

SCHWINGUNGSMESSUNGEN AN EINEM NEUEN MOTORENPRÜFSTAND

Jan Hoffmann / Peter Hoffmann

1 EINLEITUNG

Im industriellen Einsatz sind Schwingungsmessungen an elektrischen Maschinen eine Maßnahme der zustandsabhängigen Wartung im Rahmen der Betriebsüberwachung. Ein Sammeln und Vergleichen von Schwingungswerten in bestimmten Abständen oder im kontinuierlichen Ablauf erlaubt Rückschlüsse auf den Verschleiß und den mechanischen Zustand der überwachten Maschine. Steigen die Schwingungspegel bei gleichbleibendem Betriebs- und Lastzustand an, so kann im Allgemeinen von einer Zustandsverschlechterung ausgegangen werden.

Das in diesem Prüffeld eingesetzte Analysesystem PULSE™ der Firma Brüel und Kjaer soll schon im Vorfeld auftretende Schwingungen, welche durch ungenaue Fertigung oder unzureichendes Wuchten einzelner Baugruppen hervorgerufen werden, lokalisieren. Anhand von Schwingungsbildern, auf die im Weiteren noch eingegangen wird, können Schwachstellen der Konstruktion und der Ausführung der beteiligten Komponenten aufgedeckt und in gewissem Umfang beseitigt werden.

