

Schallemissions- und Waveletanalysen zur frühzeitigen Schadenserkennung an hochbelasteten rotierenden Bauteilen

Christian SCHEER, Wilfried REIMCHE, Friedrich-Wilhelm BACH
Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover

Kurzfassung. An Maschinen und Anlagen im industriellen Produktionsprozess werden höchste Anforderungen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit, hoher Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit gestellt. Mit einer zustandsbezogenen Instandhaltung kann ein Beitrag zur Verbesserung der Materialökonomie und der Auslastung der technischen Arbeitsmittel angestrebt und erreicht werden. Basis ist hier die „Information“ über den technischen Zustand einzelner Maschinenkomponenten bzw. der gesamten Anlage.

Dabei zeigt sich die Körperschall- und Schwingungsanalyse unter Einsatz von statistischen Zeit- und Frequenzkennwerten in Kombination mit Spektral- und Korrelationsanalysen als geeignetes Hilfsmittel, Schäden und unzulässige Betriebsbedingungen zu erkennen und zu lokalisieren. Einen Schaden an einer Anlage schwingungsdiagnostisch zu erfassen, ist allerdings nur möglich, wenn der Fortschritt des Schadens bereits eine Beeinträchtigung des Schwingungsverhaltens verursacht hat. Insbesondere beim Entstehen von Anrissen und deren Fortschritt in rotierenden Wellen und Zahnrädern ist eine Diagnose mit der klassischen Schwingungsanalyse nur mit einer relativ kurzen Vorwarnzeit zum Ausfall möglich.

Eine frühzeitige Schadenserkennung von Anrissen in Wellen und Zahnrädern ist z.B. durch die Analyse von Schallemissionssignalen möglich. Die Schallemissionsanalyse ist ein bewährtes Verfahren, um Risse in Tanks, Druckbehältern, Rohrleitungen und statischen Strukturen zu erkennen. Sie nutzt im Gegensatz zur Schwingungsanalyse Sensoren, die im Bereich ihrer Resonanzfrequenz von ca. 50 kHz bis zu 2 MHz arbeiten. Während ein Schwingungsaufnehmer das physikalische Bauteilverhalten, wie nieder- und hochfrequente Vibrationen bis ca. 200kHz erfasst, ist ein Schallemissionsaufnehmer sehr empfindlich bei noch höheren Frequenzen, um Ultraschallimpulse durch Gefügeveränderungen zu detektieren, z.B. durch Rissentstehung, Rissfortschritt oder auch Korrosion. Da eine reine Betrachtung der Anzahl und Intensitäten der auftretenden Emissionen in diesem Fall aufgrund der überlagerten Emissionen durch Wälzlager etc. nicht ausreicht, ist eine frequenzselektive Beurteilung dieser besonders kurzzeitigen Anregungen notwendig. Hier findet die Wavelet-Analyse Anwendung, die gegenüber der klassischen Frequenzbereichsanalyse mittels FFT eine deutlich höhere Auflösung im Zeitbereich insbesondere bei kurzen Messzeiten bietet. Am Beispiel der Rissinitiierung und des Rissfortschritts im Zahnfußbereich eines Zahnrades ergeben sich frühzeitig Veränderungen im Wavelet-Diagramm, welche sich drehperiodisch wiederholen, während eine sich entwickelnde Grübchenbildung ein anderes Verhalten zeigt. Bei beiden unterschiedlichen Schäden zeigt sich eine charakteristische Entwicklung über der Lastspielzahl.

1. Einführung

1.1 Schallemissionsanalyse

Das Verfahren der akustischen Emissionsanalyse wird seit Jahren erfolgreich zur Prüfung von Tankanlagen, Druckbehältern, Rohrleitungssystemen, in der Werkstoffprüfung unter Laborbedingungen und zur Leckdetektion eingesetzt [1,2]. Diese Prüftechnik basiert auf der Erkenntnis, dass viele Werkstoffe unter Belastung Schallimpulse emittieren, deren Frequenzspektrum von wenigen Hertz bis zu einigen Megahertz reichen kann.

Die Ursachen für diese zum größten Teil im Ultraschallbereich liegenden Schallemissionen sind unterschiedlicher Natur, wobei im Fall metallischer Werkstoffe vor allem in der Werkstoffstruktur ablaufende Versetzungsbewegungen und Zwillingsbildungen bei plastischer Verformung, Rissbildung, Rissfortpflanzung und Rissreibung zu nennen sind. Darüber hinaus generieren auch störende Einflüsse, wie Zunderabplatzungen und Bauteilreibungen hochfrequente Schallemissionsereignisse [3,4,5].

