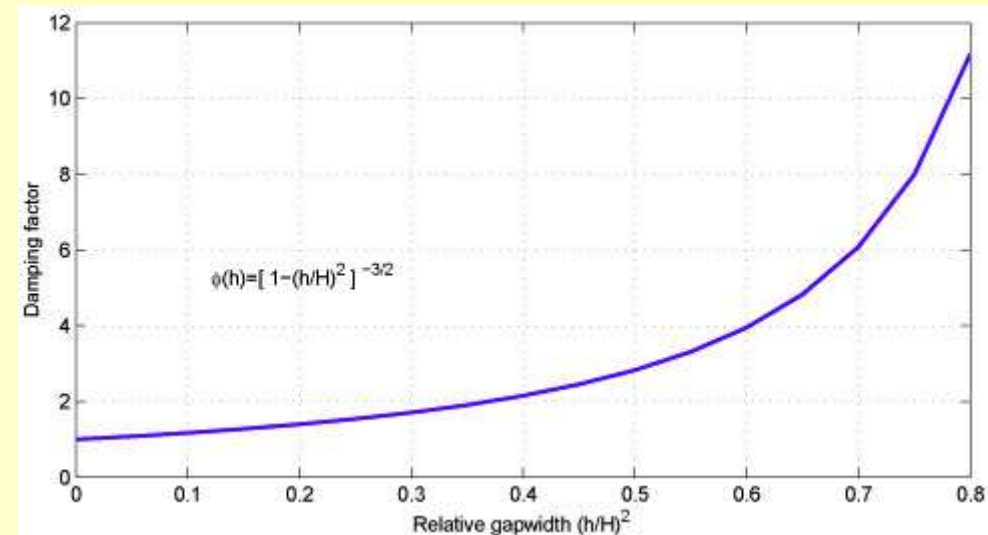


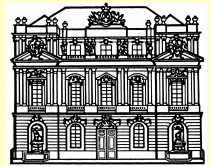
Quetschdämpfer – nichtlineare Dämpfungselemente



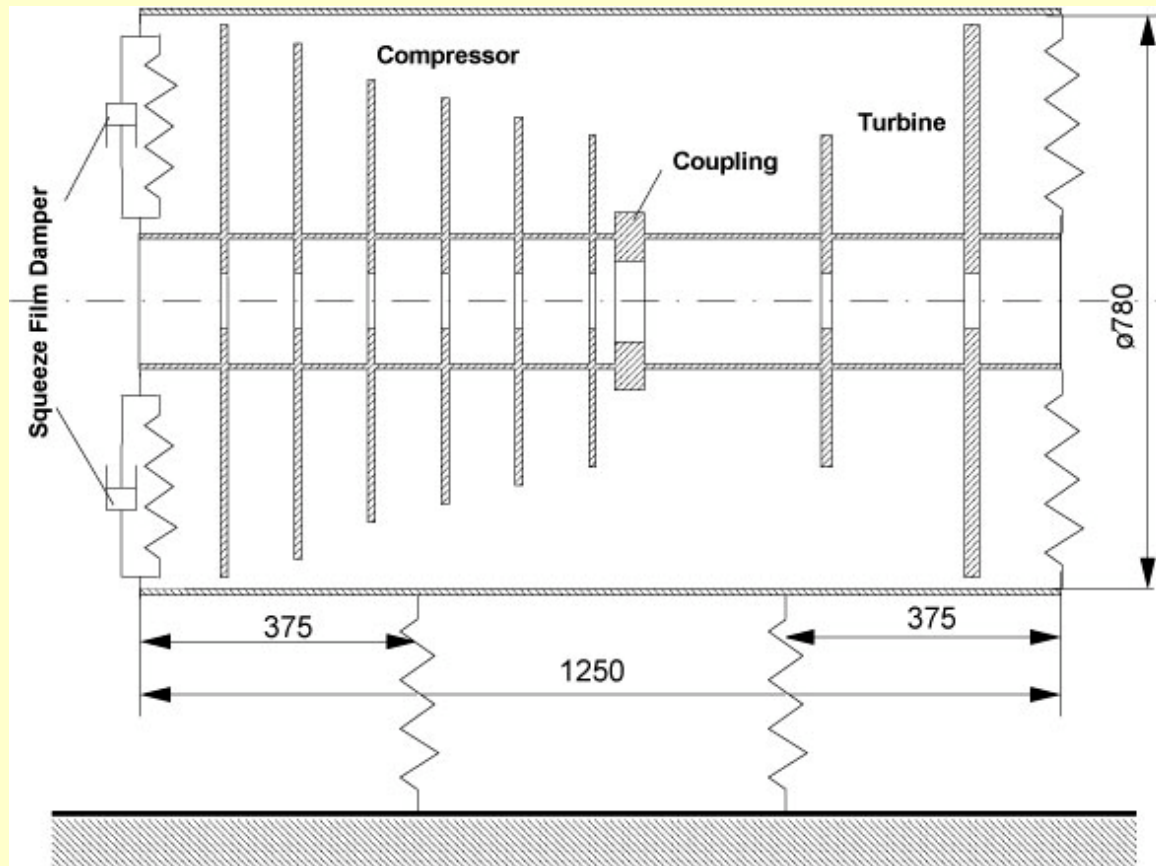
Dämpfungsfunktion

$$\varphi(h) = \left(1 - \frac{h^2}{H^2}\right)^{3/2}$$

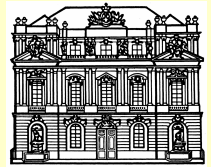




Ein nichtlineares Turbinenmodell



- 10 Unwuchtpositionen (8 Scheiben, 2 Kupplung)
- 5 Sensoren
- 60 Frequenzen, Schrittweite 5 Hz
- 1 Quetschöldämpfer