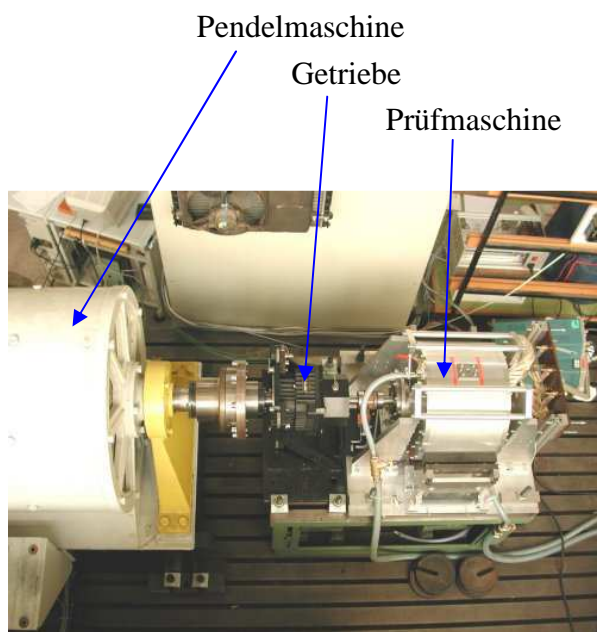


Bild 1: Prüfstand Ansicht von oben

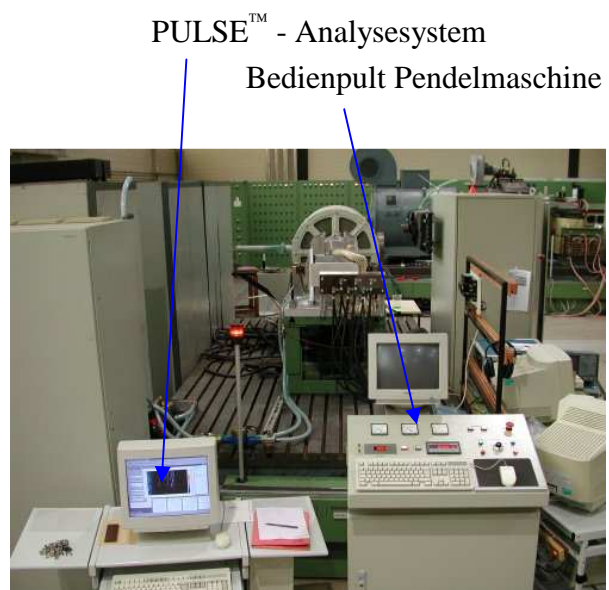


Bild 2: Prüfstand Frontansicht

2 AUFBAU DER ANLAGE

Zum Antrieb / Belasten einer neuentwickelten und am Institut gebauten Versuchsmaschine wird eine 160 kW Pendelmaschine mit einem Getriebe 1:4 zur Drehmoment-/ Drehzahl-anpassung eingesetzt. Die Anordnung zeigt **Bild 1**. Die Maximaldrehzahl des Prüflings beträgt 12000 1/min, das höchste Drehmoment 160 Nm. Bei ersten Probeläufen ohne Übertragung eines Moments, also im Leerlauf, waren deutlich Vibrationen in vertikaler Richtung im Bereich Ausgang Getriebe / Eingang Versuchsmaschine zu spüren. Dieser Umstand war Anlass, eine nähere Untersuchung mit dem PULSE - Analysesystem durchzuführen.

Die Drehmomenterfassung wird in dieser Anordnung mittels Kraftsensoren, in welchen der Stator der Prüfmaschine gelagert ist, realisiert. Diese Kraftsensoren reagieren sehr sensibel auf von außen eingeleitete Schwingungen, das eigentliche Messergebnis wird damit gegebenenfalls verfälscht. Eine Schwingungsanalyse soll zunächst eine Zuordnung der Schwingungsquellen im Antriebsstrang ermöglichen und dann Hinweise auf deren Reduktion oder Elimination liefern.

Beschleunigungsaufnehmer

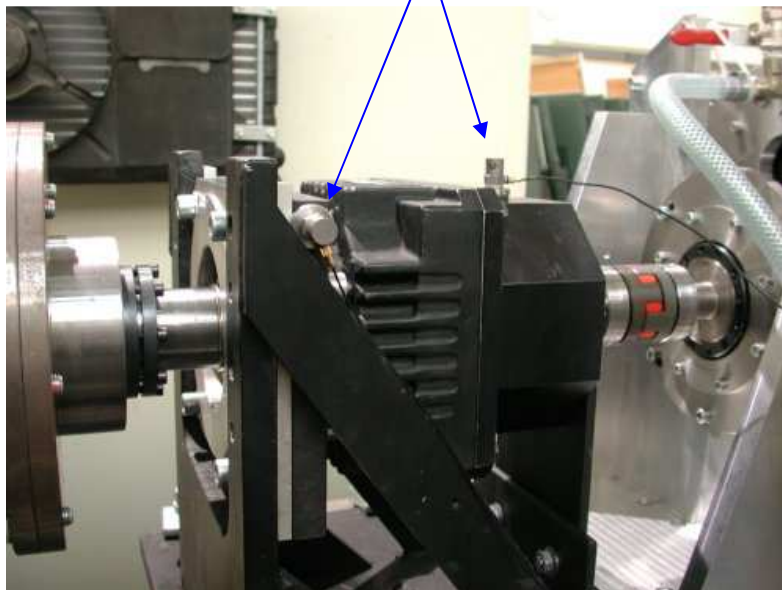


Bild 3: Getriebe mit Beschleunigungsaufnehmern

Die Position der eingesetzten Beschleunigungsaufnehmer ist in **Bild 3** zu erkennen. Hierbei wird der rechte Aufnehmer die “erfühlten” Schwingungen in vertikaler Richtung, der linke Aufnehmer Schwingungen der Getriebeaufnahme in horizontaler Richtung erfassen.

3 MESSUNG

Zur Schwingungsmessung werden Piezo-Sensoren eingesetzt. Diese erzeugen im Falle einer auftretenden Beschleunigung eine messbare Ladung. Die Materialeigenschaften des Piezo-Kristalls und ein vorgespannter Einbau sorgen für ein beschleunigungsproportionales Signal über einen großen Frequenzbereich. Eine obere Begrenzung des Frequenzbereichs ist durch die auftretende Nichtlinearität der Empfindlichkeit des Signals vor der Resonanzfrequenz gegeben. In diesem Fall liegt die Grenze bei 18kHz. Der durch die Ladungstrennung resultierende Strom wird innerhalb des Ladungsverstärkers verstärkt und integriert, so dass eine dem Strom proportionale Spannung entsteht.