Feste Materialien dehnen oder stauchen sich unter Last. Je höher die Belastung, desto größer ist die gespeicherte elastische Energie. Wird die Elastizitätsgrenze überschritten, kommt es je nach Zähigkeit des Materials direkt zu einem Sprödbbruch oder zur plastischen Verformung und erst nach entsprechender Dehnung zu einem Verformungsbruch.

Ein reales Bauteil beinhaltet üblicherweise verschiedenartige Fehlstellen, wie Versetzungen, nichtmetallische Einschlüsse, Seigerungen, Poren, Lunker, Schweißnahtbindefehler, o.ä. in der Werkstoffstruktur. Unter einer entsprechenden statischen oder dynamischen Bauteilbelastung kommt es zu einer globalen elastischen Verformung mit erhöhten Spannungsspitzen im Bereich dieser Fehlstellen. Eine lokal hohe Beanspruchung führt dann örtlich zu Fließvorgängen bis hin zur Bildung von Mikrorissen im Werkstoff, die das Material an dieser Stelle ruckartig entspannen.

Die auftretende lokale Versetzung ist die Ursache eines kurzzeitigen Bewegungsstoßes im Werkstoff. Es folgt ein akustisches Emissionsereignis mit der Entstehung und Ausbreitung einer elastischen Welle, die mit geeigneten Sensoren aufgenommen, verstärkt und analysiert werden kann. Die Anregung des zu analysierenden Schallereignisses kommt hierbei aus dem mechanisch belasteten Prüfobjekt selbst und ist daher nicht beliebig oft reproduzierbar.

1.2 Wavelet-Analyse

Bei der Wavelet-Analyse handelt es sich um ein relativ neues Verfahren, welches es ermöglicht ein Signal in einzelne Frequenzkomponenten zu zerlegen. Ein häufiges Verfahren zur Signalanalyse ist die Extraktion von Frequenzkomponenten aus einem Zeitsignal, deren Veränderungen über der Zeit betrachtet werden. Neben der Short-Time-Fourier-Transformation (SFFT) ist die Wavelet-Transformation ein Verfahren zur Darstellung des Frequenz-Intensität-Zeitverhaltens, wobei bei hohen Frequenzen eine höhere zeitliche Auflösung als bei der SFFT erreicht wird. Bei der Wavelet-Transformation wird ein so genanntes Mutter-Wavelet gewählt, welches sowohl in der Zeit als auch in der Frequenz kontinuierlich ist und dessen Mittelwert Null ergibt. In der Wavelet-Transformation wird nun das Mutter-Wavelet für jeden Abschnitt des Signals so skaliert, dass es in Frequenz und Amplitude am besten zu dem Signalabschnitt passt. Die Skalierungsfaktoren ergeben über der Zeit dargestellt die Frequenz- und Amplitudenkomponenten des Wavelet-Diagramms. Der Vorteil der Wavelet-Transformation ist, dass sich sowohl hoch- als auch niederfrequente Signalanteile in einer hohen Zeitauflösung darstellen lassen [7,8].

2. Schallemissionsanalysen an rotierenden Maschinen

Die konventionelle Schwingungsanalyse erkennt einen Riss in einer Welle oder einem Zahnrad erst, wenn das Zahneingriffsverhalten bereits gestört ist und sich dadurch das Schwingungsverhalten ändert [9]. Im Hinblick auf eine frühzeitige Schadenserkennung wurden daher auch andere Messverfahren auf ihre Eignung hin untersucht, Anrisse oder Verzahnungsschäden frühzeitig zu erfassen. Ein geeignetes Verfahren zur Detektion und Lokalisierung von Rissen in Tanks, Druckbehältern und Tragwerken ist die Schallemissionsanalyse (Acoustic Emission Analysis). Die Schallemissionsanalyse wurde ebenfalls bereits erfolgreich eingesetzt um in Versuchständen Grübchenbildung in Zahnflanken zu erkennen, wobei der Sensor direkt am Zahnrad angebracht war und das Signal aufwendig über die rotierende Welle abgeführt wurde [10,11].

Am vorhandenen Verzahnungsprüfstand für schrägverzahnte Zahnräder am Institut für Werkstoffkunde wurde daher die Schallemissionsanalyse angewendet, um Risse im Zahnfußbereich und Grübchenbildung in den Zahnflanken frühzeitig zu erkennen.

