

## Die Herausforderungen der Überwachung mobiler Bergbaumaschinen



Die Schwingungsmessung ist in den vergangenen 20 Jahren zunehmend erwachsen geworden. Während kritische Maschinen in der Öl-, Gas- und petrochemischen Industrie bereits seit Jahrzehnten kontinuierlich online überwacht werden, entdecken Unternehmen, die bisher intermittierende Datenerfassungsmethoden angewendet haben, jetzt die kontinuierliche Überwachung.

Mobile Maschinen stehen derzeit auf der Agenda ... Bagger, Baggerschaukeln, Schaufelradbagger, Förderanlagen, Schwerlast-Lkw sind ebenso wichtig für die Produktion und genauso "kritisch" wie ein Gaskompressor. Anders als bei stationären Anlagen

birgt die Überwachung mobiler Maschinen jedoch besondere Herausforderungen, die bewältigt werden müssen, um eine präzise, wiederholbare und zuverlässige Datenerfassung zu ermöglichen. Hohe Geschwindigkeiten und Belastungsschwankungen sind nur ein Aspekt der Anwendung.

Die Logistik der Sensormontage, die Verkabelung, die Netzwerkkommunikation und die allgemeine Wartbarkeit machen die Überwachung dieser Maschinen außerordentlich kompliziert. Wir werden diese Hindernisse behandeln und neue Lösungen präsentieren, die geeignet sind, die Betriebssicherheit großer mobiler Maschinen erheblich zu verbessern.

### Geschwindigkeits- und Belastungsschwankungen

Zuverlässige, wiederholbare Schwingungsmessungen sind seit jeher von Beharrungszuständen, d. h. konstanten Drehzahlen und Belastungen, abhängig. Wiederholgenauigkeit wird oftmals als wesentliches Element einer guten Schwingungsdatenerfassung angesehen und ist nicht nur für die präzise Messung des Maschinenzustands, sondern umso mehr auch für intermittierende Überwachungsstrategien von wesentlicher Bedeutung. Die Daten müssen für den Zustand der Maschine repräsentativ sein und tatsächliche Veränderungen aufgrund einsetzender Fehlerzustände und nicht Veränderungen aufgrund von Änderungen des

Betriebszustands wiedergeben. Wenn sich beispielsweise die Geschwindigkeit während eines typischen Messzyklus ändern, wird das Messergebnis hierdurch beeinträchtigt.

- a) Die Zuverlässigkeit der Daten wird beeinträchtigt und vor allem:
- b) Die Wiederholgenauigkeit wird eingeschränkt

Eine Lösung bestand bisher darin, die Schwingungsmessung an der Maschine im Beharrungszustand durchzuführen. Betrachten Sie beispielsweise den hier abgebildeten Minenschaufelbagger.



Abbildung 1: Bergwerks-Schaufelradbagger

Während der routinemäßigen PM-Prüfungen steht der Bagger stationär auf ebenem Boden und die 2000-PS-Elektromotoren laufen lastfrei mit konstanter Geschwindigkeit. Die an jedem der Motorlager (NDE & DSE) vorgenommenen Schwingungsmessungen sind zuverlässig, wiederholbar und unterliegen keinen Schwankungen aufgrund des Betriebs der Schaufel, der Kippbewegung, der Drehbewegungen oder der Fahrt des Baggers.

Das Problem bei diesem Testverfahren besteht darin, dass manche Fehlerzustände nur auftreten, wenn die Maschine unter Last betrieben wird, so dass diese Daten nur begrenzt nutzbar sind. Möglicherweise gibt es jedoch noch eine bessere Methode durch selektives Triggern auf der Grundlage der Drehzahl.

## Maschinenzustände

Die Definition eines wiederholbaren "Betriebszustands" oder "Maschinenzustands", der sich durch die Messung bestimmter Parameter wie etwa der Drehzahl, der Drehrichtung und der Last ermitteln lässt, kann helfen, die Erfassung zuverlässiger und wiederholbarer Schwingungsdaten während dieses Maschinenzustands zu erfassen.

In Abbildung 2 würden die Schwankungen der Drehzahl und der entsprechenden Schwingungspegel die Erfassung sinnvoller Trenddaten erheblich beeinträchtigen. Die Definition eines "Maschinenzustands" basierend auf den gemessenen Parametern, in diesem Fall die Drehzahl und die Drehrichtung, gewährleistet wiederholbare Messwerte und zuverlässige Schwingungspegel-Trenddaten – Abbildung 3.