Beschreibende Differentialgleichung:

$$Mu'' + D(u)u' + Su = \Omega^2 Pf$$

$$D(u) = D_0 + D_1 \varphi(|h(u)|^2)$$

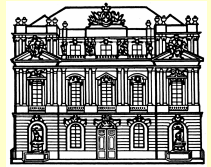
$$h(u) = u_{in} - u_{out}$$

u_{in} , u_{out} - Freiheitsgrade von Welle und Gehäuse
an Position des Dämpfers

(Komplexe) Lösung berechenbar über

$$u = \left(-M + \Omega^{-2}S + i\Omega^{-1}(D_0 + \varphi(|h|^2)) \right)^{-1} Pf$$

$$u(t) = u^c \cos(\Omega t) + iu^s \sin(\Omega t)$$



Vorwärtsproblem:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{g}(\Omega) \\ \mathbf{h}(\Omega) \end{pmatrix} = \underbrace{A_{\Omega}(\varphi(|\mathbf{h}|^2))}_{\text{von } h \text{ abhängige Matrix}} \mathbf{f}_r = \begin{pmatrix} \Pi_{\mathbf{g}} A_{\Omega}(\varphi(|\mathbf{h}|^2)) \\ \Pi_{\mathbf{h}} A_{\Omega}(\varphi(|\mathbf{h}|^2)) \end{pmatrix} \mathbf{f}_r$$

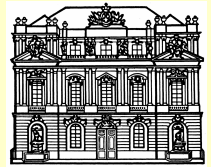
von h abhängige Matrix

Löse zunächst

$$\mathbf{h}(\Omega) = \Pi_{\mathbf{h}} A_{\Omega}(\varphi(|\mathbf{h}|^2)) \mathbf{f}$$

Dann berechne

$$\mathbf{g}(\Omega)$$

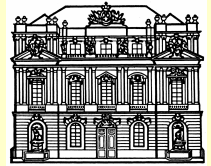


Inverses Problem:

- Löse $g^\varepsilon \approx Af$ für gegebene verrauschte Daten g^ε
- Benutze Tikhonov Regularisierung:

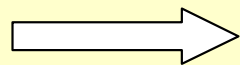
$$J_\alpha(f) = \|g^\varepsilon - Af\|^2 + \alpha\|f - \bar{f}\|^2$$
$$f_\alpha^\varepsilon = \arg \min_f J_\alpha(f)$$

a) Linearer Fall: $f_\alpha^\varepsilon = (A^*A + \alpha I)^{-1}(A^*g^\varepsilon + \alpha\bar{f})$



Nichtlinearer Fall:

- Frechet – Ableitung und Adjungierte
- Tikhonov – Funktional nicht mehr konvex



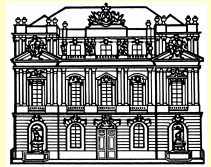
klassische Algorithmen können versagen

- Nutze global konvergente Methoden

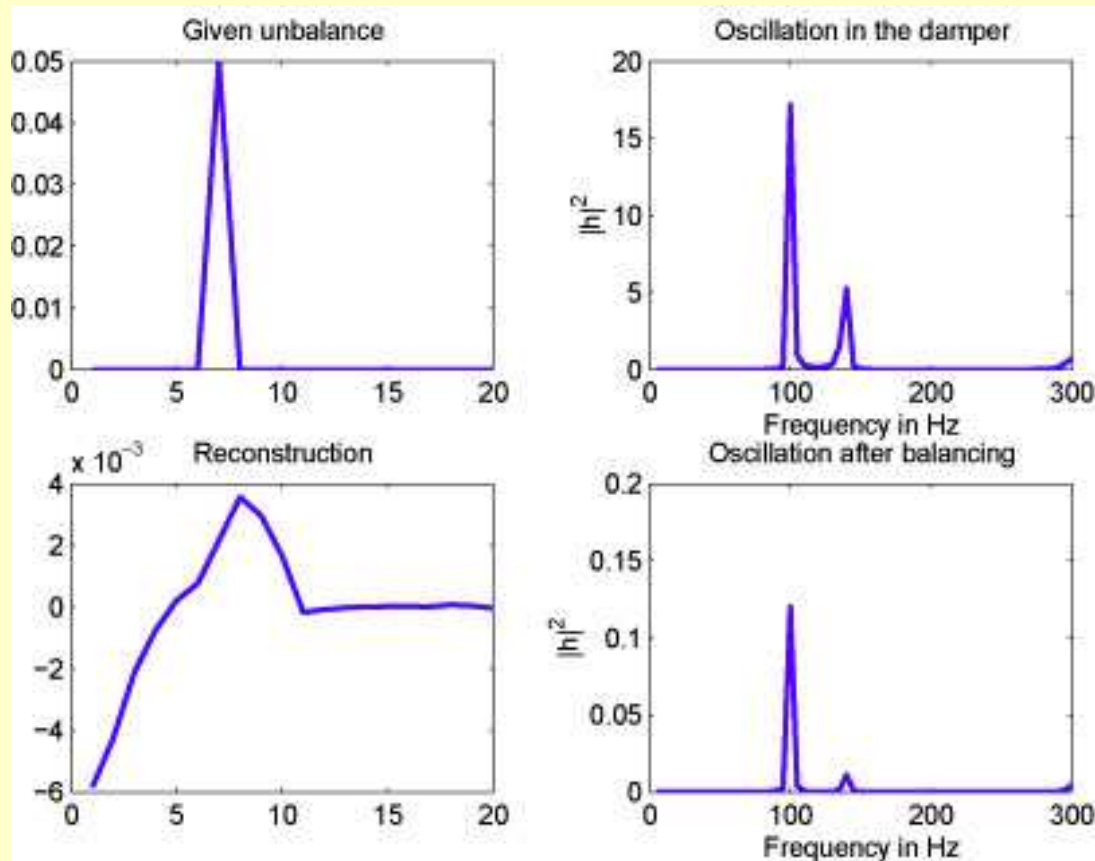
TIGRA, TIKFIX, Surrogate Functionals

(R. '02, '03, '05, R. & Teschke '05)