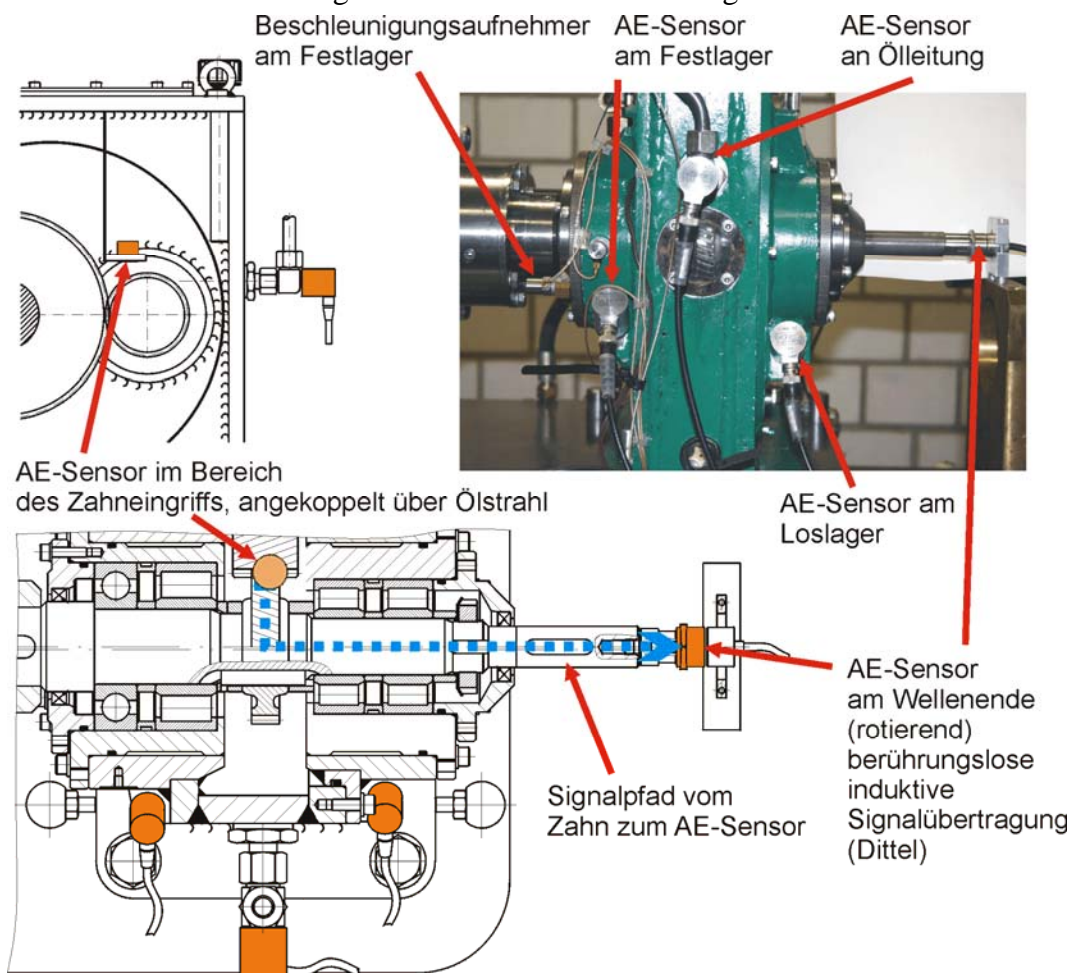


Abb.1: Anordnung der AE-Sensoren am Getriebe

Zusätzlich zu der Instrumentierung mit Beschleunigungsaufnehmern wurde ein Getriebe mit Schallemissionsaufnehmern an unterschiedlichen Messpositionen bestückt, welche aufgrund unterschiedlicher Signalpfade ausgewählt wurden (Abb.1). Zwei Schallemissionsaufnehmer wurden an den Lagergehäusen des Fest- und des Loslagers angebracht. Ein Aufnehmer befand sich an der Ölleitung und ein weiterer direkt im Ölstrahl im Bereich des Zahneingriffs, um durch eine Ankopplung über den Ölstrahl Signalinformation im Verzahn-

nungsbereich zu erfassen. Die Ankopplung eines Sensors über einen Ölstrahl wurde bereits erfolgreich zur Schadenserkennung an Wälzproben in einem Tribometer eingesetzt [12]. Weiterhin ist ein Schallemissionsaufnehmer am freien Wellenende der Testwelle platziert. Der Sensor selbst sitzt am Wellenende, die Signale werden berührungslos induktiv an einen Empfänger übertragen [14].