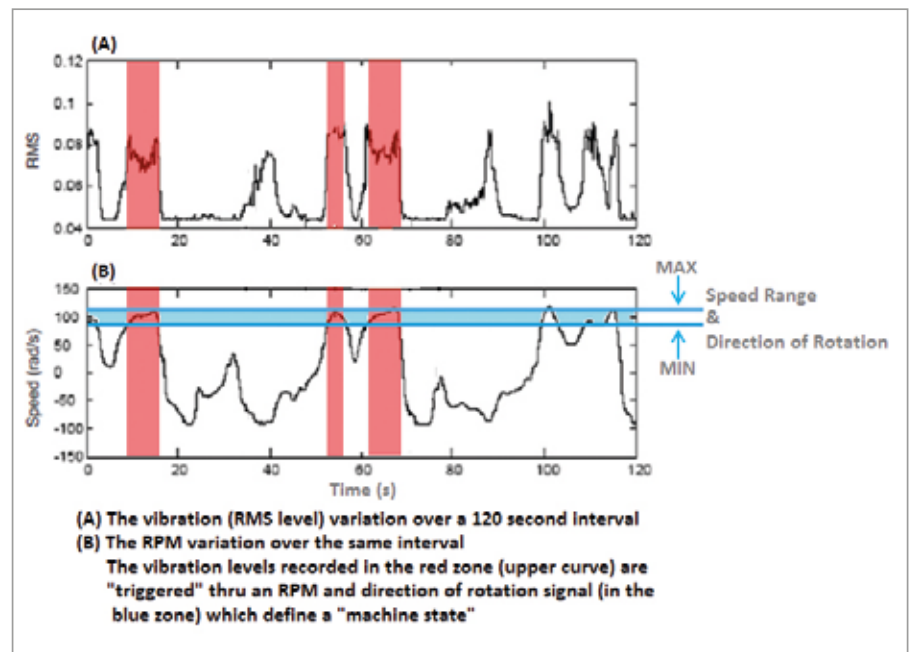
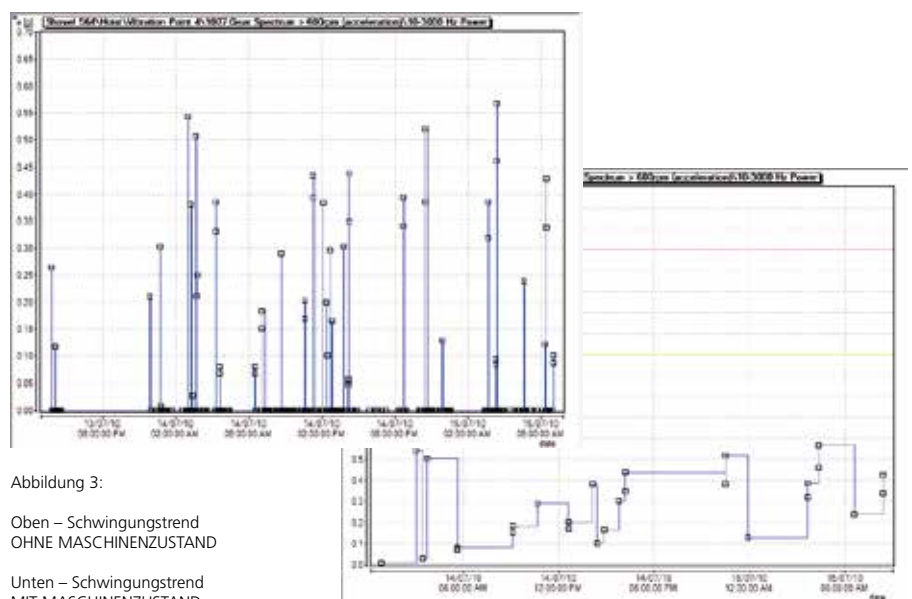


Abbildung 2: Maschinenzustände



## Ordnungsverfolgung & Ordnungsanalyse

### FFT-basierte und digitale Resampling-Methoden

In einigen Fällen variiert die Maschinendrehzahl kontinuierlich, ohne dass sich die Geschwindigkeit zu irgendeinem Zeitpunkt in einem pseudo-konstanten Bereich befindet. Dies erschwert die Definition eines Maschinenzustands – Abbildung 4.