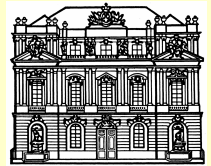
- Parameterwahlregel: Morozovsches Diskrepanzprinzip (R. '02)



Resultate: Tikhonov - Regularisierung

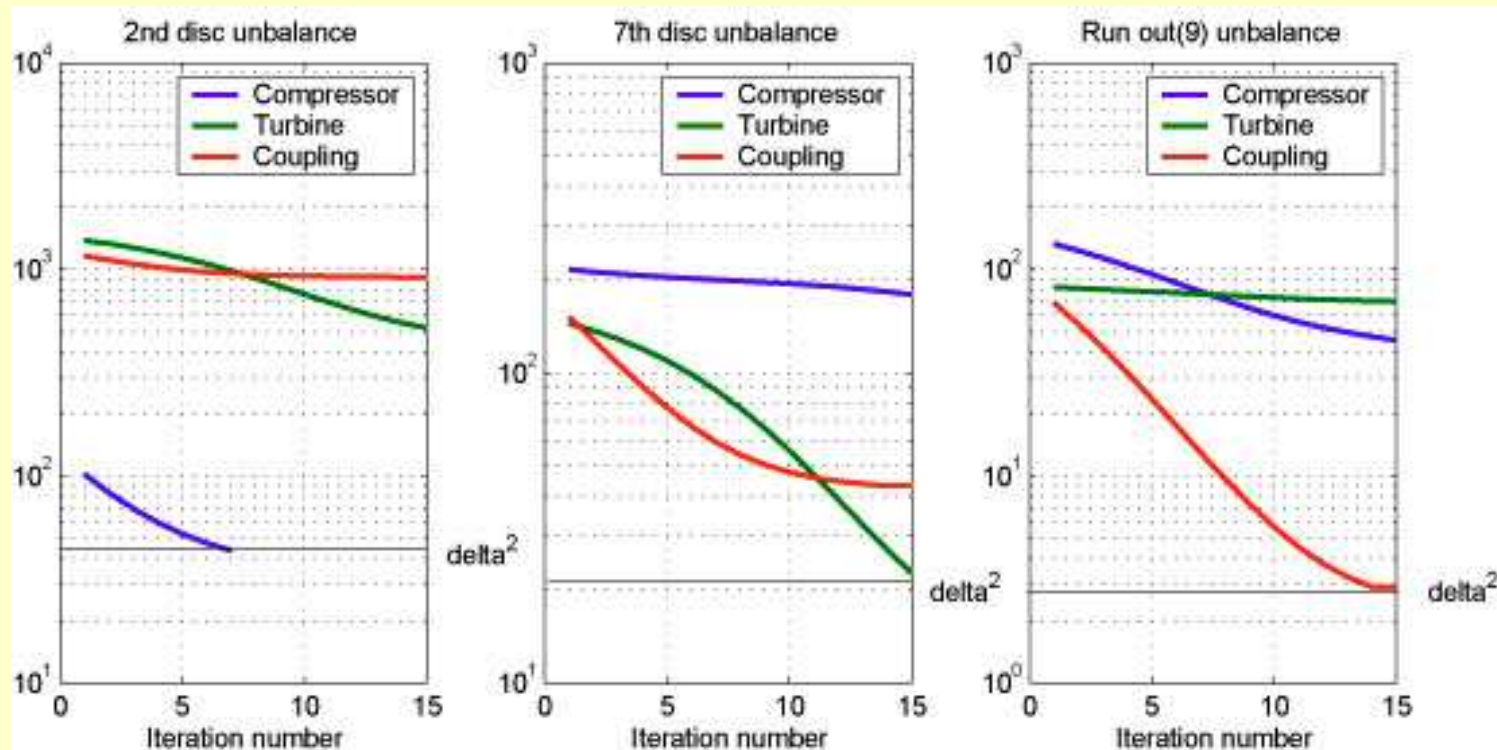


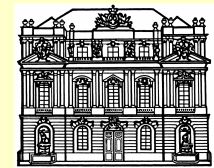
Rekonstruktion von
Punktunwuchten zu
stark verschmiert