Zur Datenerfassung wurde ein Mehrkanal-Schallemissionsanalyzesystem eingesetzt, das statistische Methoden zur Auswertung der Signalanteile nutzt, wie Amplitude, Energieinhalt, Hits (überschreiten einer definierten Schwelle) und Counts (Anzahl der Überschwinger, die die Schwelle eine bestimmte Zeitdauer überschreiten) [6]. Zusätzlich wurden die Sensorsignale durch eine hochfrequente Messdatenerfassungskarte periodisch mit einer Abtastrate von 1MHz transient aufgezeichnet, um Signale über mehrere Wellenumdrehungen zu erhalten. Die Anordnung der unterschiedlichen Sensoren sowie der Signalpfad vom Zahn zum Sensor am Wellenende sind in Abb.1 dargestellt. Eine Positionierung eines Schallemissionsaufnehmers direkt am Zahnrad war aufgrund der Form und Abmessungen des Zahnrads nicht möglich, außerdem ist die Signalauskopplung eines Sensors am Zahnrad über die rotierende Welle nur mit sehr großem Aufwand möglich.

2.1 Schallemissionssignale ohne Bezug zu Verzahnungsschäden

Während erster Tests bei unterschiedlichen Drehzahlen und Belastungen, konnte der Einfluss der Betriebsparameter auf das Signal-Rausch-Verhältnis ermittelt und in deren Abhängigkeit für jeden Kanal der Schwellwert definiert werden, bei deren Überschreitung in Folge eines außergewöhnlichen Ereignisses eine Signalaufzeichnung erfolgt. Die Variation der Drehzahl zeigte, dass bei hohen Drehfrequenzen über 25Hz an der Testwelle der Pegel des Grundsignals ansteigt und höher liegt als die erwarteten Amplituden der durch Zahnrad-schäden erzeugten Schallemissionssignale. Diese hohen Amplituden der Schallemissionssignale sind auf den Anstieg dynamischer Signalkomponenten bei höheren Drehzahlen zurückzuführen, generiert durch den Wälzvorgang und den Zahneingriff. Unterschiedliche Laststufen von 200 bis 400Nm zeigten bei der Drehfrequenz von 25Hz keine signifikanten Einflüsse auf die Schallemissionssignale. In der folgenden Beschreibung der Schadensinitiierung und des Schadensfortschritts werden nur die Signale des Schallemissionsaufnehmers am Wellenende aufgezeigt. Die anderen Sensoren zeigten aufgrund ihrer komplexen Signalpfade keine signifikanten Signalinformationen über den Zustand des Testzahnrads.

Nach dem Einbau eines Testrades und Hochfahren des Versuchstandes treten während der ersten Betriebsstunden häufig eine sehr große Anzahl von Schallemissionen auf. Diese sind auf das Einlaufverhalten der Passfedern und der Passsitzflächen zwischen Zahnrad und Welle zurückzuführen. Nach ein paar Stunden sind die Sitzflächen eingelaufen und ein normaler Betriebszustand mit nur relativ wenig auftretenden Hits stellt sich ein. Weitere Störungen können auftreten bei einer Spielpassung und dadurch arbeitenden Sitzflächen zwischen Welle und Zahnrad, was zu einer erhöhten Anzahl von Schallemissionen mit hohen Amplituden führt. Auch das Brechen einer Passfeder als ein sich entwickelnder Schaden führt zu einem Anstieg der Hitrate. Generell ist zur Zeit eine Detektion von Verzahnungsschäden nur bei einem strammen Passsitz und nach erfolgtem Einlaufen und Durchwärmung der Anlage möglich.

Abb.2 zeigt einen Anfahrvorgang mit einer Spielpassung zwischen Zahnrad und Welle. Das Verhältnis der Hitrate zu anderen Eigenschaften der Schallemissionen, wie Amplitude und Energie lässt eine Zuordnung zu ihren Ursachen zu. Eine große Hitrate mit gleichzeitig großen Amplituden oder Energieinhalten lässt auf eine Entstehung in Sensornähe schließen, also im Sitzbereich zwischen Welle, Passfedern und Zahnrad. Aufgrund der größeren Entfernung des Zahneingriffs vom Sensor erreichen Emissionen von der Verzahnung den Sensor nur mit relativ geringer Amplitude. Die große Anzahl von Schallemissionen zu Beginn

mit gleichzeitig niedrigen Amplituden ist auf die Wälzlagerung zurückzuführen, da diese im Abstand einer charakteristischen Wälzlagerfrequenz auftreten. Nach ca. 3h ist in diesem Fall der Einlaufvorgang abgeschlossen, die Anzahl der Schallemissionen sinkt drastisch.

