



Foto: RWE AG

**Bruno van den Heuvel**

## Condition Monitoring für eine Instandhaltung 4.0

Wenn der Begriff Industrie 4.0 die Vernetzung durch Internet-Technologien bedeutet von Produkten, Prozessen und Produktionsmitteln, die mit intelligenter Sensorik bestückt sind, und Instandhaltung 4.0 die umfassende Digitalisierung, Überwachung und Auswertung aller Produktionsanlagen anstrebt, dann muss Condition Monitoring in diesem Umfeld klare Aussagen machen, aus denen automatisch eindeutige Handlungsvorgaben für Produktion und Instandhaltung abgeleitet werden. Der Beitrag beschreibt einige wichtige Randbedingungen, technische Anwendungen sowie Möglichkeiten und Grenzen eines zeitgemäßen Condition Monitorings.

Die RWE Power AG ist eine deutsche Stromerzeugungsgesellschaft und verfügt im Rheinischen Braunkohlenrevier über eigene und langfristig nutzbare Braunkohlevorräte, die im Tagebau mit einer kontinuierlichen Gewinnungs- und Fördertechnik abgebaut werden. Markenzeichen dieser Technik sind Schaufelradbagger, Bandförderanlagen und Absetzer sowie eine unternehmenseigene Schwerlasteisenbahn.

Da für die Instandhaltung der Tagebauanlagen ca. 35 % der Primärkosten aufgewendet werden, stellt sie nicht nur einen wesentlichen Kosten-, sondern auch einen bedeutenden Wettbewerbsfaktor dar und wird als eine Kernaufgabe eingestuft und als Kernkompetenz strategisch und operativ ausgeführt. Dies betrifft alle vier Teilaspekte der Instandhaltung von der Wartung und Inspektion über die Instandsetzung bis zur Verbesserung. In diesem Umfeld besteht die Aufgabe des Condition Monitoring darin, durch Herleitung

treffsicherer Zustandsinformationen die Festlegung angemessener Instandhaltungsentscheidungen für eine verlässliche Produktionsplanung zu unterstützen und so eine Einbindung in eine Instandhaltung 4.0 zu ermöglichen. Das im Unternehmen vorhandene Maschinendiagnostikerwissen zur Umsetzung einer vorausschauenden zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie wird im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses ständig erweitert durch eine Inspektion und Begutachtung aller ausgebauten und instand zu setzenden Komponenten.

### Auswahl von Instandhaltungsstrategien

Wenn die technische Verfügbarkeit der Fördergeräte und Förderanlagen signifikant über dem tatsächlichen Zeitgrad liegt, kann der aktuelle Einsatz der Anlagen in einem immer volatileren „Strommarkt“ so gesteuert werden, dass zusätzliche Erlöse generiert bzw.

Energiekosten reduziert werden können, wenn kurzfristig und für einen begrenzten Zeitraum Tagebau-Produktionsanlagen stillgesetzt und der dann nicht benötigte Strom an der europäischen Strombörse EEX angeboten wird, wenn hier der Preis im Tagesverlauf stark angestiegen ist.

Umgekehrt kann die Produktion genau dann forciert werden, wenn der Börsenstrompreis kurzfristig sehr niedrig ist. Die technische Verfügbarkeit der Anlagen wird durch eine risikobasierte und verfügbarkeits- bzw. zuverlässigkeitsorientierte Auswahl und Anwendung von angemessenen Instandhaltungsstrategien gewährleistet. Hierdurch sollen diejenigen Instandhaltungsaktivitäten ermittelt und durchgeführt werden, die nötig sind, um die geforderte Funktions- und Leistungsfähigkeit einer Maschine zu erhalten.

Wenn im Rahmen der Strategieauswahl die Entscheidung für die zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie

fällt, muss für den Teilaspekt der Inspektion unter Abwägung von Kosten-Nutzen Gesichtspunkten eine für die betrachtete Maschine angemessene und aussagefähige Diagnosetechnik zur rechtzeitigen Entdeckung aller möglichen und relevanten Schadenstypen ausgewählt werden.

Der Einsatz der diagnostisch inspektiven Instandhaltung erfordert zuverlässige Diagnosesysteme, zuverlässige Diagnoseergebnisse und umfangreiche Erfahrung bei der Festlegung des Zusammenhanges zwischen dem Messergebnis und dem Bauteilzustand. Die Umsetzung einer auf Messdaten basierenden zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie setzt ein hohes Maß an anlagenspezifischen Kenntnissen und eine hochentwickelte Sensorik, Messdatenverarbeitung und Informationsgewinnung voraus.

