

Schwingungsmonitoring an Generatoren

Gas- und Dampfturbinenkraftwerk in Sur (Oman)

Der Bau des Gas- und Dampfturbinen (GuD)-Kraftwerkes in Sur ist das größte Energieprojekt im Oman. Mit der Inbetriebnahme werden die Gas- und Dampfturbinen der neuesten Generation eine Kapazität von 2 000 MW liefern. Für Fundamente von ausgewählten Gasturbinen-Generator-Sätzen wurden alle statischen und dynamischen Ausführungsunterlagen auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft. Im Ergebnis dieser Unterlagenprüfung wurde empfohlen, zerstörungsfreie Untersuchungen zur Verifizierung der Bewehrungslage durchzuführen und Schwingungsmessungen nach ISO 10816 auszuführen. Diese Schwingungsmessungen sollen Amplituden und Frequenzen am Fundament und an den Hauptlagern des Generatorschaftes während der Test- und Betriebsphase aufzeichnen, sodass ein Vergleich mit den Angaben des Maschinenherstellers möglich ist und die Betriebstauglichkeit gewährleistet werden kann. Hierzu wurde ein modernes Schwingungsmesssystem installiert, welches den Zugriff per Webbrowser erlaubt, sodass die Überwachung und Begutachtung aus Deutschland sicher und komfortabel erfolgen kann.

Keywords Gasturbine; Dampfturbine; Generator; GuD-Kraftwerk; Maschinenfundament; Maschinenschwingung; Maschinenmonitoring; ISO 10816; Schwingungsmesstechnik; Eigenfrequenz; Eigenform; Unwucht

1 Das Kraftwerk

Um den zukünftigen Energiebedarf im Oman sicher decken zu können und um Bedingungen für eine nachhaltige Industrie und Wirtschaft zu schaffen, wird ca. 180 km südöstlich von Maskat eines der modernsten Kraftwerke des Landes gebaut. Das Kraftwerk, nur 25 km nördlich von Sur – direkt am Golf von Oman gelegen, ist ein Kombikraftwerk (oft auch GuD-Kraftwerk) der neuesten Generation. Neben den Kraftwerken „Sohar 2“ und „Barka 3“ ist es das größte Energieprojekt im Sultanat (Bild 1). Mit der Inbetriebnahme in 2014 werden die Gas- und Dampfturbinen eine Kapazität von 2 000 MW liefern, was ca. 40 % der Energieproduktion im Oman darstellt.

Das Kraftwerk besteht aus drei Blöcken, wobei der Block Nr. 3 aus einer Gasturbine und einer Dampfturbine besteht. Beide Maschinen sind jeweils an einen Generator angeschlossen. Die Blöcke Nr. 1 und Nr. 2 bestehen hingegen aus jeweils zwei Gasturbinen, einer Dampfturbine und drei Generatoren. Im Weiteren beziehen sich alle Betrachtungen ausschließlich auf die gasbetriebenen Maschinensätze GT#11 und GT#12 im Block Nr. 1. Beide Maschinensätze bestehen jeweils aus einer Siemens Gasturbine (Typ SGT5-4000F mit 250 MW) und einem Sie-

Vibration monitoring of generators – Combined cycle power plant in Sur (Oman)

The construction of the combined cycle power plant (CCPP) in Sur is the largest energy project in Oman. With the commissioning of the gas and steam turbines of the latest generation a capacity of 2 000 MW will be delivered. For foundations of selected gas turbine generator sets, all static and dynamic design documents were reviewed for completeness and plausibility. As a result of this document examination, non-destructive tests to verify the reinforcement layer and vibration measurements according to ISO 10816 have been recommended. These vibration measurements should record amplitudes and frequencies at the foundation and at main bearing points of the generator shaft during the testing and operational phases. This allows the comparison with vendor's requirements and to ensure serviceability. For this purpose, a modern vibration measurement system was installed, which allows access via a web browser, so that the monitoring and evaluation can take place safely and comfortably from Germany.

