

Statische und dynamische Auslegung eines Turbosatzfundamentes

Michael Geis,

Zerna, Köpper & Partner, Ingenieurgesellschaft für Bautechnik, Bochum

Zusammenfassung:

Bei der Auslegung von Maschinenfundamenten, insbesondere solchen für Turbosatzgruppen (Turbinen + Generator), sind sowohl statische als auch verschiedene dynamische Einwirkungen zu berücksichtigen. Dazu gehören neben den bei allen rotierenden Maschinen auftretenden Kräften aus Betriebsunwuchten Störfälle wie Turbinen-Schaufelbruch oder Generator-Kurzschluss. Für die Dimensionierung des Fundamentes sind vielfach Nachweise der Verformungsbeschränkung (statische Lagerverschiebungen, Schwingwegamplituden aus Unwuchten) maßgeblich. Die Vorgehensweise wird am Beispiel eines Dampfturbinenfundamentes beschrieben.

1 EINLEITUNG

1.1 Kraftwerke

Die Abbildung zeigt den Aufbau eines modernen Großkraftwerkes. Durch Verbrennung der Kohle im Dampferzeuger wird die im Brennstoff chemisch gebundene Energie in Wärmeenergie umgewandelt. Diese Energie wird genutzt, um Wasser bei hohem Druck und hohen Temperaturen zu verdampfen. Der Wasserdampf treibt eine Turbine an. Im angekoppelten Generator wird die Rotationsenergie der Turbinenwelle in elektrische Energie umgewandelt.

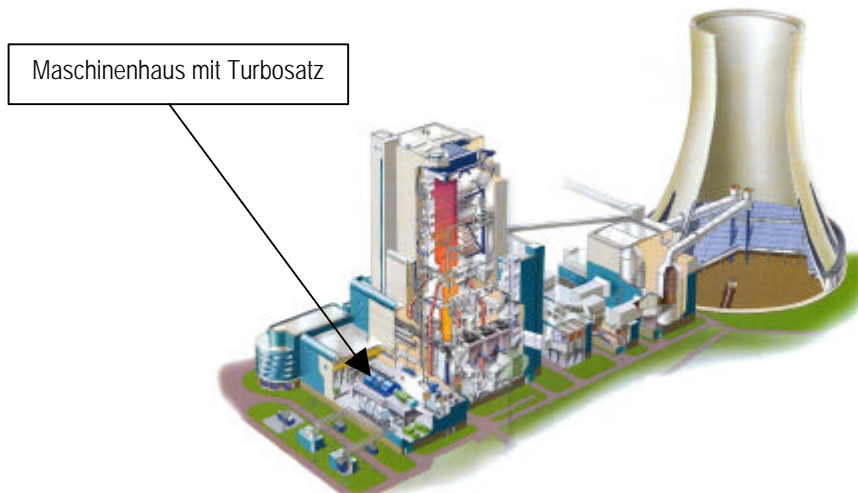


Abbildung 1: Fossil befeuertes Großkraftwerk

Die Bruttoleistung moderner Kraftwerksblöcke liegt heute bei über 1.100 MW, wie z. B. beim derzeit im Bau befindlichen Braunkohlekraftwerk in Grevenbroich-Neurath. Neben Kohle-Kraftwerken werden zunehmend Gas- bzw. Gas- und Dampfkraftwerke (GuD) mit Leistungen bis ca. 400 MW pro Wellenstrang errichtet.

1.2 Turbosatzfundamente

Der Generator und eine oder mehrere Turbinen werden im Regelfall auf einem gemeinsamen Fundament aufgestellt.

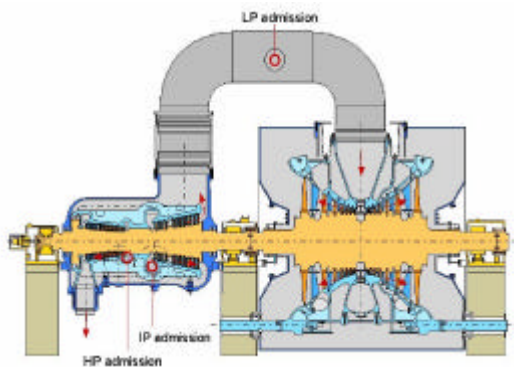


Abbildung 2: Turbine (Siemens)

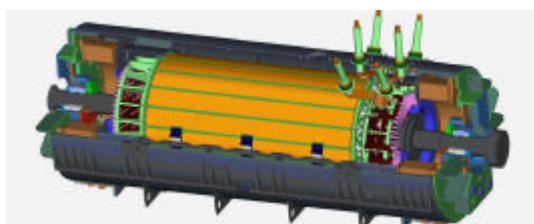


Abbildung 3: Generator (Siemens)

Turbosatzfundamente können in ebenerdig aufgestellte (Plattenfundamente) und hoch aufgestellte Fundamente (Tischfundamente) unterschieden werden. Bei größeren Turbinenleistungen kommen i. d. R. Tischfundamente zum Einsatz. Die „Tischplatte“ steht dabei auf Stützen, mit denen sie monolithisch oder über Federelemente verbunden ist. Federelemente, z. B. von GERB, führen zu einer Schwingungsisolierung und ermöglichen somit eine genauere Abstimmung des Schwingungsverhaltens.