Für die Anlagen, Maschinen und Komponenten muss mit Hilfe geeigneter Überwachungs- und Diagnose-techniken der Zustand jederzeit bestimmt werden und bekannt sein, um ungeplante Stillstände zu vermeiden, mögliche Restlaufzeiten bis zu einer erforderlichen Instandsetzungsmaßnahme zu prognostizieren und diese möglichst im Schatten produktionstechnisch erforderlicher und geplanter Betriebsstillstände durchzuführen.

**Technische Diagnostik**

Die technische Diagnostik umfasst alle technischen Maßnahmen zum demontagelosen Ermitteln des Zustandes technischer Systeme während des Betriebs. Ziel der Diagnostik ist die quantitative Ermittlung des technischen Zustands und eine vorausschauende Bewertung der zukünftigen Entwicklung des Zustands. Um während des laufenden Betriebs Zustandsinformationen zu erlangen, erfasst man mit Hilfe einer geeigneten Messtechnik sogenannte Diagnosemerkmale, nämlich physikalische Messgrößen, die den technischen Zustand widerspiegeln und für die Zustandsbeurteilung des betrachteten Bauteils geeignet sind. Mit Hilfe eines Diagnosemodells (siehe Abb. 1) versucht man, den Zusammenhang zwischen der beobachteten Entwicklung eines messbaren Diagnosemerkmals und der eigentlich interessierenden Entwicklung des Zustandsmerkmals quantitativ zu beschreiben. Hierfür

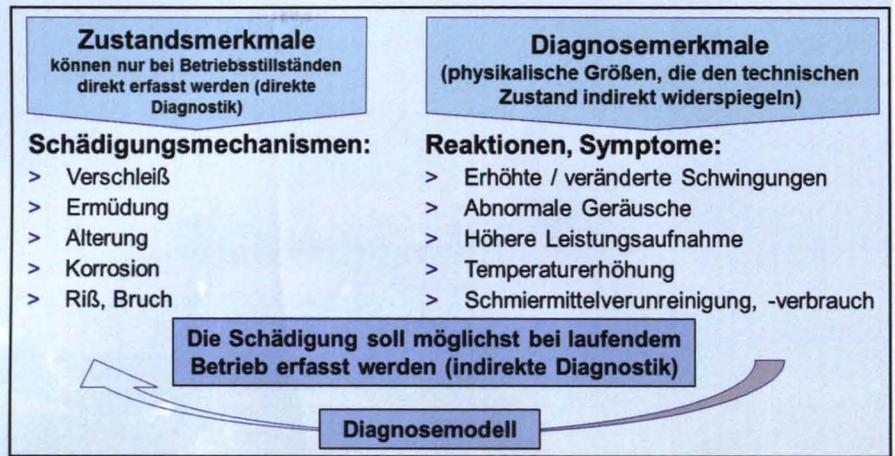


ABBILDUNG 1: DIAGNOSEMODELL MIT ZUSTANDS- UND DIAGNOSEMERKMAL

sind ein hohes Maß an Expertenwissen und theoretischen Analysen erforderlich, da keine allgemeingültigen Grenz- oder Referenzwerte, Richtlinien oder Herstellerangaben zu zulässigen Werten bestimmter Messgrößen bzw. Diagnosemerkmalen existieren und weder physikalisch noch ingenieurmäßig allgemeingültig hergeleitet werden können.

Condition Monitoring soll also mit geeigneten technischen Hilfsmitteln den Anlagenzustand erfassen, interpretieren und bewerten in Hinblick auf erforderliche Instandhaltungsmaßnahmen. Ferner sollen Informationen über Betriebsbelastungen und Maschinenzustände gewonnen werden zur Anlagenüberwachung, zur wissenschaftlichen, d.h. zur zeitnahen zustandsorientierten Instandsetzung und zur systematischen Verbesserung der Systeme, Komponenten und Prozesse.