Keywords gas turbine; steam turbine; generator; CCGT power plant; machine foundation; machine vibration; machine monitoring; ISO 10816; vibration measurement; natural frequency; mode shape; unbalance

mens Generator (Typ SGen5-2000H), und sind auf einem Fundament von rund 34,7 m Länge und 7 m Breite gegründet. Der Teil, auf dem die Gasturbine steht, ist rund 20,3 m lang und 3 m mächtig, wohingegen der Fundamentteil des Generators eine Länge von ca. 14,4 m und eine Höhe von knapp 6 m (inkl. Sockelwände) besitzt. Das Fundament ist auf Pfählen gegründet.



Bild 1 Modernes Gas- und Dampfturbinenkraftwerk am Golf von Oman bietet zukünftig eine Kapazität von 2 000 MW
Modern gas and steam turbine power plant at the gulf of Oman will provide in future a capacity of 2 000 MW



Bild 2 Block Nr. 3 mit 400 MW (links) sowie Block Nr. 2 (2 × Mitte) und Block Nr. 1 (2 × rechts) mit je 800 MW
Block no. 3 with 400 MW (left) as well as block no. 2 (2 × center) and block no. 1 (2 × right) each with 800 MW



Bild 3 Generator vom Typ SGen5-2000H auf massivem Maschinenfundament; links im Bild schließt die Gasturbine an
Generator of Typ SGen5-2000H on massive machine foundation; in the picture the gas turbine is connected to the left

2 Die Aufgabe

Aufgrund der extremen klimatischen Bedingungen vor Ort sind während des Baus tagtäglich hohe Anforderungen an Mensch, Maschine und Baustoff gestellt. Um Sicherheit und Qualität zu gewährleisten, wurde vom Bauherrenvertreter eine statisch-konstruktive, baodynamische und betontechnologische Überprüfung der Ausführungsunterlagen gewünscht. Aus diesem Grund wurde die Bluhm Partner Aktiengesellschaft im April 2012 mit der konstruktiven Überprüfung der statischen und dynamischen Berechnungen sowie der Planunterlagen beauftragt (erste Leistungsphase). Im Ergebnis dieser Planprüfung wurde von unserem Ingenieur-Team ein Untersuchungskonzept aufgestellt, welches betontechnologische Untersuchungen an Bohrkernen vorsah und zerstörungsfreie Untersuchungen an den Maschinenfundamenten der GT#11 und GT#12 empfahl. Die Begutachtung der Bohrkern sollte Aufschluss über die tatsächliche Betonqualität liefern, wohingegen die zerstörungsfreien Untersuchungen mittels Radar stichprobenhaft Aufschluss über die Lage und die Bewehrungsstabdurchmesser geben sollten. Im Gesamturteil wurden abschließend auch Messungen von Maschinen- und Fundamentalschwingungen an beiden Maschinensätzen empfohlen (zweite Leistungsphase).

Diese Aufgabe übernahmen Bluhm Partner im Dezember 2012. Hierzu entwickelten unsere Experten ein entsprechendes Mess- und Beurteilungskonzept, welches eine gesamtheitliche Beurteilung des „schwingungsfähigen Systems“ – bestehend aus Maschine und Maschinenfundament – mithilfe eines Schwingungsmonitorings nach ISO 10816 [1] ermöglicht. Eine Beurteilung des Generatorhauses nach DIN 4150 [2, 3] war nicht Bestandteil der Untersuchungen.

3 Das Konzept

Das Konzept zur Messung der Fundament- und Maschinenschwingungen ermöglicht, die Betriebstauglichkeit der Maschinensätze GT#11 und GT#12 nachzuweisen. Dazu

wurden die Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen aus der ersten Leistungsphase zusammen mit den Forderungen des Maschinenherstellers zugrunde gelegt.