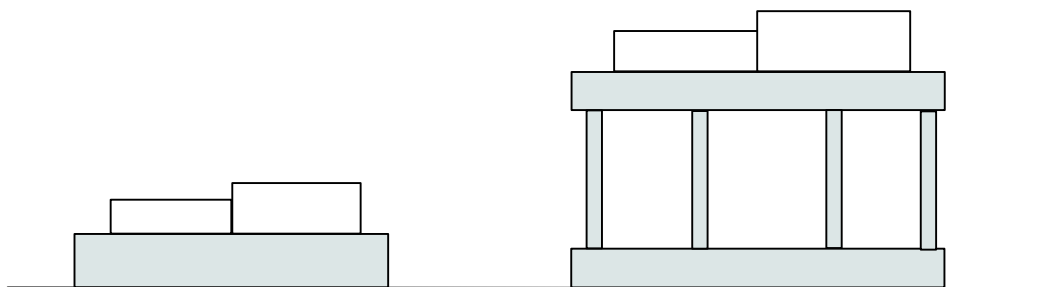


Abbildung 4: Plattenfundament und Tischfundament

GuD-Kraftwerke haben meist kleinere, ebenerdig aufgestellte Fundamente mit Flach- oder Pfahlgründung. Das Schwingungsverhalten wird dabei auch von den dynamischen Eigenschaften des Baugrundes bzw. der Pfähle beeinflusst.

Das hier beschriebene Dampfturbinenfundament gehört zum GuD-Kraftwerk Herdecke, das derzeit von Siemens für Mark-E errichtet wird. Von der Gesamtleistung von 400 MW entfallen ca. 140 MW auf die Dampfturbine.

1.3 Normen

Die Anforderungen an Maschinenfundamente werden in DIN 4024 geregelt. Teil 1 der Norm ist bei Maschinenfundamenten mit elastischen, Teil 2 bei starren Stützkonstruktionen anzuwenden. Die zugehörigen VDI-Richtlinien 2056 und 2060 wurden in den 1990ern Jahren zurückgezogen. Zur Beurteilung der auftretenden Schwingungen dient DIN ISO 10816 Teil 1 bis 4. Daneben sind bei der Fundamentauslegung im Allgemeinen spezielle Anforderungen des Maschinenherstellers zu beachten.

1.4 Einwirkungen

Neben den statischen und quasi-statischen Einwirkungen (Betriebskräfte) treten bei Turbosatzfundamenten verschiedene dynamische Belastungen auf. Zu nennen sind hier vor allem Unwuchtkräfte, die zu einer Schwingungsanregung des Fundamentes führen. Neben den unvermeidbaren Betriebsunwuchten sind dabei auch Störfälle wie Turbinenschaufelbruch oder Generatorkurzschluss zu beachten.

1.5 Auslegungskriterien

Das wesentliche Ziel der Fundamentauslegung ist neben dem Nachweis der Standsicherheit die Sicherstellung der für den Betrieb notwendigen dynamischen Eigenschaften. Eigenfrequenzen 1. Ordnung dürfen nicht in der Nähe der Betriebsfrequenzen liegen. Schwingungsamplituden müssen die in Normen und/oder Spezifikationen festgelegten Grenzwerte einhalten. Zu den Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit gehört außerdem, dass die Verschiebungen an den Lagerstellen der Maschinenwelle die vom Hersteller festgelegten Werte nicht überschreiten.

2 MODELLABBILDUNG

2.1 Fundament- und Maschinendaten

Das Dampfturbinenfundament des GuD-Kraftwerks Herdecke trägt den Generator, zwei Turbinen und den Kondensator. Es hat eine Länge von 26,1 m und eine Breite von 8,8 m bzw. 17,2 m. Die Dicke der Fundamentplatte im Turbinenbereich wurde als Ergebnis der Auslegungsberechnung zu 3,00 m festgelegt. Die Bettungssteifigkeit beträgt 40 MN/m^3 .