Eine normale FFT-Analyse würde aufgrund der schnellen Veränderungen der Drehzahl über den Zeitraum einer FFT-Aufzeichnungslänge zu undeutlichen Spektralkomponenten führen.

Das "Verwischen" der Spektralkomponenten entsteht durch die feste Abtastrate des FFT-Prozesses, die schnelle Veränderung der Drehzahl während der FFT-Aufzeichnung und die daraus resultierende Schwankung des Schwingungspiegels und der Schwingungsfrequenz.

Die Ordnungsverfolgung ist ein Prozess, in dessen Verlauf eine bestimmte Frequenzkomponente, d. h. 1X (1. Harmonische) aus einem gesamten Frequenzspektrum im Vergleich zur Drehzahl extrahiert wird. Diese Methode ist besonders für Anlauf- oder Abschaltmessungen nützlich, bei denen Geschwindigkeitsveränderungen innerhalb kurzer Zeiträume und typischerweise zwischen 1.800 und 300 U/min mit einer relativ moderaten Änderungsgeschwindigkeit auftreten. Die Anzeige der

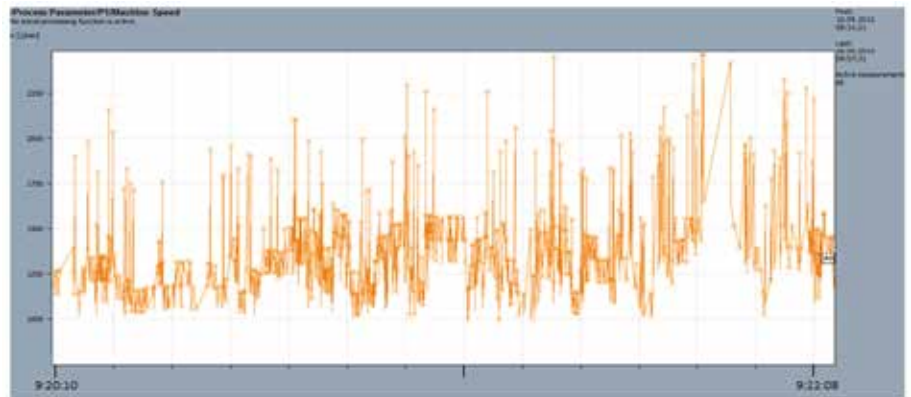


Abbildung 4: Kontinuierliche Drehzahlschwankungen

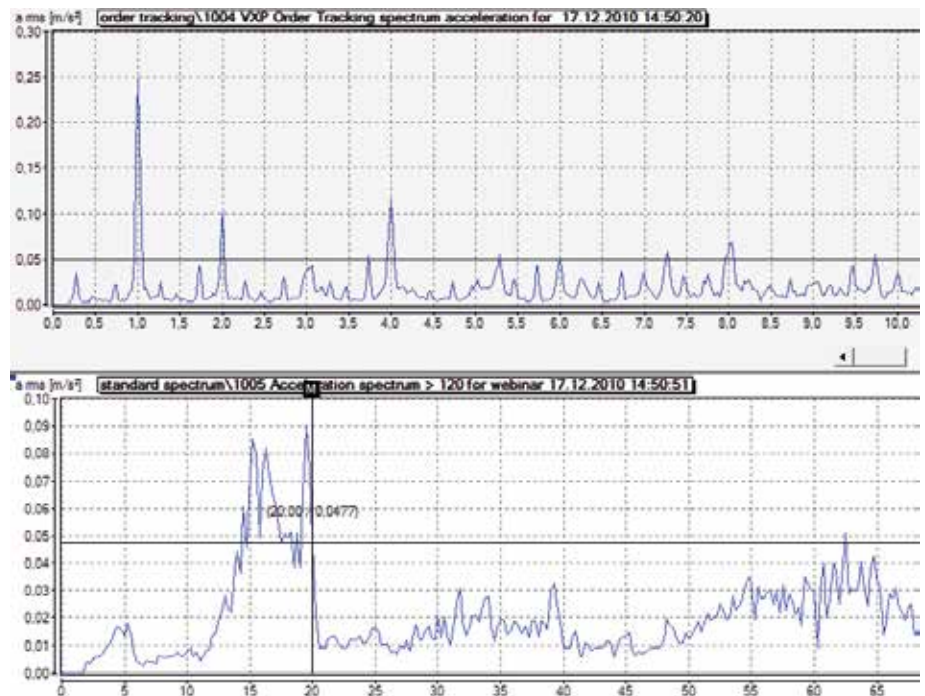


Abbildung 5: Oben – Normales FFT-Spektrum  
Unten – "Verwischen" der Frequenz/des Spektrums aufgrund von Drehzahlschwankungen