Der Verlauf dieser Spannung wird über die PULSE™- Plattform sichtbar gemacht. Die zugehörige Software bietet u. a. die Möglichkeit, das Zeitsignal über eine Fouriertransformation (FFT) in ein Frequenzspektrum zu zerlegen sowie eine Oktavanalyse (hier CPB-Constant Percentage Bandwidth) durchzuführen. Die CPB-Analyse besteht aus der Frequenzanalyse mittels Oktavfiltern, d. h. dass das zu betrachtende Frequenzspektrum in mehrere Teilfrequenzbereiche (Oktaven) unterteilt wird. Die oberste und unterste Frequenz einer Oktave besitzen jeweils das Verhältnis 2:1. So ergibt sich ein sehr detailliertes Bild im unteren Frequenzbereich, was besonders für die Betrachtung einer rotierenden Maschine im niederfrequenten drehzahlsynchronen Bereich vorteilhaft ist. Die Bandbreite der Filter wird hier mit 1/12 Oktave voreingestellt; der gesamte betrachtete Frequenzbereich beginnt bei 1 Hz und endet bei 6,5 kHz.

Durch eine logarithmische Aufteilung der Frequenzskala werden die niederfrequenten Bereiche besonders gut sichtbar gemacht. Eine FFT-Analyse im niederen Frequenzbereich erbrachte für diesen Fall keine gut sichtbaren Ergebnisse. Die Schwingungsanalyse der Komponenten wurde in 60 Drehzahlschritten von 25 U/min bis zu einer Maximaldrehzahl von 1500 U/min (Getriebeausgang 6000 U/min) durchgeführt. Für jeden Drehzahlschritt erfolgte die Aufnahme eines Spektralbildes, so dass durch ein Hintereinanderlegen dieser Aufnahmen das Verhalten der Struktur für einen weiten Drehzahlbereich charakterisiert werden kann.

Eine sehr anschauliche Darstellungsform ist die des Wasserfalldiagramms (**Bild 4**), welche obige Beschreibung umsetzt. Die Ansicht dieses Diagramms aus der Draufsicht (entgegen der Richtung der Amplitudenachse) zeigt **Bild 5** mit einer farbkonturierten Darstellung der Amplituden. In diesem Format lassen sich die Verläufe noch besser charakterisieren.

Das ursprüngliche Signal der Schwingungssensoren ist ein Beschleunigungssignal $a(t)$. Durch Integration der Beschleunigung

$$a(t) = \hat{a} \cdot \sin(\omega t)$$

erhält man die maximale Schwinggeschwindigkeit

$$\hat{v} = \frac{\hat{a}}{\omega} = \frac{\hat{a}}{2\pi f}$$

Eine Betrachtung der Schwinggeschwindigkeit hat durch die Einbeziehung der Winkelgeschwindigkeit (und so der Frequenz) im Nenner den Vorteil, dass stark betonte hochfrequente Anteile, die für eine Messung des Verhaltens eines Maschinenaufbaus nicht ausschlaggebend sind, etwas weniger ausgeprägt dargestellt werden.

Mit Hilfe von bestehenden Klassifizierungen wie z. B. VDI-Richtlinie 2056 oder ISO 1940 kann ein Zustand einer Maschine oder eines Rotors unter dem Aspekt der Schwinggeschwindigkeit beurteilt werden. Es wurde eine Vergleichsmessung der Auswirkung einer Getriebeabstützung durchgeführt.

4 AUSWERTUNG

Die Auswertung erfolgt exemplarisch anhand des Sensors 1 (direkt auf dem Getriebe, in der vertikalen Achse). Das Getriebe ist zunächst nicht zusätzlich abgestützt. **Bild 4** zeigt den Verlauf der Schwinggeschwindigkeit über der Drehzahl und Frequenz. Die Amplitude der Schwinggeschwindigkeit ist linear aufgetragen, um dominierende Schwingungen stärker hervorzuheben. Auffällig ist zunächst das stark niederfrequente Rauschen, welches hier vernachlässigt wird.