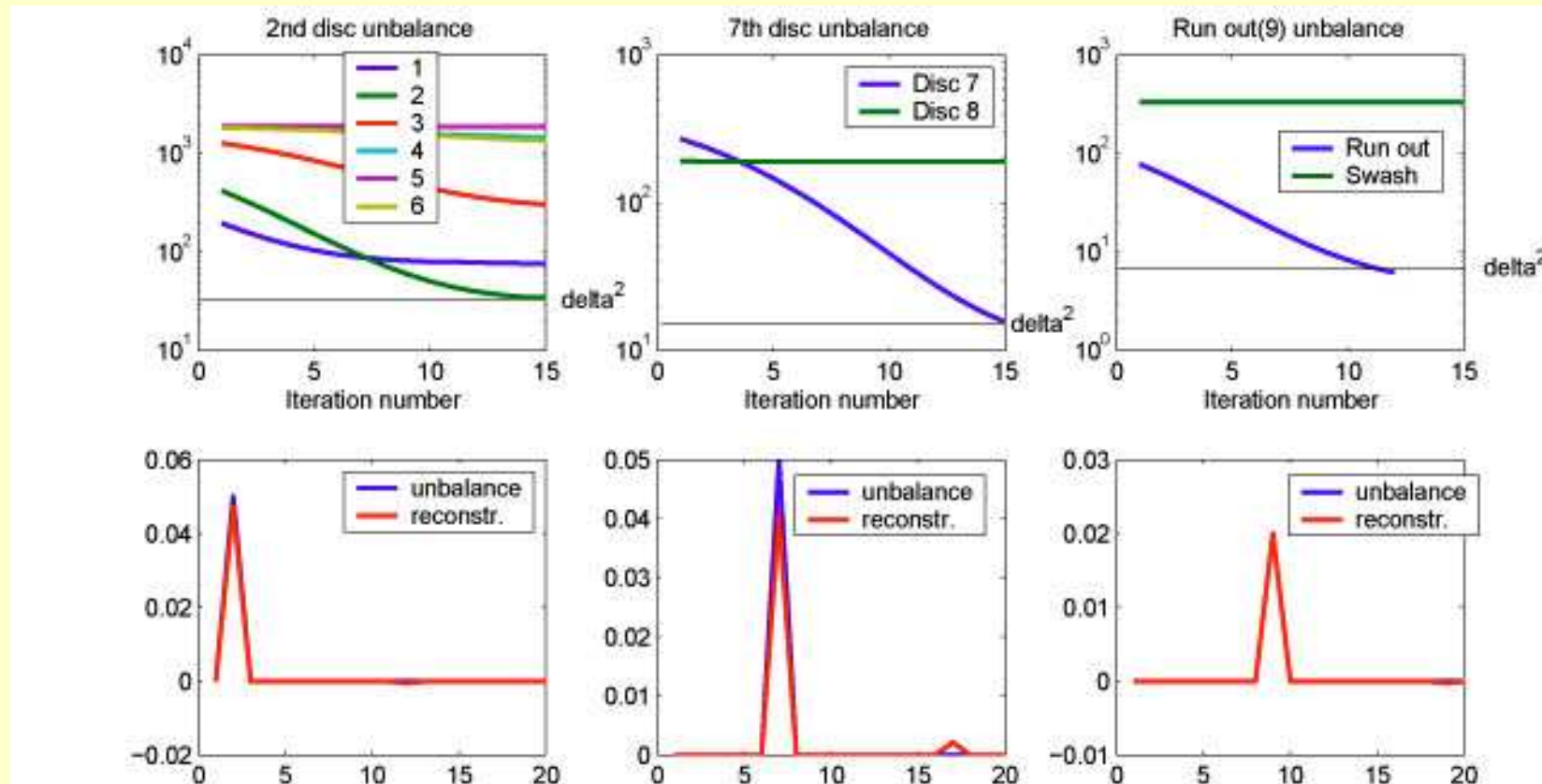
Lösung: Einschränkung des Operators A auf einzelne Maschinenkomponenten

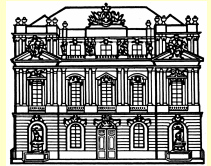
Wähle Komponente mit stark fallendem Residuum





Zweiter Schritt: Einschränkung von A auf Einzelunwuchten in der identifizierten Komponente

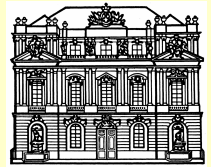




Literatur:

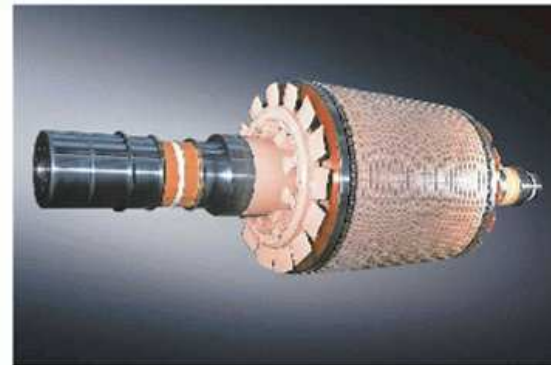
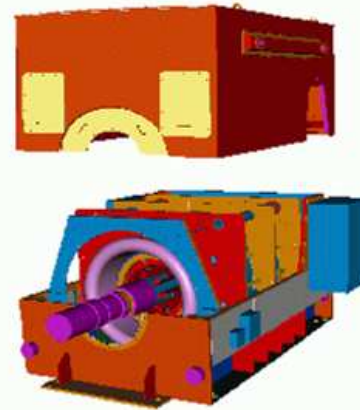
V. Dicken, P. Maass, R. Ramlau, A. Rienäcker and C. Streller:
Inverse Imbalance Reconstruction in Rotordynamics.
Erscheint in ZAMM.

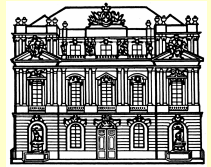
V. Dicken, I. Menz, P. Maass, J. Niebsch and R. Ramlau:
Inverse imbalance reconstruction for nonlinearly damped systems.
Inverse Problems in Science and Engineering , Vol. 13, No. 5 (2005), 507-543.



4. Modelloptimierung für Generatoren (Siemens AG Berlin)

K. Arning, J. Niebsch, R.





Projektphase A: Detektion von Unwuchten \longrightarrow siehe Rolls – Royce

Projektphase B: Modelloptimierung

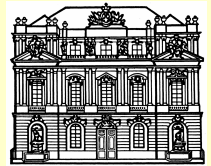
$$\left(-M(t) + i(G(t) + \frac{1}{\omega}D(t)) + \frac{1}{\omega^2}S(t) \right) g = f$$

$$A_{\omega}(t)g = f$$

$$S(t) = S_0 + \sum_{j=1}^{dim(t)} t_j \Delta S_j$$

Betrachte Operator

$$F_{\omega}(t) = Q A_{\omega}(t)^{-1}$$



- gegeben: reale (verrauschte)Messdaten $g^\delta(\omega)$
- Annahme: Modell realistisch
- gesucht: optimaler Parametersatz
- Problem instabil, nutze Tikhonov – Regularisierung: minimiere

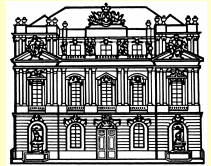
$$J_\alpha(t) = \|F(t) - g^\delta\|^2 + \alpha \|t - \bar{t}\|^2$$