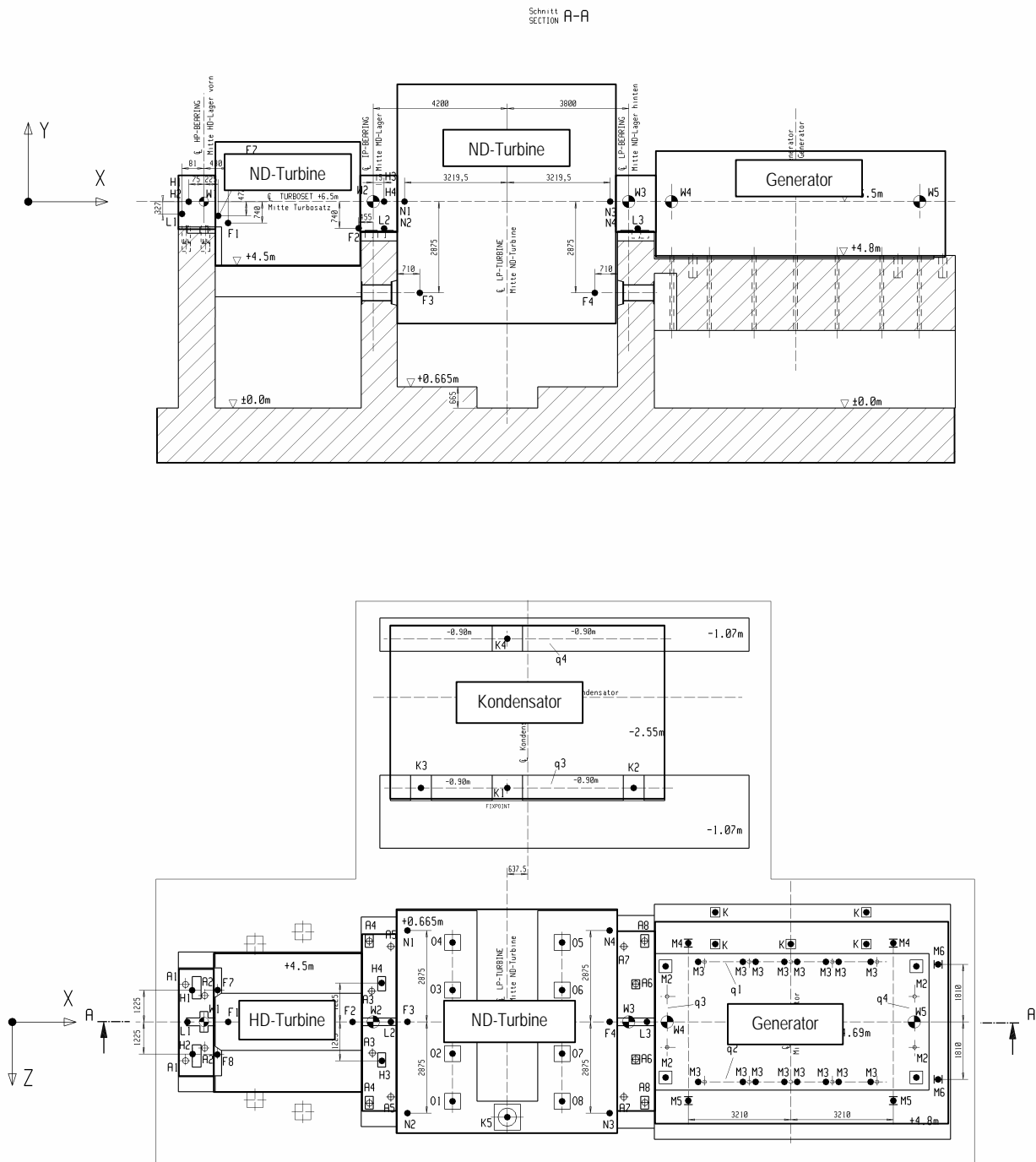


Abbildung 5: Fundament-Längsschnitt und Draufsicht (Siemens)

Die Masse des Fundamentes sollte erfahrungsgemäß mindestens die doppelte Masse der Maschinen haben. Hier beträgt der Faktor $G_{\text{Fund}}/G_{\text{Masch}} = 31.400\text{kN} / 14.400\text{kN} = 2,2$.

Auf eine dynamische Berechnung darf gem. DIN 4024-1 in der Regel verzichtet werden, wenn die rotierenden Massen kleiner sind als 1/100 der Gesamtmasse aus Maschine und Fundament. Hier beträgt die Rotormasse 170 t und damit ca. 4% der Gesamtmasse.

2.2 Rechenmodell

Die Berechnung erfolgt an einem elastisch gebetteten Schalenmodell (QUAD-Elemente). Die Elementknoten der Bodenplatte liegen in der Gründungsebene. Die Wellenachse von Generator und Turbinen liegt 6,50 m über der Oberkante der Sohlplatte. Die Aufstellung der Maschinen erfolgt auf Längs- und Querwänden, die teilweise über Riegel bzw. Platten miteinander verbunden sind. Die Maschinen werden im Rechenmodell durch Einzelmassen idealisiert, die über starre, masselose Balkenelemente mit dem Fundament verbunden sind. Für die Verbindung der Wände mit der Sohlplatte wurden kinematische Kopplungen verwendet.