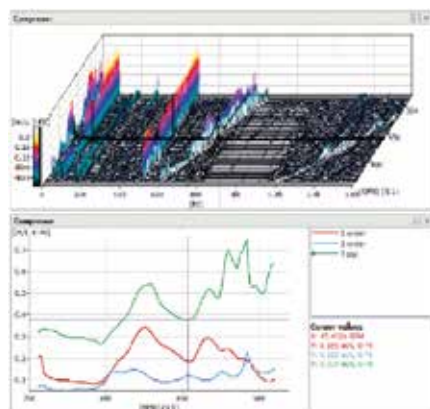


Abbildung 6: Oben – Waterfall-Plot, Größe im Vergleich zur Frequenz und zur Drehzahl  
Unten – Scheibe entlang der Z-Messrichtung (Drehzahl) einer Ordnung

Rohdaten in X-, Y- und Z-Messrichtung ist als "Waterfalldiagramm" bekannt, während die extrahierten Komponenten als "Scheiben" (entlang der Z-Achse) bezeichnet werden, Abbildung 6.

Diese Methode der Ordnungsverfolgung wird im Gegensatz zum kontinuierlichen Online-Monitoring am häufigsten und grundsätzlich zur Ermittlung der Maschinenschwingungen innerhalb des Betriebsdrehzahlbereichs angewendet. Die extrahierten Scheiben im Vergleich zur Drehzahl (Z-Messrichtung) zeigen dem Analysten, wie die Größe der einzelnen Frequenzkomponenten, wie etwa 1X,

bestimmte natürliche Frequenzen in der Maschinenstruktur auslösen kann. Auch hier muss die Messung wieder sorgfältig konfiguriert werden, um Verwischungen zu vermeiden. Hierbei sind die FFT-Aufzeichnungslänge ( $T^*$ ), das Drehzahlintervall und die Anstiegsgeschwindigkeit zu berücksichtigen.

$$T = \frac{LOR}{F_{max}} = \frac{1}{\Delta f}$$

where:

$T$  - FFT record length in seconds  
 $LOR$  - Lines of resolution  
 $F_{max}$  - Maximum frequency range  
 $\Delta f$  - FFT line spacing (bandwidth)

Die Ordnungsanalyse hingegen synchronisiert die FFT-Abtastrate mit der Maschinendrehzahl. Dieses Verfahren wurde bisher in Echtzeit mit einem Verfolgungsfrequenzmultiplikator durchgeführt. Hierbei wurde die Abtastfrequenz als integrales Vielfaches (Ordnung) der Drehzahl abgeleitet.

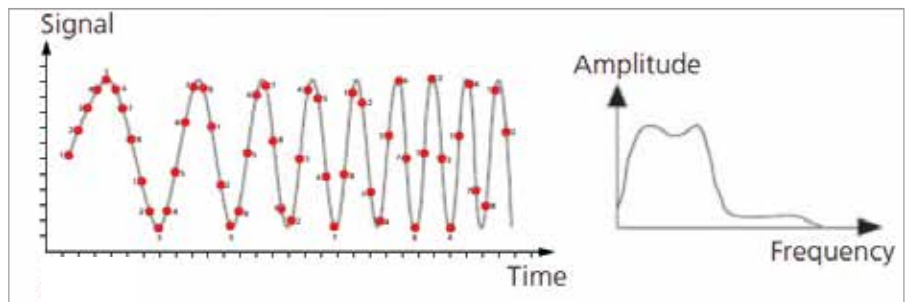


Abbildung 7: Feste FFT-Abtastrate führt zu Verwischung bei veränderlicher Drehzahl

In der modernen digitalen Signalanalyse werden das Zeitsignal und das Drehzahlssignal aufgezeichnet und die Ordnungsanalyse erfolgt in der Nachbearbeitung, wobei die Interpolation des Drehzahlssignals eine Resampling-Rate ergibt, die auf das Zeitsignal angewendet wird. Die daraus folgende FFT erzeugt das Ordnungsspektrum.