- Minimierung sehr langsam, Stagnation
- Nutze Methode der Ersatzfunktionale: Betrachte

$$\tilde{J}_\alpha(t, a) = \|F(t) - g^\delta\|^2 + \alpha \|t - \bar{t}\|^2 + C \|t - a\|^2 - \|F(t) - F(a)\|^2$$

Daubechies, De Friese, DeMol '04 (Lineare Operatoren)

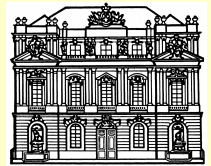
Ramlau, Teschke '05 (nichtlineare Operatoren)



Eigenschaften von $\tilde{J}_\alpha(t, a)$:

- strikt konvex
- eindeutig bestimmter globaler Minimierer
- Minimierer einfach und schnell über Fixpunktiteration berechenbar:

$$t_{k+1} = \Phi_\alpha(t_k, a)$$
$$\Phi_\alpha(t, a) = \frac{1}{C + \alpha} (F'(t)^* (g^\delta - F(a)) + \alpha \bar{t} + Ca)$$



Berechnung des Minimierers des Tikhonov – Funktionals:

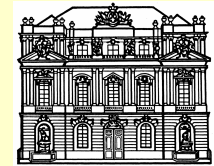
$$t_0 = \bar{t}$$

For $k = 0, 1, \dots$

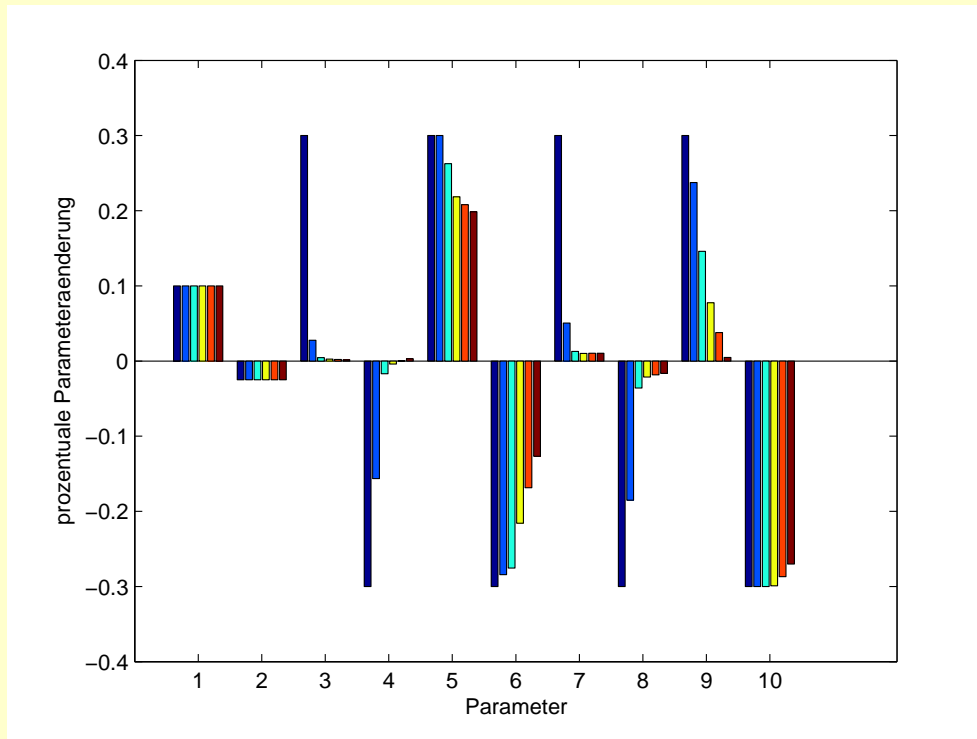
$$t_{k+1} = \arg \min_t \Phi_\alpha(t, t_k)$$

End

- es gilt $t_k \rightarrow t_*$
- t_* ist kritischer Punkt des Tikhonov – Funktionals
- zusätzliche Bedingungen an $F \implies t_* = t_\alpha^\delta$

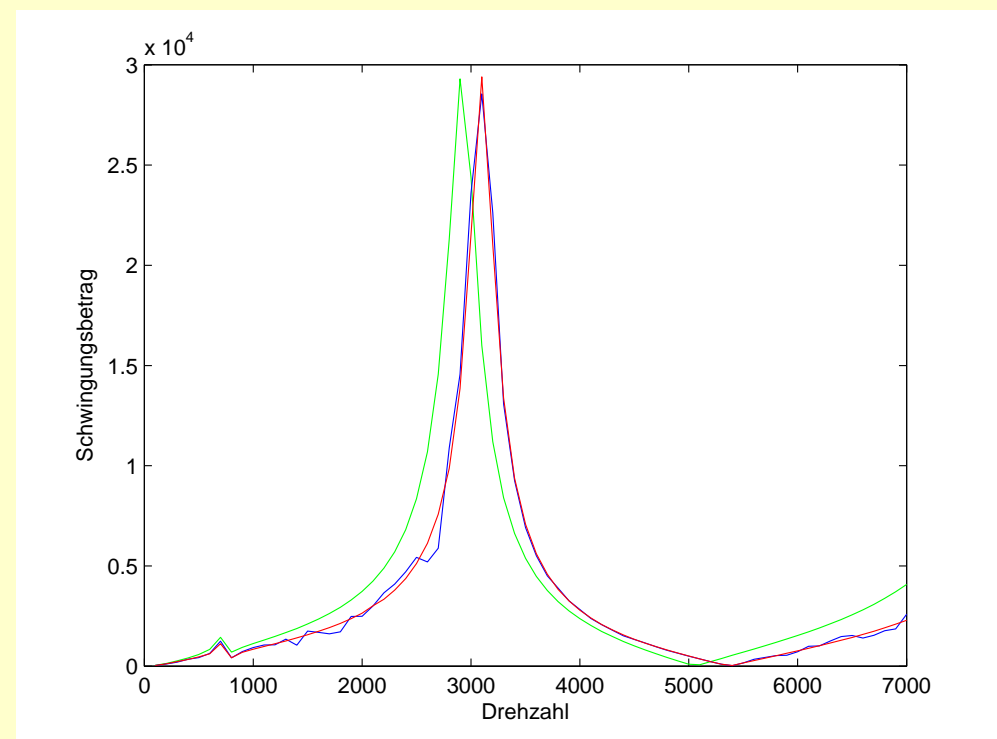


Parameterrekonstruktionen:



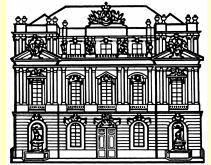
rekonstruierte Parameter

Rauschlevel 8,16,24,32,40 %



Systemschwingungen

(8% Noise)

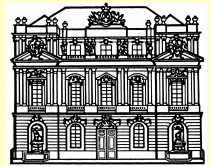


5. Condition Monitoring für Windkraftanlagen

Mit J. Niebsch, Kooperation mit Fielax GmbH

Problem

- inhomogene Massenverteilung der Rotorflügel
- Ursachen: Fertigungsungenauigkeiten (Flügel, Nabe), Wassereinlagerung, Eisanlagerung
- Wirkung: Schwingungen des Turmes, permanente Krafteinwirkung, Belastung auch des Triebstranges

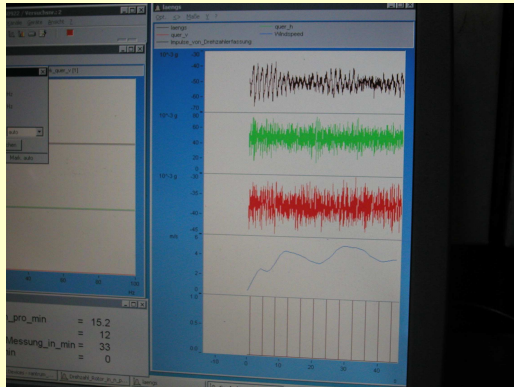
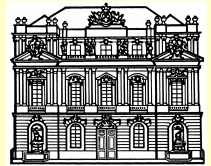


Lösung

- Massenunwucht aus Schwingungen bestimmen
- Setzen von Ausgleichsgewichten in den Flügeln

Nachteil

- Aufwändiger Messprozess vor Ort
- Kostenintensiv

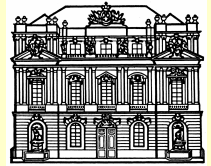


Auswuchten mit Testgewichten:

- Schwingungsmessung bei vorgegebener Drehzahl
- Schwingungsmessung mit bekanntem Testgewicht
- Bestimmung der Unwucht aus Differenz der Messungen

Aufwand: ca. ½ Tag pro Anlage



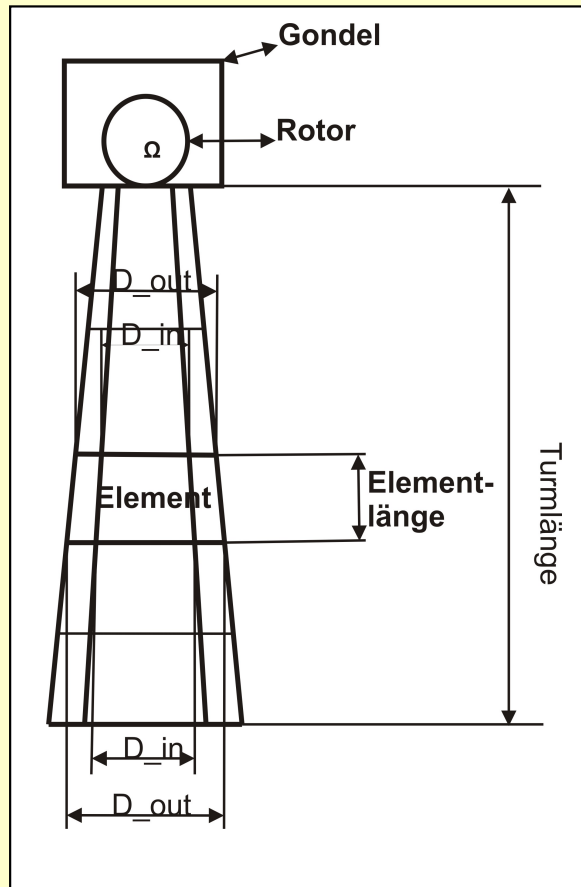
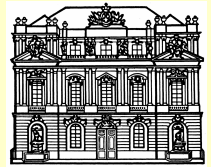


Idee

- Nutze neue mathematische Methoden, um Unwuchten aus einer Schwingungsmessung zu berechnen

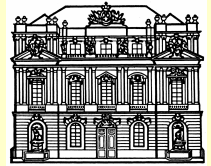
Vorteil

- Unwuchtbestimmung kann in ein Condition-Monitoring-System integriert werden und zu beliebigem Zeitpunkt erfolgen
- Ausgleichsgewichte werden berechnet, Auswuchtung kann bei Routinewartung erfolgen
- Erhebliche Kosteneinsparungen, sichere Unwuchtüberwachung



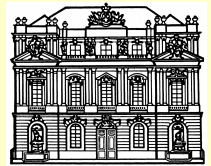
Erforderliche Mühlenparameter:

- Geometrie des Turmes (Länge, Segmentierung, Turmdicke)
- Materialparameter (Dichte, Elastizitätsmodul)
- Gondelmasse, Rotormasse
- ggf. Dämpfungsparameter