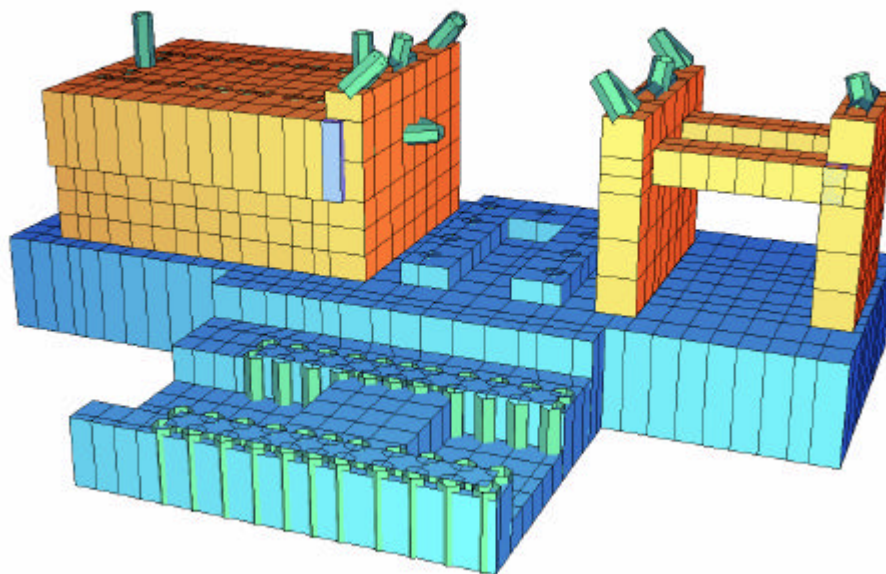


Abbildung 6: Elementnetz

3 BERECHNUNG

3.1 Eigenfrequenzen

Die Eigenfrequenzen und die zugehörigen Eigenformen sind mindestens bis zum 1,1-fachen der Betriebsfrequenz zu berechnen. Die Betriebsfrequenz f_m (Drehzahl) von Generator und Turbine entspricht hier der Netzfrequenz von 50 Hz.

Bei der Beurteilung des Schwingungsverhaltens wird zwischen den Eigenfrequenzen 1. Ordnung (überwiegend Starrkörperschwingungen) und denen höherer Ordnung (Strukturschwingungen) unterschieden. Die Eigenfrequenzen 1. Ordnung sind bei Turbosatzfundamenten meist deutlich kleiner als die Betriebsfrequenz. Hier liegen sie im Bereich von 4 – 11 Hz, so dass das Kriterium für eine Tiefabstimmung ($f_n = 0,80 f_m$) erfüllt wird. Jedoch liegen wie bei allen derartigen Fundamenten einige Eigenfrequenzen in der Nähe der Betriebsfrequenz ($f_m \pm 10\%$), d. h. im Bereich von 45 Hz bis 55 Hz. Eine Untersuchung des Schwingungsverhaltens ist daher erforderlich.

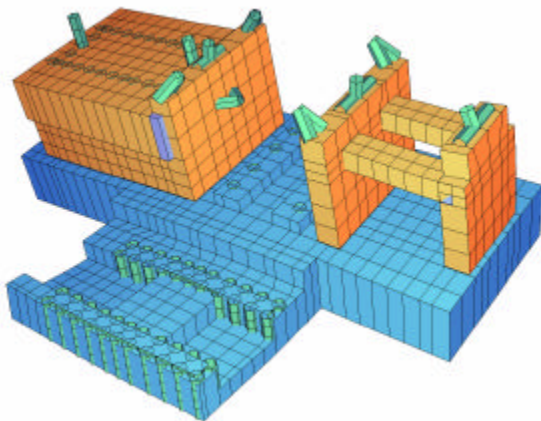


Abbildung 7: 2. Eigenform, $f = 5,5$ Hz

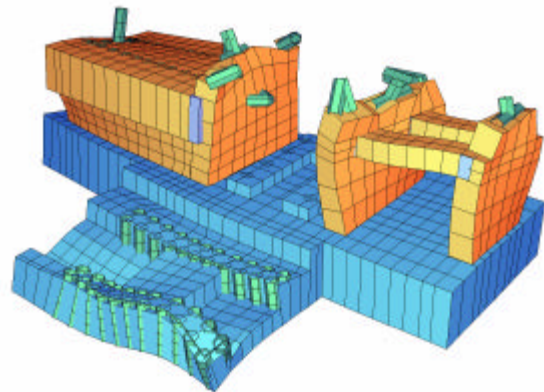


Abbildung 8: 30. Eigenform, $f = 51,9$ Hz

3.2 Unwuchtkräfte

Die dynamischen Lagerkräfte (Unwuchtkräfte) sind allgemein abhängig von der rotierenden Masse m_{rot} , der Wuchtgüte Q und der Drehzahl f_m bzw. Kreisfrequenz $\Omega = 2 \pi f_m$.

$$K = e * m_{rot} * \Omega^2 = e * \Omega * m_{rot} * 2\pi * f_m$$

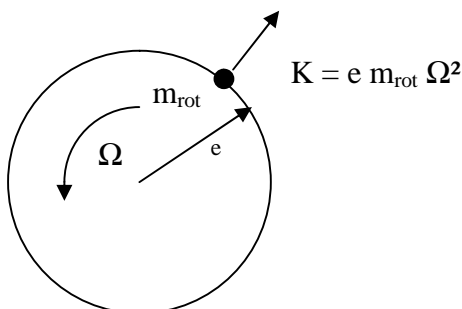


Abbildung 9: Unwuchtkraft K

Die Auswuchtgüte von Dampfturbinen und Generatoren kann, sofern keine genaueren Angaben vorliegen, entsprechend DIN 4024-1 der Gütestufe Q2,5 ($e \cdot \Omega = 2,5 \text{ mm/s}$) zugeordnet werden. Für die Bemessung ist im Betriebsfall die nächst höhere Gütestufe (6,3 mm/s) anzusetzen. Für den Störfall ist dieser Wert nochmals zu versechsfachen (38 mm/s).