Am Maschinenfundament, welches aus dem „flachen“ Teil für die Gasturbine und dem „massiven“ Teil für den Generator (Bild 3) besteht, wurden entsprechend der Modalanalyse drei Messpunkte bestimmt. Diese Messpunkte ermöglichen die Beurteilung der Fundamentalschwingungen im Zeit- und Frequenzbereich in allen Raumrichtungen. Um Ursache und Wirkung festzustellen und um die Betriebstauglichkeit der Maschine zu beurteilen, wurden an beiden Hauptlagern des Generators zwei Messpunkte festgelegt, die die Gehäuseschwingungen in radialer Richtung messen. Das Konzept geht dabei von zwei Betriebsphasen aus – der „Test Operation Phase“ und der „Continuous Operation Phase“. In der „Test Operation Phase“ sind Schwingungen definierter Lastfälle/-stufen und Lastfallkombination aus GT#11, GT#12 (beide Block Nr. 1) und GT#21 (Block Nr. 2) zu messen. Hier werden ferner Justierungsarbeiten wie z. B. das Auswuchten durchgeführt. Aus dieser Phase sind die größten Schwingungswerten der Maschinenfundamente und -lager zu erwarten und Eigenfrequenzen der Maschinenfundamente festzustellen. Hingegen sollen in der „Continuous Operation Phase“, welche durch einen Dauerbetrieb gekennzeichnet ist, Schwingungen unter Normalbetrieb ermittelt und nach ISO 10816 beurteilt werden. Für letztere Betriebsphase wurde eine Überwachungsdauer von drei Jahren empfohlen. Die nachfolgenden Betrachtungen beschränken sich auf die ersten Ergebnisse der „Test Operation Phase“, da die „Continuous Operation Phase“ voraussichtlich erst im April 2014 startet.

An das schwingungsfähige System wurden seitens der Dynamik folgenden Forderungen gestellt: Die Schwingungen des Maschinenfundamentes sind auf effektive Schwinggeschwindigkeiten von $v_{\text{rms}} = 2,8 \text{ mm/s}$ im stationären Betrieb und auf $v_{\text{rms}} = 4,5 \text{ mm/s}$ im transienten Betrieb zu begrenzen. Analog dazu sind die Schwingungen der Maschine auf Spitzenwerte des Schwingweges von $w_{\text{max}} = 17,1 \text{ }\mu\text{m}$ zu limitieren.

Tab. 1 Grenzen der Bewertungszonen für Schwinggeschwindigkeiten der Lagergehäuse oder Lagerblöcke
Recommended values for bearing housing or pedestal vibration velocity at zone boundary

Zonengrenze	1 500 min ⁻¹ oder 1 800 min ⁻¹	3 000 min ⁻¹ oder 3 600 min ⁻¹
A/B	2,8 mm/s	3,8 mm/s
B/C	5,3 mm/s	7,5 mm/s
C/D	8,5 mm/s	11,8 mm/s

Dies entspricht mit einer Drehzahl von $\Omega = 3\,000\text{ min}^{-1}$ einer effektiven Schwinggeschwindigkeit von $v_{\text{rms}} = 3,8\text{ mm/s}$ und somit der Grenze der Bewertungszone A/B nach ISO 10816, Teil 2 (siehe Tab. 1). Für das Variieren der Drehzahl im Normalbetrieb werden die entsprechenden Werte über den zulässigen Schwingweg von $w_{\text{max}} = 17,1\text{ }\mu\text{m}$ ermittelt.

4 Die Messungen

Die Schwingungsmessungen erfolgen mit Schwinggeschwindigkeits- und Beschleunigungsaufnehmern und einer zentralen Loggereinheit, die es ermöglicht, alle Messwerte online zu dokumentieren und für den Kunden per Login zugänglich zu machen. Ferner bietet das System die komplette Transparenz eines modernen Messsystems, vom Kalibrierstatus aller Sensoren, über den Ladezustand der internen Batterie, bis hin zur Signalstärke der GSM-Verbindung und dem Fernsteuern zum Setzen der Trigger- und Alarmschwellen. Alle Projektbeteiligten können so, automatisch und auf kurzem Weg, über kritische Schwingungszustände per SMS benachrichtigt werden. Anders als bei Maschinen, die nicht mit explosiven Gasen