Damit das Condition Monitoring den Anspruch der automatischen Überwachung von Maschinen und Anlagen sowie der automatischen und rechtzeitigen Generierung treffender Instandhaltungsrelevanter Diagnosen erfüllen kann, müssen aus der Vielzahl der

Messdaten die wenigen gewünschten Informationen herausgearbeitet werden mit einer sehr hohen Fehlererkennungsrate, allerdings ohne Fehlalarme zu generieren.

**Messdatenbasierte Herleitung von Instandhaltungsentscheidungen**

Eine der häufig angewendeten Methoden des Condition Monitoring ist die körperschallbasierte Maschinendiagnose, häufig auch „Schwingungsdiagnose“ genannt. Die Kernfrage lautet: „Wie kann man aufgrund des sich ändernden Diagnosemerkmals „Schwingbeschleunigung“ ein sich änderndes Zustandsmerkmal, z.B. Laufflächenpitting in einem Wälzlager, diagnostizieren, um so zuverlässig einen Schadens- von einem Gutzustand zu unterscheiden?“

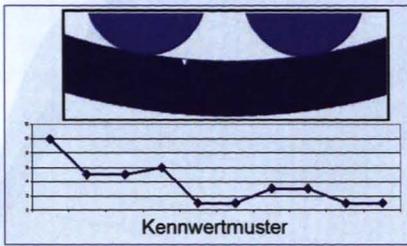
Dazu ist vorab eine grundlegende und systematische Beschäftigung mit den möglichen Schädigungen von Wälzlagern, daraus resultierenden Körperschallemissionen und den unterschiedlichen Signalverarbeitungs- und Diagnosetechniken sinnvoll. Die VDI Richtlinie 3832 „Körperschallmessungen zur Beurteilung von Wälzla-

Wälzlagerdiagnose mit Kennwertmustern											
Kennwert, Merkmal	Zeitbereich						Frequenzbereich (HK)				
	Crestfaktor	Schwellenfaktor	Impulssumme	Schadensfaktor	RMS (v(t))	RMS (a(t))	RMS (a(t) HK)	LDZ	Schleißfaktor	Schleißquotient	u.s.w.
Ausprägung											
Muster											
Diagnoseaussage											

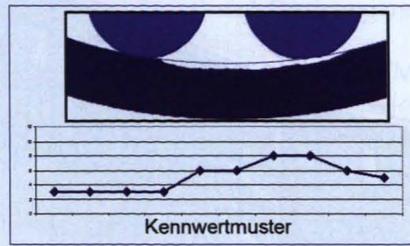
Bewertungsskala: 0 bis 10 (0: nicht vorhanden, 10: sehr stark ausgeprägt)

- Ein Laufflächenschaden prägt sich in den Stadien seiner Entwicklung in den jeweiligen Kennwerten und Mustern unterschiedlich aus.
- Die Kennwertmuster sind unabhängig von dem Wälzlagertyp und der Drehzahl

ABBILDUNG 2: WÄLZLAGERDIAGNOSE MIT KENNWERTMUSTERN FÜR EINFACHE WÄLZLAGERUNGEN



minimaler Laufflächenschaden



großflächiger Laufflächenschaden

**ABBILDUNG 3: KENNWERTMUSTER UNTERSCHIEDLICH STARK GESCHÄDIGTER WÄZLAGER**

gern in Maschinen und Anlagen“ gibt hierfür eine Reihe wertvoller Hinweise, indem sie aus diagnostischer Sicht zwischen wälzlagerinduzierter und wälzlagerfremder Körperschallanregung unterscheidet, was zu einer Einteilung der Verwendung von Wälzlageren bzw. von Maschinen in sogenannte einfache und in komplexe Wälzlagerungen führt. Um einfache Wälzlagerungen handelt es sich bei zweifach gelagerten Rotoren mit geringer Exzentrizität, z.B. bei Ventilatoren, Elektromotoren, Pumpen usw., die sich dadurch auszeichnen, dass bei diesen Maschinen keine weiteren Körperschallquellen existieren, die stärkere Schallemissionen erzeugen als die geschädigten Wälzlager selbst. Bei komplexen Wälzlagerungen befinden sich auf der rotierenden Welle oder integriert im Gehäuse zusätzliche und dominante wälzlagerfremde Körperschallquellen, z.B. Verzahnungen, die bereits im ungeschädigten Normalzustand deutlich größere Schallemissionen verursachen als geschädigte Wälzlager.