Mit einem Rotorgewicht von $L = m_{\text{rot}} \cdot g = 1700 \text{ kN}$ ergibt sich die Störfall-Unwuchtgröße bei $f_m=50\text{Hz}$ damit zu

$$K = 1,2 \cdot L \cdot f_m / 50\text{Hz} \approx 2.000 \text{ kN}$$

3.3 Schwingwegamplituden

Die dynamischen Verschiebungs- und Kraftgrößen werden zunächst für eine stationäre Anregung in der Betriebsfrequenz $f_m = 50 \text{ Hz}$ ermittelt. Da eine phasenmäßige Zuordnung der umlaufenden Unwuchtkräfte nicht möglich ist, werden die Unwuchtkräfte nacheinander an den fünf Lagerstellen in Vertikal- und Horizontalrichtung angesetzt ($K_{1y}, K_{1z}, K_{2y}, K_{2z}, \dots$).

Die maßgeblichen, frequenzabhängigen Schwingwegamplituden an den Lagerstellen werden dann durch Überlagerung der Einzelergebnisse nach der SRSS- oder CQC-Methode ermittelt.

$$s_1 = \sqrt{\{s_{1y}^2(K_{1y}) + s_{1z}^2(K_{1z}) + s_{2y}^2(K_{2y}) + s_{2z}^2(K_{2z}) + \dots\}}$$

Die Berechnung erfolgt mit DYNA unter Verwendung von 50 Eigenformen mit einer Strukturdämpfung von $D = 2\%$. Als Ergebnis der dynamischen Berechnung erhält man zugleich die zugehörigen maximalen Schnittgrößen.

```

+PROG DYNA
KOPF Unwucht Störfall CQC- Überlagerung f=50Hz
ECHO VOLL NEIN
STEU SRES 0          $ (stationär ohne Einschwinganteile)
STEU STYP 3          $ (SRSS- Überlagerung)
EIGE 50 REST LF 101  $ 50 Eigenfrequenzen
MDDD (1 50 1) 0.02   $ 50 Moden mit D=2%
STEP 0
LF 201 BEZ 'Unwucht y' ; FUNK T 0.02 F 1. T1 0. ; LAST 7001 PY 36.
LF 202 BEZ 'Unwucht y' ; FUNK T 0.02 F 1. T1 0. ; LAST 7002 PY 799.
LF 203 BEZ 'Unwucht y' ; FUNK T 0.02 F 1. T1 0. ; LAST 7003 PY 602.
LF 204 BEZ 'Unwucht y' ; FUNK T 0.02 F 1. T1 0. ; LAST 7004 PY 301.
LF 215 BEZ 'Unwucht y' ; FUNK T 0.02 F 1. T1 0. ; LAST 7005 PY 292.
LF 206 BEZ 'Unwucht z' ; FUNK T 0.02 F 1. T1 0. ; LAST 7001 PZ 36.
LF 207 BEZ 'Unwucht z' ; FUNK T 0.02 F 1. T1 0. ; LAST 7002 PZ 799.
LF 208 BEZ 'Unwucht z' ; FUNK T 0.02 F 1. T1 0. ; LAST 7003 PZ 602.
LF 209 BEZ 'Unwucht z' ; FUNK T 0.02 F 1. T1 0. ; LAST 7004 PZ 301.
LF 210 BEZ 'Unwucht z' ; FUNK T 0.02 F 1. T1 0. ; LAST 7005 PZ 292.
AUSW S, V 301 ACT QX STYP CQC
AUSW MXX 401 ACT QX STYP CQC ; MYY 402 ACT QX
AUSW NXX 403 ACT QX STYP CQC ; NYZ 404 ACT QX
ENDE

```

Abbildung 10: DYNA-Eingabe für Schnittgrößenberechnung für Störfallunwucht mit $f=50\text{Hz}$

Da mehrere Eigenfrequenzen in der Nähe der Betriebsfrequenz liegen, muss zusätzlich eine Anregung in diesen Frequenzen untersucht werden. Innerhalb des Intervalls 45 Hz = f = 55 Hz ($f_{26}=46,9$ Hz, $f_{27}=47,7$ Hz, $f_{28}=50,1$ Hz, $f_{29}=51,8$ Hz, $f_{30}=53,3$ Hz) ergeben sich dabei folgende maximale Wegamplituden und Schwinggeschwindigkeiten an den Lagerstellen:

Störfall: $\max s = 0,24 \text{ mm}$

Betriebsfall $\max s = 0,24 \text{ mm} * 2,5/38 = 0,015 \text{ mm}$

$$\max v_{\text{eff}} = s * \Omega / \sqrt{2} = 0,015 \text{ mm} * 314/s / \sqrt{2} = 3,5 \text{ mm/s}$$

Die Bewertung der Schwingungen von stationären Dampfturbinen und Generatoren über 50 MW ist in DIN ISO 10816-2 geregelt. Mit $v_{\text{eff}} < 3,8 \text{ mm/s}$ erfolgt eine Einstufung in Zone A („gut“).