Schallemissionsmessungen Verzahnungsprüfstand, Sensor an Welle, Zahnrad 308

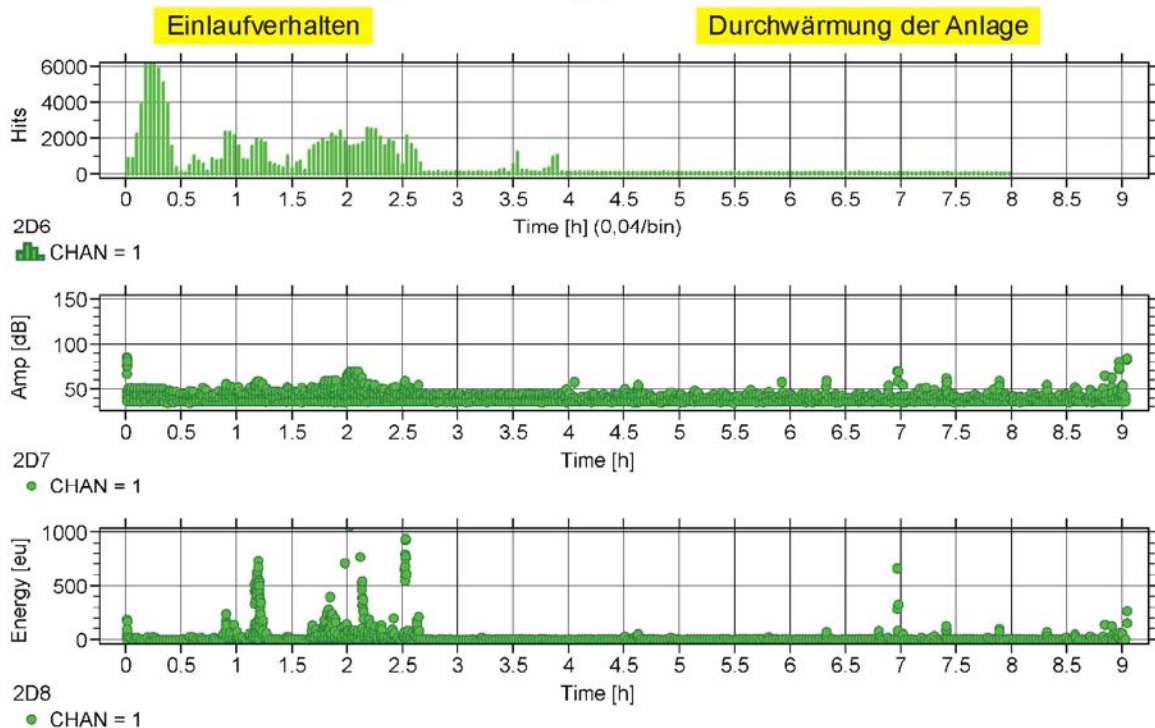


Abb.2: AE-Daten des Einlaufverhaltens

2.2 Detektion und Zuordnung von Verzahnungsschäden durch Schallemissionsanalyse

Den Verlauf von Merkmalen der Schallemissionssignale über der Zeit für den ungestörten Referenzzustand nach dem Einlaufen der Versuchsanordnung sowie von der Rissinitiierung über den Rissfortschritt bis zum Ausfall und Abschalten des Versuchstandes zeigt Abb.3. Zur Beschreibung der Schallemissionssignale ist hier das Merkmal „Anzahl der Hits pro Zeiteinheit“ dargestellt, welches häufig zur Detektion von Schäden verwendet wird. Im oberen Teil von Abb.3 ist die Anzahl der Hits während des Referenzzustandes sehr gering. Im unteren Teil ist die Rissinitiierung durch eine ansteigende Hitrate charakterisiert, die durch das Öffnen und Schließen des Risses bzw. durch den Rissfortschritt während eines Lastwechsels beim Zahneingriff entsteht. Mit zunehmender Lastwechselzahl folgt der Zahnbruch, wobei in diesem Fall nur ein Teil des Zahnkopfes ausgebrochen ist und somit noch ein Weiterbetrieb des Prüfstands möglich war.