arbeiten, waren im vorliegenden Fall erwartungsgemäß besondere Anforderungen an Teile der Messkette im Explosionsschutz gestellt. Die „Test Operation Phase“, und damit auch die Messungen, starteten mit dem „First Fire“ am 12. Mai 2013 (GT#11) und am 21. Mai 2013 (GT#12). Die Messungen wurden so geplant, dass stets eine exakte Synchronisation aller Messkanäle erfolgt – Sample für Sample. Des Weiteren ordnet das Messsystem den Messdaten exakte Zeitstempel nach lokaler Zeit zu. Dies ermöglicht, alle relevanten Leistungsparameter der Maschine, die durch Siemens bereitgestellt wurden, den Messdaten genau zuzuordnen. All diese Details ermöglichen es, einen präzisen Zusammenhang zwischen Aktion und Reaktion bzw. Anregung und Antwort herzustellen. Die Abtastrate, Aufzeichnungsdauer sowie die Trigger- und Alarmschwellen wurden so gewählt, dass sowohl ausreichende Messdaten akquiriert werden als auch eine ausreichend hohe Auflösung im Frequenzbereich ermöglicht wurde. Die Messpunkte am Generator und Messachsen am Fundament wurden definiert:

- M_1 und M_3 sind horizontal orientiert und jeweils an einem Hauptlager
- M_2 und M_4 sind vertikal orientiert und jeweils an einem Hauptlager
- x -Achse ist horizontal orientiert und parallel zur Fundamentlänge (longitudinal)
- y -Achse ist horizontal orientiert und orthogonal zur Fundamentlänge (transversal)
- z -Achse ist vertikal orientiert

Die vom Messsystem ausgegebenen Werte sind Spitzenwerte, welche in die entsprechenden Beurteilungswerte umgerechnet werden müssen. Bild 4 zeigt beispielhaft die Spitzenwerte der Schwinggeschwindigkeit am Generator GT#11 am Messpunkt M_4 im Juni 2013. Hieraus zeigt sich, dass der maximale Spitzenwert $v_{\text{max}} = 5,60\text{ mm/s}$ be-

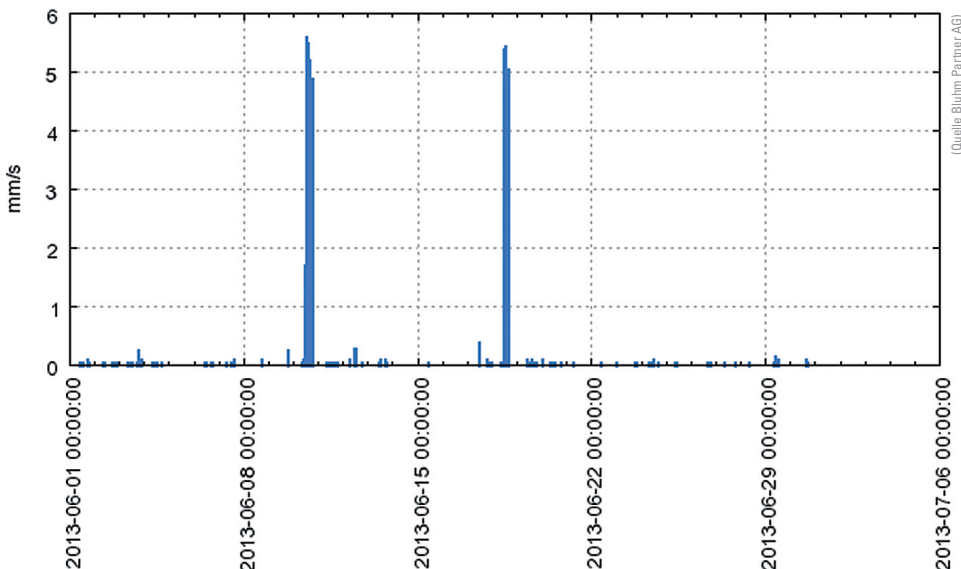


Bild 4 Spitzenwerte der Schwinggeschwindigkeit an M_4 an GT#11
Peak values of vibration velocity at M_4 at GT#11