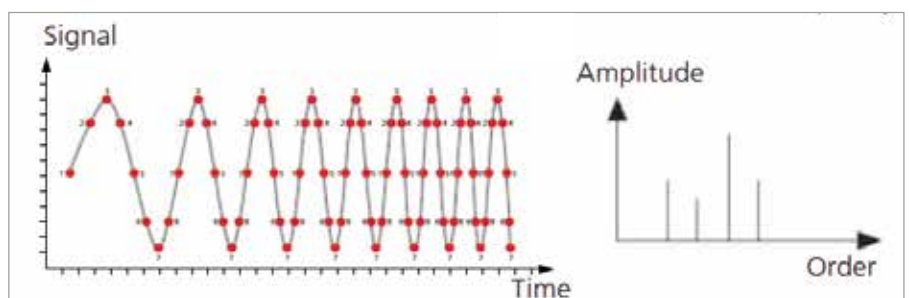


Abbildung 8: Synchronisierte Abtastrate mit Drehzahlergebnissen in diskreten Ordnungen

Moderne Online-Schwingungsmesssysteme liefern Betreibern unter Verwendung der Ordnungsanalyse eine zuverlässige und wiederholbare Methode für den Vergleich der Ordnungsspektren und bilden den tatsächlichen Maschinenzustand ab. Verfälschungen durch Drehzahländerungen werden so herausgefiltert, Abbildung 9.

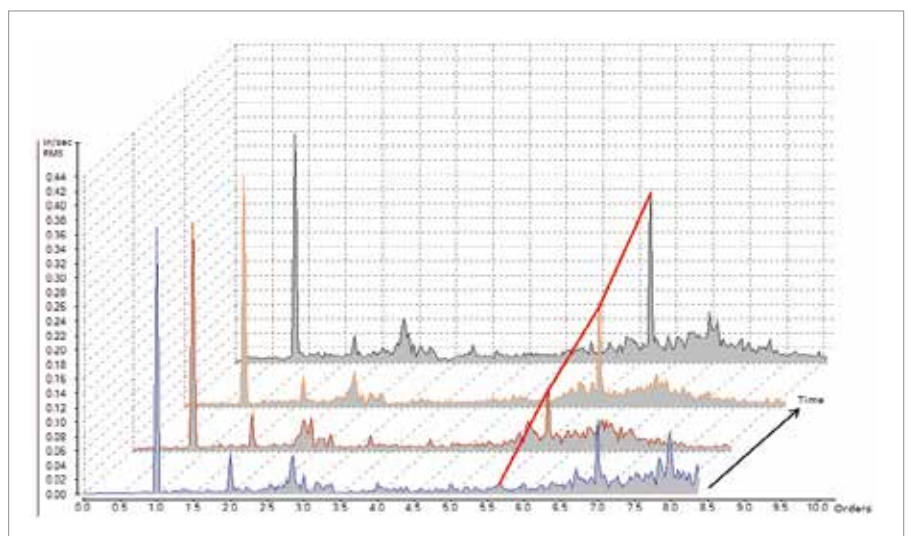


Abbildung 9: Ordnungsspektrum im Vergleich zur Zeit

## Hardware-Installation & Logistik

Die Auswahl der Maschinen und der entsprechenden Messpunkte unterliegt Kriterien, die mit der Überwachung stationärer Anlagen vergleichbar sind, wie etwa Kritikalitätseinstufung, historische Wartungsdaten, Zugänglichkeit, Sicherheitserwägungen etc.

Einige speziell mit mobilen Bergbaumaschinen verbundene Punkte bedürfen jedoch einer eingehenderen Betrachtung:

- Sensorkonnektivität und Zugänglichkeit
- Standort der Maschine im Bergwerk
- Netzwerkkommunikation und PC-Softwarekonfiguration

Sensoren wie etwa Beschleunigungssensoren werden für den Einsatz in widrigen industriellen Umgebungen entwickelt. Während Kabelkanäle in stationären Anlagen in eine relativ statische Umgebung

eingebettet sind, benötigen Sensorkabel für mobile Maschinen einen zusätzlichen Schutz gegen äußerliche Beschädigungen, etc. In diesen Anlagen werden Hydraulikschläuche mit kleinem Durchmesser erfolgreich eingesetzt, Abbildung 10.