Zonengrenze	Wellendrehzahl min^{-1}	
	1500 oder 1800	3000 oder 3600
	Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit in mm/s	
A/B	2,8	3,8
B/C	5,3	7,5
C/D	8,5	11,8

Tabelle: Empfohlene Werte für die Schwinggeschwindigkeit nach DIN ISO 10816-2

Zusätzlich kann der Frequenzgang der Schwingwegamplituden an den Lagerstellen mit DYNA berechnet werden.

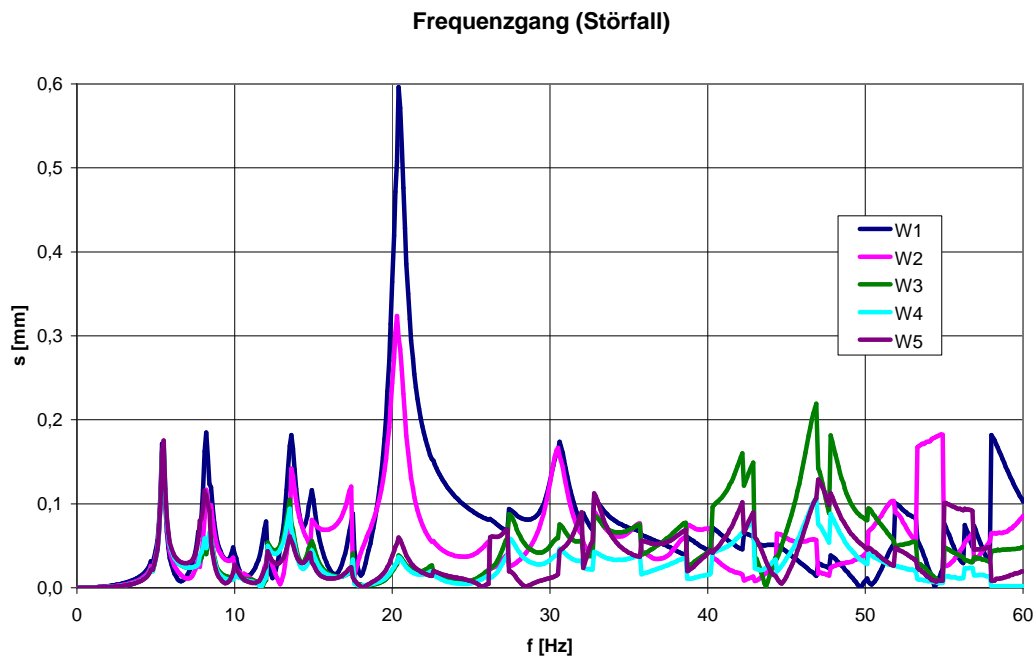


Abbildung 11: Frequenzgang von $s = \sqrt{\dot{s}_y^2 + \dot{s}_z^2}$ infolge frequenzabhängiger Erregerkräfte


```

+PROG DYNA -E
KOPF Unwucht Frequenzgang f=0- 60Hz
STEU SRES 0          $ 0 = Analyse ohne Einschwinganteile
STEU STYP 3          $ 3 = SRSS-Überlagerung
EIGE 50 REST LF 101  $ 50 Eigenfrequenzen
MDD (1 50 1) 0.02    $ 50 Moden mit D=2%
STEP 600 0.1 FREQ     $ FREQ = Analyse über Frequenzen 0- 60Hz
LF 501 BEZ W1y ; FUNK T 1. F 1. T1 0. ; LAST 7001 PY 36.
LF 502 BEZ W2y ; FUNK T 1. F 1. T1 0. ; LAST 7002 PY 799.
LF 503 BEZ W3y ; FUNK T 1. F 1. T1 0. ; LAST 7003 PY 602.
LF 504 BEZ W4y ; FUNK T 1. F 1. T1 0. ; LAST 7004 PY 301.
LF 505 BEZ W5y ; FUNK T 1. F 1. T1 0. ; LAST 7005 PY 292.
LF 506 BEZ W1z ; FUNK T 1. F 1. T1 0. ; LAST 7001 PZ 36.
LF 507 BEZ W2z ; FUNK T 1. F 1. T1 0. ; LAST 7002 PZ 799.
LF 508 BEZ W3z ; FUNK T 1. F 1. T1 0. ; LAST 7003 PZ 602.
LF 509 BEZ W4z ; FUNK T 1. F 1. T1 0. ; LAST 7004 PZ 301.
LF 510 BEZ W5z ; FUNK T 1. F 1. T1 0. ; LAST 7005 PZ 292.
AUSW U 501 502
HIST UY 7001 7005 ERG DRUC LFSP 501
HIST UZ 7001 7005 ERG DRUC LFSP 501
ENDE