Strukturresonanzen sind im Wasserfalldiagramm als Linien erkennbar, die parallel zur Drehzahlachse verlaufen. Diese treten hier bei den Frequenzen 190 Hz, 270 Hz und 1,5 kHz auf. Eine leichte Anhebung ist auch bei 4,3 kHz erkennbar.

Drehzahlabhängige Amplituden wie z. B. aus Unwucht oder Zahneingriff treten in einem exponentiellen Verlauf auf, was auch aus **Bild 5** hervorgeht. An den Schnittpunkten der Anregungsverläufe und Resonanzen werden Überhöhungen gut sichtbar. Die markierten Kurvenverläufe repräsentieren jeweils drehzahlkonforme Anregungen. Die gelb markierte Kurve zeigt die Schwingung des Getriebeeingangs (bis 25 Hz, 1500 U/min), die rot markierte den Ausgang (bis 100 Hz, 6000 U/min). Die maximale Amplitude des Ausgangs liegt bei 2,45 mm/s, was einem Effektivwert von 1,73 mm/s entspricht. Nach VDI-Richtlinie 2056 liegt dieser Wert zwar in einem brauchbaren Bereich für Gruppe-M Maschinen, jedoch ist eine Vibration - wie anfangs bemerkt - deutlich spürbar.

Nach dem Einbau einer zusätzlichen Abstützung am Getriebe fallen die Amplituden deutlich niedriger aus (**Bild 6**). Die abgelesene Amplitude für den Ausgang beträgt nun 336 $\mu\text{m/s}$, was mindestens um den Faktor 7 unter dem vorigen Wert liegt. Auch der Getriebeeingang zeigt sich deutlich schwächer ausgeprägt. Allgemein tritt eine sichtbare Konturabschwächung ein, was sich sehr vorteilhaft für weitere Kraft- und Schwingungsmessungen am Motorenteil auswirkt und bei langer Betriebszeit den Verschleiß vermindert.