Abbildung 10: Mini-Beschleunigungssensor, Gehäuse und Hydraulikschlauch-Kabelschutz

Das Anbringen von Bohrungen für die Montage der Messwertgeber ist oftmals insbesondere während der Garantiefri-  
sten nicht möglich, weil viele OEM-Hersteller nicht mit dem der Schwingungsüberwachung zugrunde liegenden Prinzip vertraut sind bzw. ganz einfach der Anbringung nicht genehmigter Komponenten durch Dritte widersprechen.

Einige große Herstellerrüsten rüsten ihre Aggregate bereits vorab mit Montage-

möglichkeiten für externe Aufnehmer aus. Die vorgesehenen Montagepunkte sind jedoch leider oftmals nicht optimal für die Messwerterfassung geeignet. Als Lösung können Messaufnehmer dann an die Maschine geklebt werden.

Moderne Monitoring-Systeme nutzen die TCP/IP-Netzwerkcommunication und können mit einem Funkmodem für die Kommunikation mit dem internen Wi-Fi-Netzwerk ausgestattet werden.

Einige Hersteller von Online-Schwingungsüberwachungslösungen bieten einen Hosting-Service für die Software und die Daten über Cloud-Server an. Diese Option wird zunehmend beliebter und bietet viele Antworten auf die Fragen der internen Netzwerksicherheit und des Zugangs für Drittanbieter (für den technischen Support, System-Upgrades etc.).



Abbildung 11: Montageblock für den Beschleunigungssensor – DE-Motor

Die Vernetzung der Anlage erfordert sorgfältige Planung, die Offenlegung von Informationen und genaue Kenntnis der Verantwortung für die Daten. Die IT-Abteilung spielt eine wesentliche Rolle bei der Installation der Software, der Konfiguration des Netzwerks und für den Zugang des Anbieters über die Cloud, TeamViewer™ oder Remote-Desktop-Anwendungen. Darüber hinaus müssen vollständig mobile Bergbaumaschinen wie etwa Schwerlast-Lkw aufgrund der Wi-Fi-Reichweite an einem Datenwegpunkt anhalten, um Messungen in das Netzwerk hochzuladen.

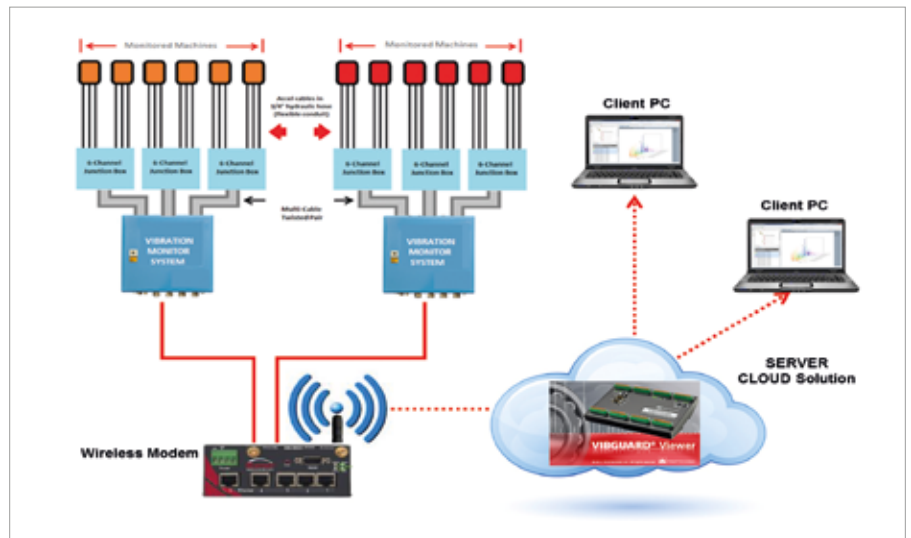


Abbildung 12: Übersicht der Schwingungsüberwachung

## PC-Anwendung – Konfiguration

Bergwerksleiter, Betreiber, Planer und Wartungsmitarbeiter SIND KEINE SCHWINGUNGSANALYSTEN. Sie benötigen zeitnahe nutzbare Informationen über den Zustand der Maschinen über eine schnelle und unkomplizierte Schnittstelle, ohne tagelang auf Schwingungsanalyseberichte warten zu müssen.