```

Abbildung 12: DYNA-Eingabe für Frequenzgang

3.4 Dynamische Fundamentsteifigkeit

Ergänzend zum Nachweis der Schwingwegamplituden werden von den Maschinenherstellern oftmals Nachweise der dynamischen Fundamentsteifigkeit gefordert. Die Steifigkeiten ergeben sich aus den Wegamplituden für eine harmonische Anregung der einzelnen Lagerstellen. Die zulässigen Werte an den Generatorlagern des betrachteten Fundamentes liegen bei $k_{\text{dyn}} = 4 \text{ MN/mm}$ (horizontal) bzw. 8 MN/mm (vertikal) bei einer Anregungsfrequenz von 50 Hz.

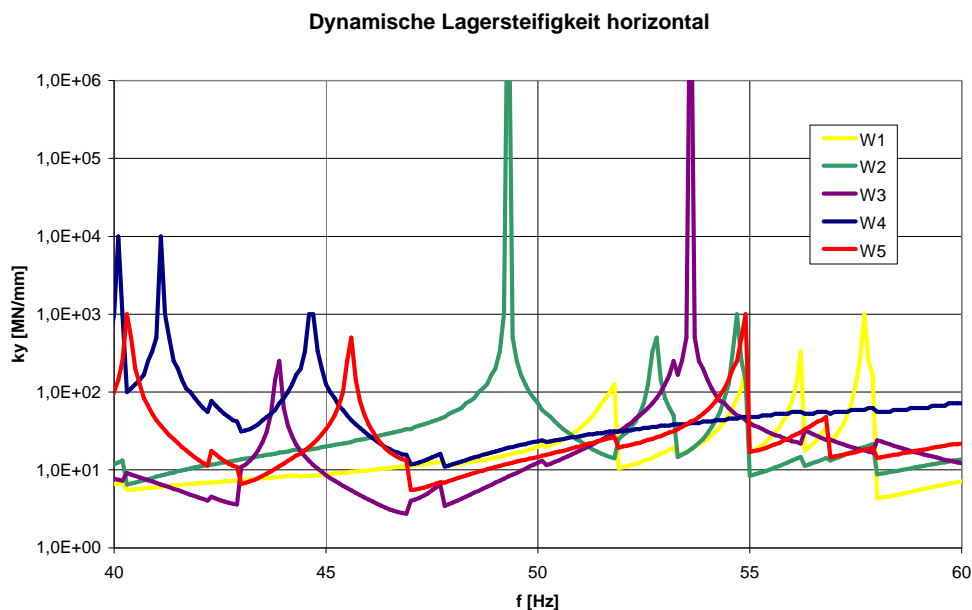


Abbildung 13: Frequenzgang der dynamischen Steifigkeiten ($k_y > 4 \text{ MN/mm}$)

3.5 Standsicherheit

Bei der statischen Berechnung sind bei einem Turbosatzfundament im Betriebsfall allgemein folgende Lastfälle zu berücksichtigen:

- Eigengewicht aus Fundament und Maschinen
- Leistung (Betriebsmoment)
- Vakuumzug
- sonstige Betriebskräfte
- Rohrleitungskräfte
- Reibung aus Temperaturdehnungen
- Betriebsunwuchten

Als Störfälle sind zusätzlich nachzuweisen

- Störfallunwuchten
- Turbinen-Schaufelbruch
- Generator-Kurzschluss

Die Lastfälle Schaufelbruch und Kurzschluss können i. d. R. durch statische Ersatzlasten, die vom Maschinenhersteller vorgegeben werden, erfasst werden. Sie betragen hier 14.300 kN (Schaufelbruch, umlaufend) bzw. ± 1300 kN (Kurzschluss, vertikales Kräftepaar). Die Schnittgrößen infolge von Unwuchtkräften liegen als Ergebnisse der zuvor durchgeführten Schwingungsberechnung vor.

Damit ergeben sich folgende maßgebliche Bemessungskombinationen

1. Bemessungskombination für den Grenzzustand der Tragfähigkeit
2. außergewöhnliche Bemessungskombination für den Grenzzustand der Tragfähigkeit
3. Bemessungskombination für den Rissbreitennachweis

Ein Ermüdungsnachweis ist gem. DIN 4024-1 nicht erforderlich, wenn die Schnittgrößen aus den Betriebsunwuchten (Q6.3) mit einem Ermüdungswert von 3 multipliziert werden und die Stahlstreckgrenze auf 420 MN/m^2 begrenzt wird. Werden als Störfallunwuchten mindestens die sechsfachen Betriebsunwuchten angesetzt, darf auf den Nachweis der Betriebsunwuchten verzichtet werden.