#### Maschinendiagnose einfacher Wälzlagerungen

Diese Tatsache muss zu unterschiedlichen Vorgehensweisen der Messsignalaufbereitung und -verarbeitung bei den beiden Ausführungsarten der Wälzlagerungen führen. So können für die Diagnose einfacher Wälzlagerungen breitbandige Kennwerte aus dem Zeit- und Frequenzbereich des gemessenen Körperschallsignals verwendet und interpretiert werden. Dies sind verschiedene Signalenergiekennwerte wie der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit, Effektivwerte von Schwingbeschleunigungsrohsignal und -hüllkurvensignal, ferner Betragsmaximalwerte, Crest-Faktor, Kurtosis-Faktor oder herstellereigentliche Werte wie SPM, BCU, SEE, Spike Energy usw.

Viele dieser Kennwerte sind für sich alleine ungeeignet für die Wälzlagerzustandsdiagnose, erst aus der gleichzeitigen Betrachtung der Kennwerte und Merkmale (siehe Abb. 2) können Muster bestimmt werden, die auf einen bestimmten Schadenstyp und im Falle von Wälzlager-Laufflächenschäden auch auf ein Schadensmaß hinweisen, da diese sich in den unterschiedlichen Stadien ihrer Entwicklung in den Kennwerten und Mustern unterschiedlich ausprägen und in weiten Grenzen unabhängig sind von Lagerdrehzahl und Lagerlast. So kann auch bei einer einmaligen Messung aus dem Kennwertmuster (siehe Abb. 3) eine Aussage über die Schadensausprägung abgeleitet werden.

#### Maschinendiagnose komplexer Wälzlagerungen

Da bei komplexen Wälzlagerungen der wälzlagerinduzierte Körperschall i.d.R. wesentlich kleiner ist als der wälzlagerfremde, können hier natürlich keine breitbandigen Kennwerte von Beschleunigungs-Zeitsignalen herangezogen werden, die ja bevorzugt die dominante Körperschallquelle bewerten, sondern frequenzselektive Kennwerte für die Beurteilung der Amplituden aller Frequenzen, insbesondere der Erreger- bzw. Defektfrequenzen.

Zur Konzentration auf die relevanten Frequenzen wird mit Hilfe einer sogenannten Signifikanzanalyse die Bedeutung jeder Amplitude relativ zu den Amplituden der benachbarten Frequenzen überprüft und gleichsam „normiert“. Diese Signifikanz-

analyse reduziert deutlich die Anzahl der Frequenzen, die anschließend dahingehend untersucht werden, ob sie den vorliegenden Erreger- bzw. möglichen Schadensfrequenzen zugeordnet werden können und ob bestimmte Muster wie z.B. Seitenbänder erkennbar sind. Die so gefundenen signifikanten Frequenzen und Muster werden nun automatisch auf eine Vielzahl von wissens- und erfahrungsbasiert aufgestellten Regeln hin abgefragt und bewertet, um so einen vorliegenden Schaden zu detektieren und möglichst dessen Ausprägung abzuschätzen.

Auf diese Weise kann für die Instandhaltung und die Produktion eine Information oder eine Handlungsempfehlung zum weiteren Vorgehen aufbereitet, eine klare Aussage über die verbleibende Restnutzungsdauer von Wälzlageren und Verzahnungen aber nicht abgeleitet werden.

*Autor:*

Jahrgang 1952; Nach dem Maschinenbaustudium an der RWTH Aachen war Dr.-Ing. Bruno van den Heuvel Leiter der Abteilung Maschinendynamik, Messtechnik bei der MEC Maschinenbau, Entwicklung und Consulting GmbH, Eschweiler und ist seit 1990 Oberingenieur und Leiter der Abteilung Diagnose/Dienstleistungen des Technikzentrum Tagebaue der RWE Power AG. Zu den Aufgaben der Abteilung, zählen unter anderem Risikoanalysen und Auswahl von Instandhaltungsstrategien.

Von 2008 bis 2013 hatte er einen Lehrauftrag der RWTH Aachen, Fakultät für Georesourcen und Materialtechnik. Seit 2010 hat er einen Lehrauftrag der FH Dortmund für das Fach: „Instandhaltung und Instandhaltungsmanagement“.



**Dr.-Ing.**

**Bruno van den Heuvel**

**Oberingenieur und Leiter der Abteilung Diagnose/Dienstleistungen des Technikzentrum Tagebaue der RWE Power AG**