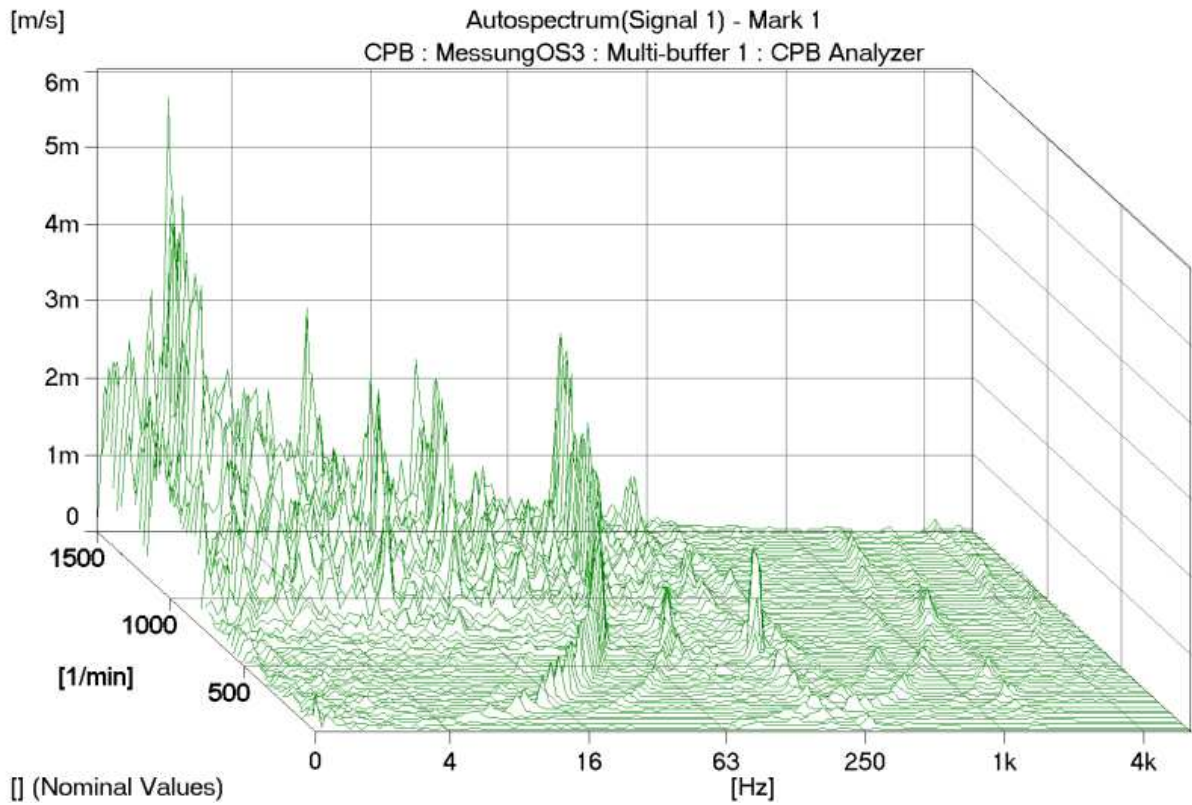


Bild 4: Wasserfalldiagramm der CPB-Analyse; Sensor1; 1Hz-6,5kHz

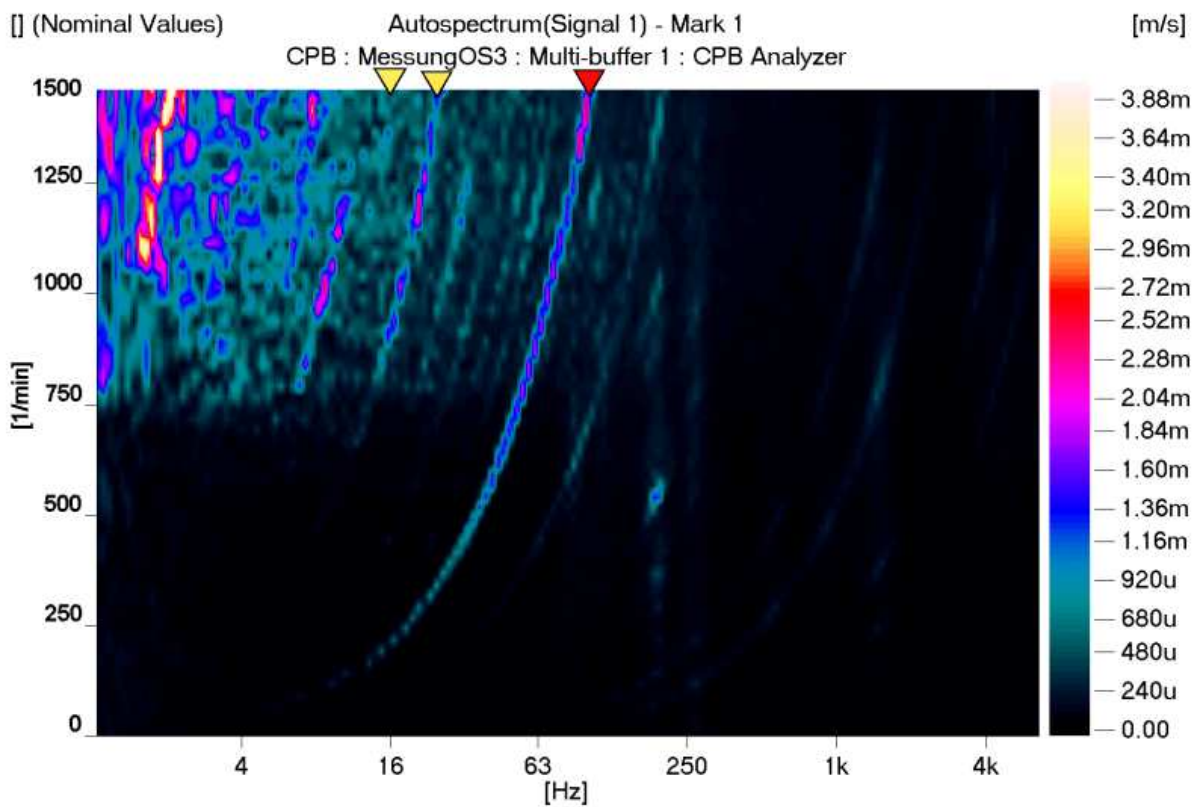


Bild 5: Konturdiagramm der