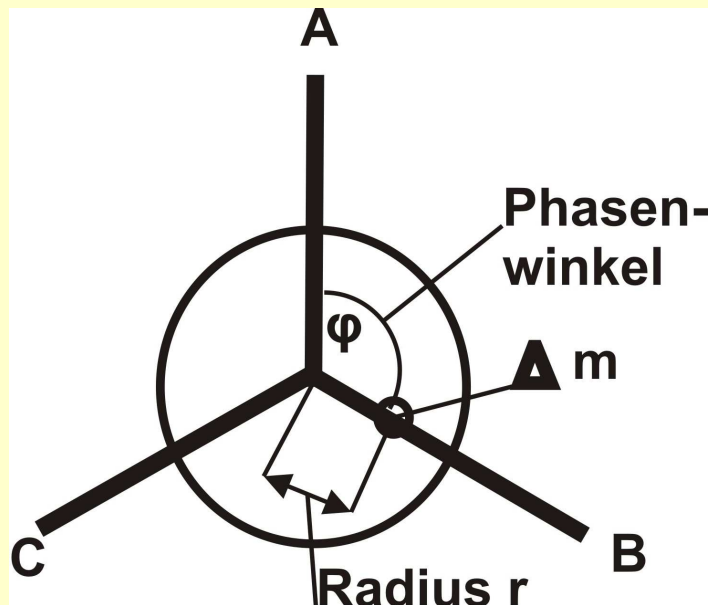


Modellierung

- Turm als Biegebalken
- Gondel als Punktmasse
- Rotor als mit Frequenz ω rotierende Punktmasse
- Zerlegung des Turmes in Finite Elemente
- Aufstellen von Masse- und Steifigkeitsmatrix M und S



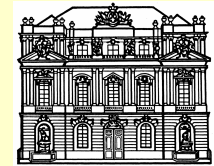
Zusammenhang von Unwucht und Turmschwingung



Unwucht

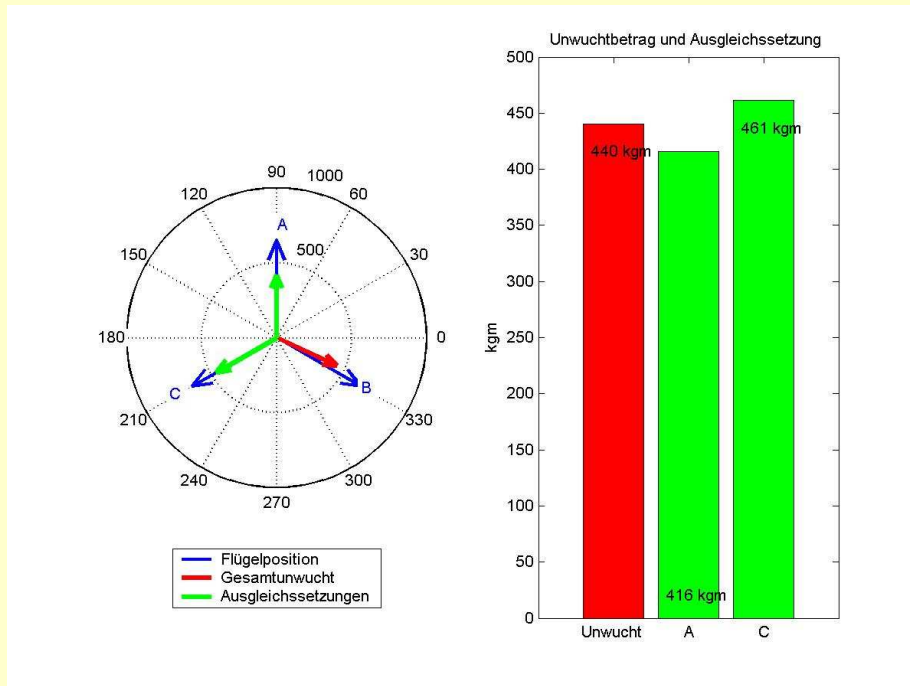
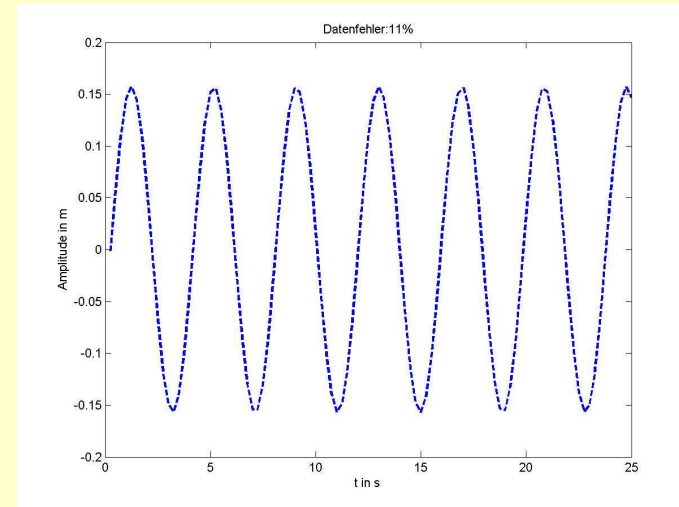
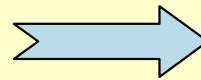
- entspricht exzentrischer Masse $\Delta m \cdot r$
- Winkel zur Nullmarke sei φ
- läuft zeitlich periodisch mit Frequenz ω um
- erzeugt Last