Ein weiteres Beispiel zur Detektion von Verzahnungsschäden zeigt Abb.4 in Form einer sich entwickelnden Grübchenbildung. Während des Referenzzustands nach erfolgreichem Einlaufen treten nur sehr wenige Hits auf, während die Schädigung, in diesem Fall eine einsetzende Grübchenbildung, durch einen Anstieg der Hits charakterisiert ist. Im Gegensatz zur Rissinitiierung mit Zahnbruch als Folge ist bei der Grübchenbildung der Anstieg der Hitrate gering und es zeigt sich ein eher schwelender Verlauf über der Zeit.

Deutlichere Unterschiede zwischen der Entwicklung eines Risses und Grübchenbildung zeigen sich, wenn über einen längeren Zeitraum transient aufgezeichnete Signale des Sensors am Ende der Zahnradwelle betrachtet werden. In der angewandten mehrkanaligen Konfiguration des Schallemissionsanalyse-systems konnte für jedes Ereignis nur ein Zeitsignal (Wellenform) über eine Zeitdauer von 2ms aufgezeichnet werden, da ein Kompromiss zwischen Aufzeichnungsdauer und Speicherplatz gefunden werden musste. Um eine

Beurteilung des Verhaltens über mehrere Wellenumdrehungen zu ermöglichen, erfolgte eine transiente Aufzeichnung der Signale mit einem hochfrequenten Messdatenerfassungssystem über 250ms bei einer Abtastrate von 1MHz. Durch die Nichtlinearität des Schallemissionsaufnehmers wird die Amplitude des Zeitsignals einer Schallemission in erste Linie von Frequenzkomponenten im Hauptresonanzbereich des Sensors bestimmt. Um auch relevante Signalanteile außerhalb des Hauptresonanzbereichs beurteilen zu können, ist eine reine Betrachtung im Zeitbereich hier nicht ausreichend.