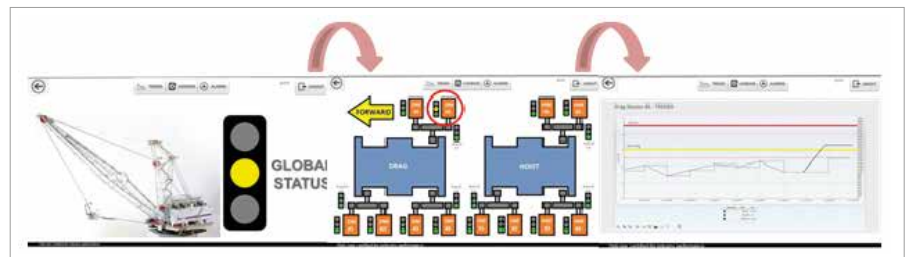


Abb. 13: Eine vereinfachte HMI\* liefert zeitnahe Maschinenzustandsdaten \*Mensch-Maschine-Schnittstelle

## Zusammenfassung

Mobile Bergwerksmaschinen erfordern hohe Kapitalkosten. Sie verursachen hohe Betriebs- und Wartungskosten und sind von entscheidender Bedeutung für die Produktivität des Bergwerks. Schwingungsüberwachung ermöglicht seit vielen Jahren erhebliche Kosteneinsparungen in der Wartung und dem Betrieb stationärer Anlagen.

In Anbetracht der Fortschritte der modernen Signalverarbeitung, der Konstruktion der Messwertgeber und der Netzwerkoptionen können Betreiber mobiler Maschinen jetzt damit beginnen, die Vorteile der Schwingungsüberwachung wie etwa reduzierte Stillstandszeiten, Senkungen der Betriebs- und Wartungskosten, reduzierte Ersatzteilverräte, optimierte präventive Wartungsterminpläne und eine verbesserte Anlagenverfügbarkeit zu nutzen. Betriebs-

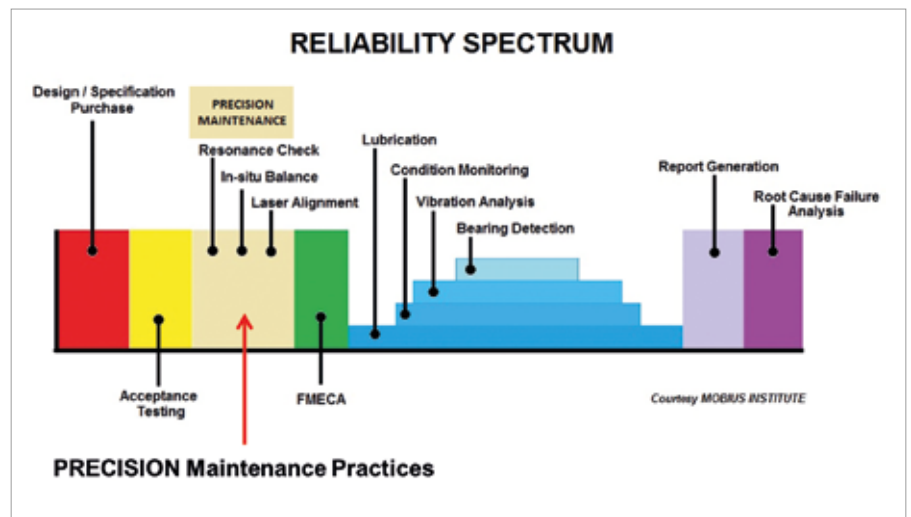


Abb. 14: Betriebssicherheitspektrum

sicherheitsbasierte Wartung rückt damit weiter in greifbare Nähe.

Bedenken Sie ... "Wenn Sie etwas haben möchten, das Sie noch nie hatten, müssen Sie etwas tun, das Sie noch nie getan haben."

**Autor:****Ron Newman,**

Sales & Technical Support,  
PRUFTECHNIK Canada,  
rnewman@pruftechnik.ca

**Über PRÜFTECHNIK:**

Der PRÜFTECHNIK-Konzern setzt mit seinen Niederlassungen und Partnern in mehr als 70 Ländern weltweit immer wieder neue Maßstäbe durch innovative technische Weiterentwicklungen im Bereich der Maschinenausrichtung und Schwingungsmesstechnologie, um die Betriebssicherheit von Maschinen und Anlagen zu maximieren und optimieren.

**Ansprechpartner für Presseanfragen**

Anne-France Carter  
Tel.: +49 89 99616-235  
anne-france.carter@pruftechnik.com

PRÜFTECHNIK Dieter Busch AG  
Oskar-Messter-Str. 19-21  
85737 Ismaning, Deutschland  
www.pruftechnik.com