CPB-Analyse; Sensor1; 1Hz-6,5kHz

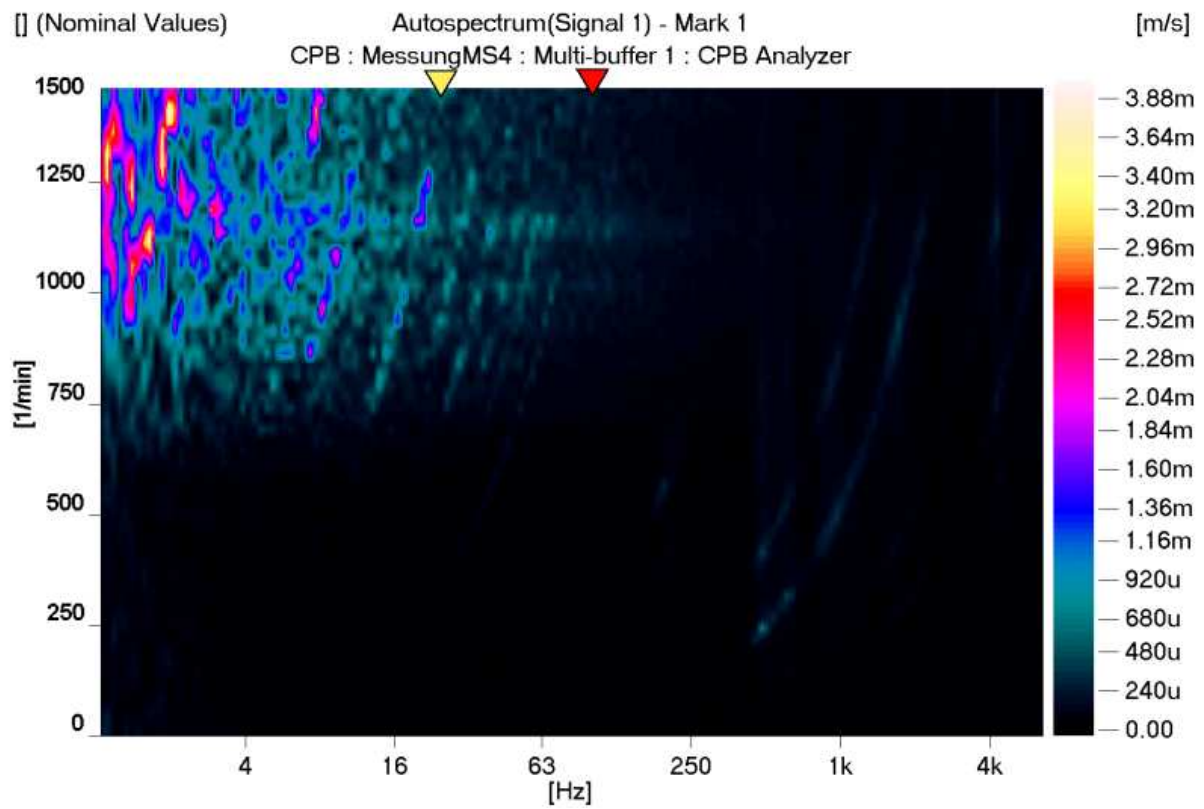


Bild 6: Konturdiagramm der CPB-Analyse; Sensor1; 1Hz-6,5kHz
(nach zusätzlicher Abstützung am Getriebe)