Schallemissionsmessungen Verzahnungsprüfstand, Sensor an Welle, Zahnrad 170

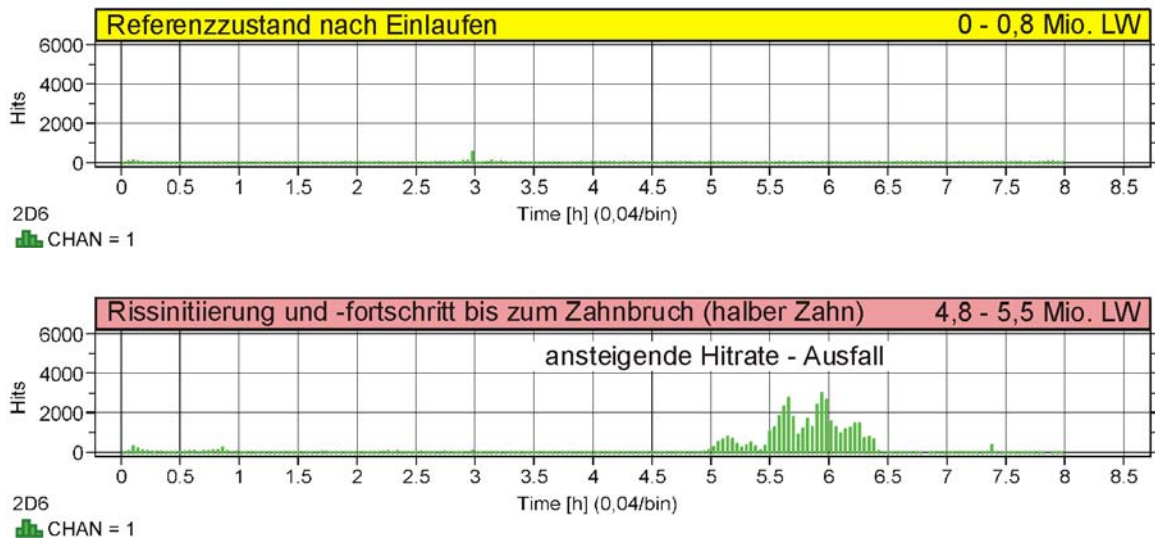


Abb.3: AE-Daten des Referenzzustands über Rissinitiierung bis zum Zahnbruch

Schallemissionsmessungen Verzahnungsprüfstand, Sensor an Welle, Zahnrad 179

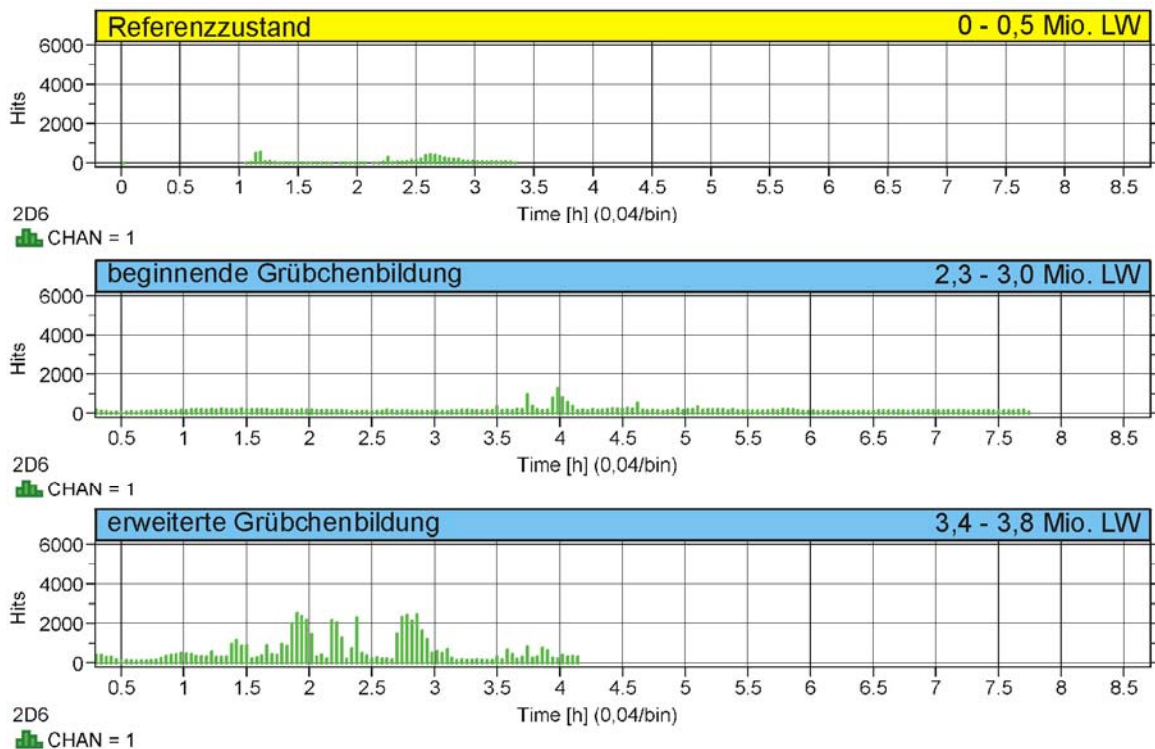


Abb.4: AE-Daten des Referenzzustands und Grübchenbildung

Die Zeit-Frequenz-Signalanteile einer Rissentwicklung im Vergleich zum Referenzzustand sind in Abb.5 dargestellt. Genutzt wurde hier die Wavelet-Transformation mit dem Morlet-Wavelet als Mutter-Wavelet. Zu erkennen sind sowohl im Referenzzustand, als auch bei der Rissentwicklung erhöhte Amplituden bei ca. 100kHz (einem Resonanzbereich des Sensors, bzw. der Messkette). Diese relativ niederfrequenten AE-Signalanteile werden vom Schallemissionsanalysesystem nicht erfasst, da bei 120kHz ein Hochpassfilter gesetzt ist. Deutlich ist die Rissentwicklung durch sehr kurzzeitig auftretende Pulse mit Frequenzkomponenten von 200-250kHz zu erkennen. Diese erscheinen im Abstand von ca. 0,04s, was der Drehfrequenz von 25Hz entspricht. In Abb.5 sind 6 Umdrehungen dargestellt und bei nahezu jeder Umdrehung erfolgt eine kurzzeitige Anregung bei 200-250kHz durch einen Rissfortschritt, wenn der geschädigte Zahn zum Eingriff kommt und belastet wird.