$$p(t) = \Delta m \cdot r \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

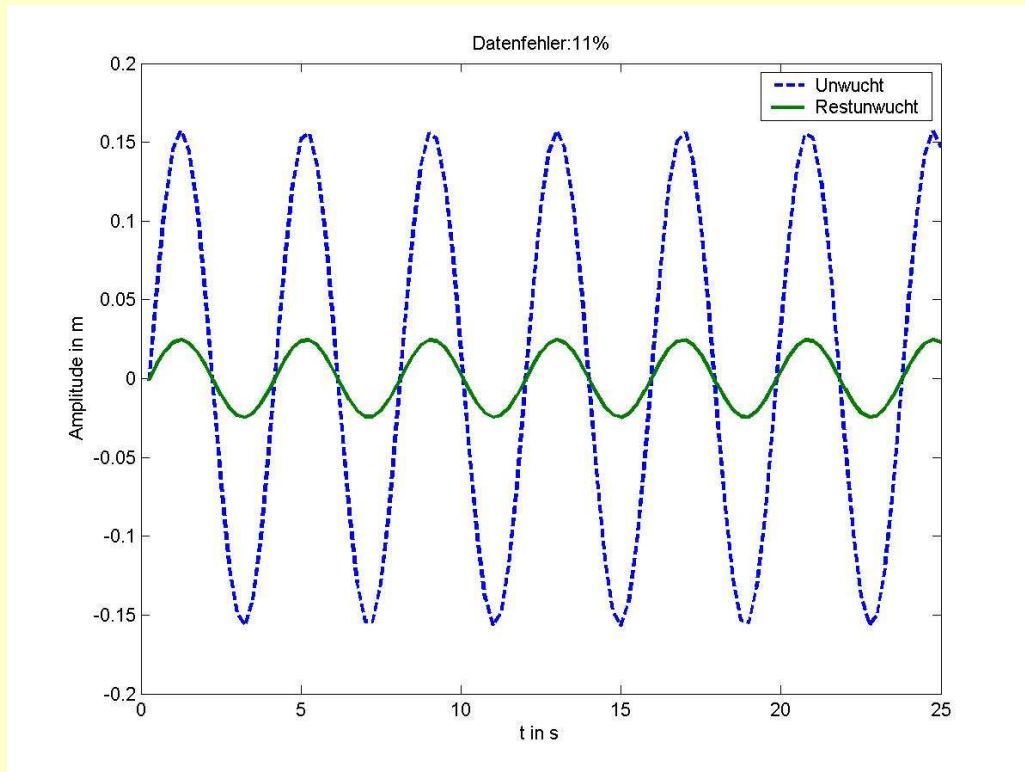
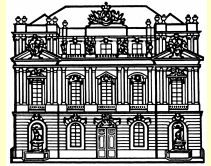


Beispiel

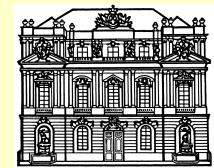
Unwucht von 500 kgm auf Flügel B erzeugt Schwingungen



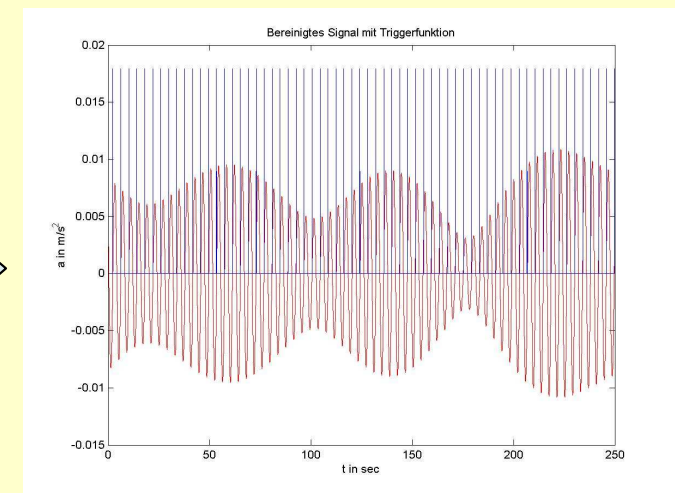
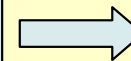
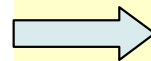
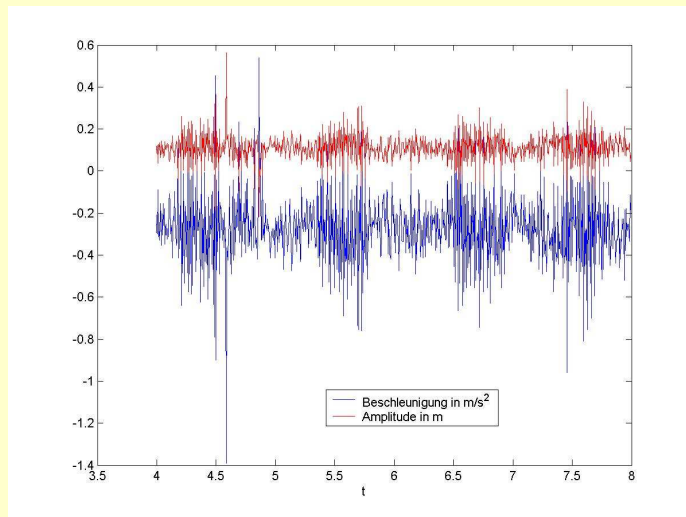
Rekonstruierte
Unwucht und
Ausgleichssetzung



- Schwingungen vor und nach der Ausgleichsetzung
- Rauschniveau ca. 11 %
- 1. Turmeigenfrequenz 0.256 Hz
- Rotorfrequenz 0.25 Hz

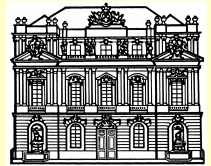


Rekonstruktionen mit realen Daten



Rohdaten (Ausschnitt)

Aufbereitete Daten



Ausblick

- Die Erstellung der Modell sollte automatisch erfolgen.
- Durch Messungen zu zwei verschiedenen Umdrehungszahlen ist festzustellen, ob auch aerodynamische Unwuchten vorliegen.
- Modellbasierte Berechnungen können auch in anderen Bereichen angewandt werden, z.B. die Simulation von Wellenschlag bei Offshore-Anlagen
- Weiteres Arbeitsgebiet im Projekt e.m.i.t. ist die Untersuchung und Früherkennung von Getriebeschäden mit Hilfe von Wavelets.
- Modelle müssen eventuell optimiert werden, z.B. bez. der ersten Turmeigenfrequenz.