Aus der Bemessung ergeben sich hier erforderliche Bewehrungsquerschnitte bis ca. $90 \text{ cm}^2/\text{m}$.

Nach DIN 4024-1 ist u. A. zu beachten, dass der Gesamtbewehrungsgehalt der Sohlplatte 30 kg/m^3 nicht unterschreiten sollte.

3.6 Wellenverformung

Unterschiedliche Verschiebungen benachbarter Lagerstellen können zu unzulässigen Lagerbeanspruchungen, einem unwuchtigen Lauf des Rotors und zu unzulässigen Wechselbiegebeanspruchungen in der Rotorwelle führen. Zusätzlich zur Verformungsbegrenzung unter dynamischen Lasten wird daher vom Maschinenhersteller eine Begrenzung der Wellenverformung unter statischen Lasten gefordert.

Nach Herstellervorgabe sind hierbei zwei Lastkombinationen nachzuweisen:

K1. Inbetriebsetzung (Lasten nach dem Ausrichten)

- Leistung (Betriebsmoment)
- Vakuumzug
- sonstige Betriebskräfte
- Rohrleitungskräfte
- Reibung aus Temperaturdehnungen

K2. Langfristige Überwachung (Normalbetrieb), zusätzlich:

- Eigengewicht aus Maschinen
- Kriechverformungen

Die radialen Lagerverschiebungen werden für beide Lastkombinationen relativ zu einer Betriebsbezugslinie ausgewertet. Sie dürfen unter der Lastkombination K1 einen Grenzwert von $u_{\text{Rel}} = 0,125 \text{ mm}$ und unter der Lastkombination K2 von $u_{\text{Rel}} = 0,250 \text{ mm}$ nicht überschreiten.

Die Betriebsbezugslinie wird aus der Bedingung ermittelt, dass der Abstand zwischen der Linie und der verschobenen Lage der fünf Lagerpunkte minimal wird.

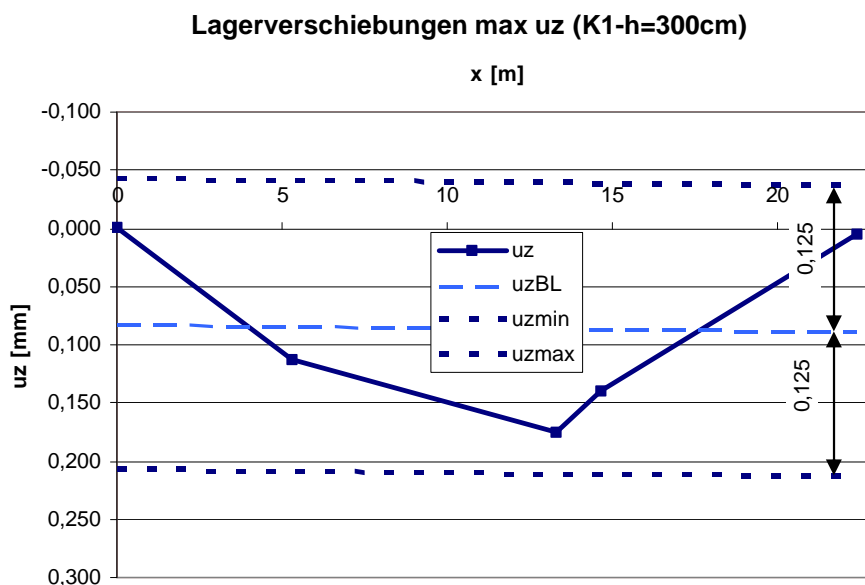


Abbildung 14: Betriebsbezugslinie und Lagerverschiebungen für h=300cm

Für das betrachtete Fundament ergibt sich mit einer Sohlplattendicke von $h = 3,00$ m unter der Lastkombination K1 eine maximale Relativverschiebung an den Wellenlagern von $\max u_{\text{Rel}} = 0,09$ mm. Für eine auf $h = 2,50$ m reduzierte Plattendicke konnten die Forderungen an die Verformungsbegrenzung mit $\max u_{\text{Rel}} = 0,14$ mm $>$ 0,125 mm nicht mehr eingehalten werden.

4 BETEILIGTE



ZERNA, KÖPPER & PARTNER
Ingenieurgesellschaft für Bautechnik

Bochum – Berlin – Darmstadt – Köln – München

<http://www.zkp.de>

5 LITERATUR

DIN 4024 Teil 1 Maschinenfundamente; Elastische Stützkonstruktionen für Maschinen mit rotierenden Massen

DIN ISO 10816 Mechanische Schwingungen; Bewertung der Schwingungen von Maschinen an nicht-rotierenden Teilen,

Teil 1: Allgemeine Anleitungen

Teil 2: Stationäre Dampfturbinen und Generatoren über 50MW

Siemens Power Generation, Gas- und Dampfturbinenkraftwerke (GUD):

<http://www.powergeneration.siemens.com/de/combinedcycle>