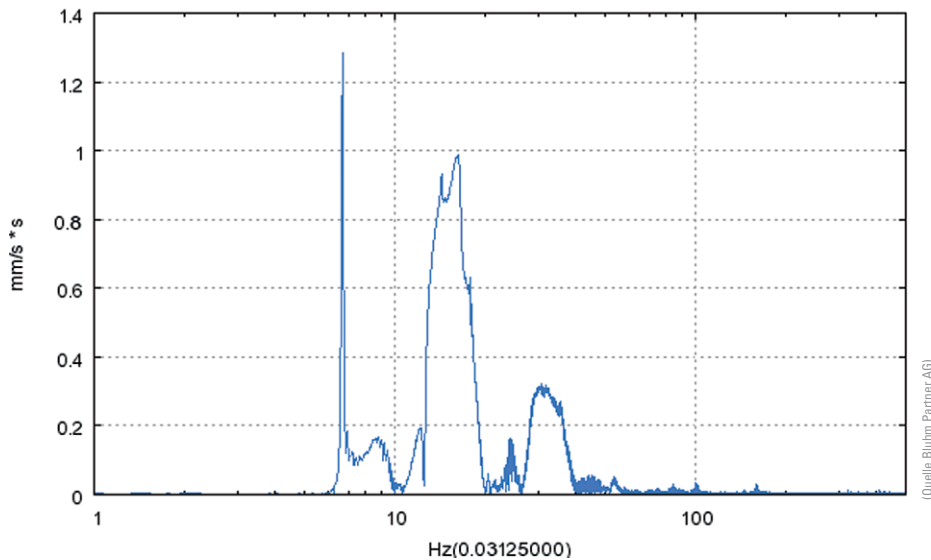


Bild 5 Amplitudenspektrum des Schwingweges an M_1 an GT#11
Amplitude spectrum of vibration displacement at M_1 at GT#11

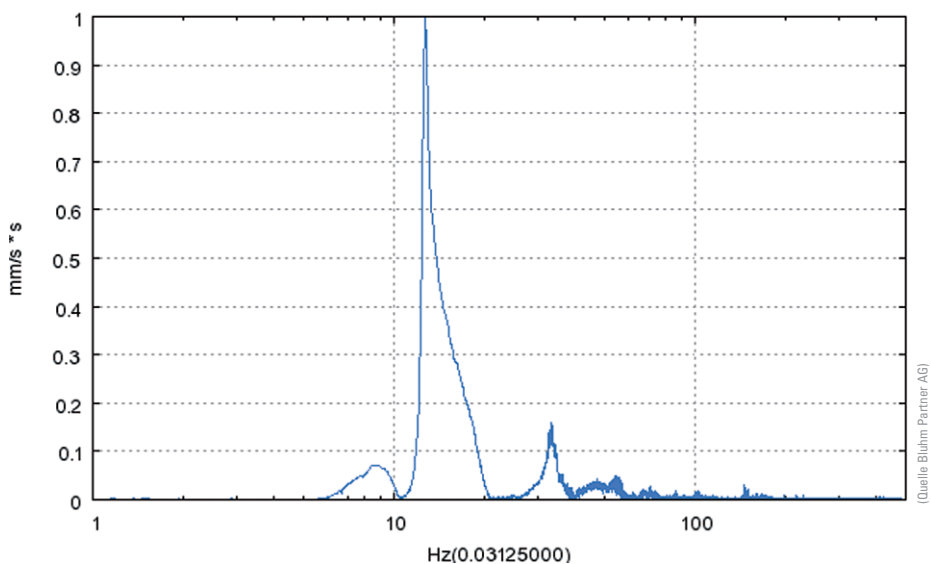


Bild 6 Amplitudenspektrum des Schwingweges an M_4 an GT#11
Amplitude spectrum of vibration displacement at M_4 at GT#11

trägt. Wird dieser Spitzenwert mit der korrespondierenden Drehzahl von $\Omega = 3000 \text{ min}^{-1}$ in einen Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit umgerechnet, so ergibt sich $v_{\text{rms}} = 3,96 \text{ mm/s}$. Errechnet man den Spitzenwert des Schwingweges, so ergibt sich mit $w_{\text{max}} = 17,8 \text{ }\mu\text{m}$ eine Amplitude, die geringfügig größer ist, als im stationären Betrieb mit $w_{\text{max}} = 17,1 \text{ }\mu\text{m}$ zulässig.

An den anderen Messpunkten der GT#11 ergeben sich im Juni Werte von $w_{\text{max}} = 32,1 \text{ }\mu\text{m}$ (M_3 mit $\Omega = 2500 \text{ min}^{-1}$), $w_{\text{max}} = 34,9 \text{ }\mu\text{m}$ (M_2 mit $\Omega = 2500 \text{ min}^{-1}$) und $w_{\text{max}} = 16,9 \text{ }\mu\text{m}$ (M_1 mit $\Omega = 2500 \text{ min}^{-1}$). Letztere drei Werte liegen jedoch nicht im Drehzahlbereich des Normalbetriebes. Im Ergebnis dieser ersten Werte erfolgten erste Justierungsarbeiten an beiden Generatoren, um die Schwingungsamplituden zu reduzieren. Die Fundament-

schwingungen zeigen hingegen mit Spitzenwerten von $v_{\text{max}} = 2 \text{ mm/s}$ (F_{2Y}) bzw. umgerechnet in einen Effektivwert von $v_{\text{rms}} = 1,41 \text{ mm/s}$ Schwingungen, die deutlich kleiner sind als im stationären Betrieb mit $v_{\text{rms}} = 2,8 \text{ mm/s}$ als zulässig definiert. Diese Größenordnungen sind in jedem Fall als unkritisch zu bewerten. Ferner zeigt sich, dass die 1. Eigenform des Maschinenfundamentes eine Eigenfrequenz von $f_1 = 6,70 \text{ Hz}$ aufweist (= 1. Eigenfrequenz in y-Richtung, Bild 5). Diese liegt gut im Bereich der berechneten Eigenfrequenz der 1. Eigenform ($f_1 = 7,69 \text{ Hz}$ bei 100 % Pfahlsteifigkeit).

Die 3. Eigenform des Maschinenfundamentes liefert eine Eigenfrequenz von $f_3 = 12,70 \text{ Hz}$ (z-Richtung, Bild 6). Diese stimmt sehr gut mit der berechneten Eigenfrequenz von $f_3 = 12,78 \text{ Hz}$) überein.

5 Der Ausblick

Die zum Zeitpunkt der Publikation vorliegende Messdatenbasis ermöglicht noch keine Beurteilung des Schwingungsverhaltens des Generators im Dauerbetrieb, da dieser erst nächstes Jahr startet. Ebenso können noch keine Aussagen über die maximalen Amplituden im transienten Betrieb gemacht werden. Hierfür ist das Messen von Schwingungen infolge definierter Lastfälle und Lastfall-

kombinationen aus GT#11, GT#12 und GT#21 in den nächsten Monaten geplant. Die Messungen in der „Test Operation Phase“ zeigen jedoch zuverlässig, dass vereinzelte Schwingungsamplituden am Generator über den zulässigen Werten liegen, was Justierungsarbeiten erforderlich macht. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen ebenfalls, dass die berechneten Eigenfrequenzen des Maschinenfundamentes gut mit den Berechnungsergebnissen übereinstimmen.

Literatur

- [1] ISO 10816: *Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 2: Land-based steam turbines and generators in excess of 50 MW with normal operating speeds of 1500 r/min, 1800 r/min, 3000 r/min and 3600 r/min*. Third edition, 2009.
- [2] DIN 4150: *Erschütterungen im Bauwesen, Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen*. I. d. F. Februar 1999.
- [3] BLUHM, J.; HASENSTAB, A.: *Messen und Beurteilen von Erschütterungen im Bauwesen*. Messtechnik im Bauwesen, Special 1 (2009), S. 22–23.

Autoren

Dipl.-Ing. (Univ.) Ján Bluhm
Roman Bluhm
Bluhm Partner Aktiengesellschaft
Helene-Mayer-Ring 14/2
80809 München
T. +49 89 122827930
F. +49 89 122827931
munich@bluhmpartner.com
www.bluhmpartner.com