Schallemissionsmessungen Verzahnungsprüfstand, Sensor an Welle, transiente Messungen
Zahnrad 170, Rissentwicklung

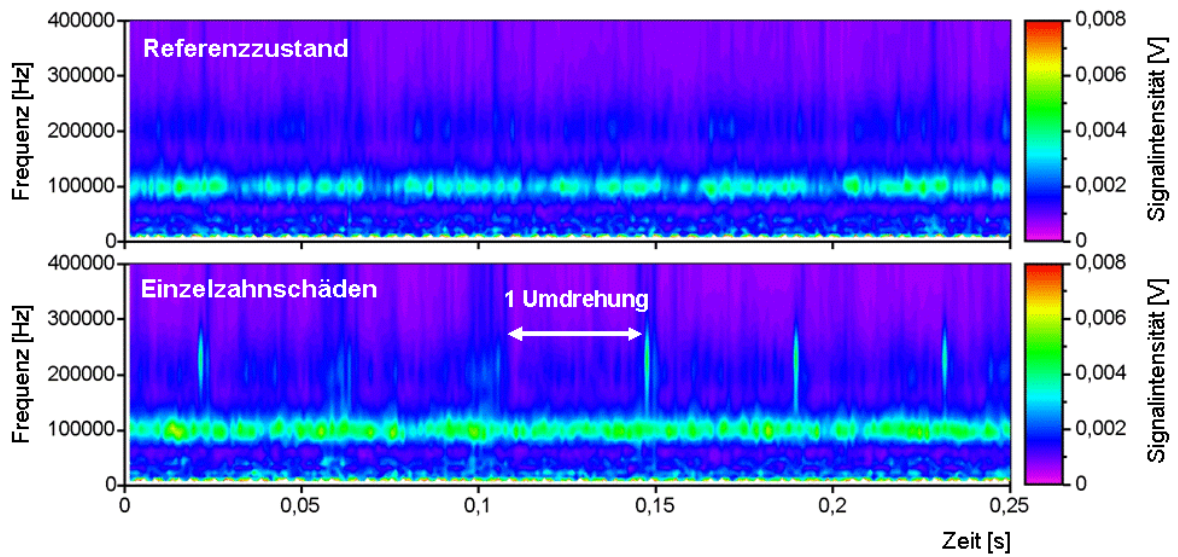


Abb.5: Referenzzustand und Rissbildung im Zahnfußbereich

Schallemissionsmessungen Verzahnungsprüfstand, Sensor an Welle, transiente Messungen
Zahnrad 179, Grübchenbildung

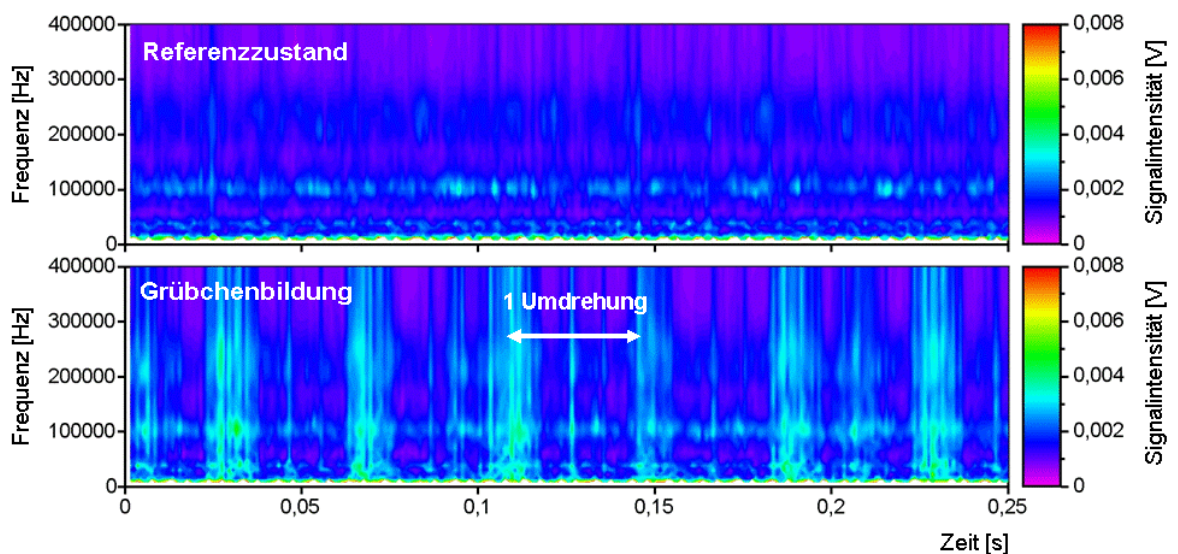


Abb.6: Referenzzustand und Grübchenbildung im Zahnflankenbereich

Das Signalverhalten bei einer Grübchenbildung ist in Abb.6 dargestellt, im Gegensatz zur Rissentwicklung in Abb.5. Sowohl im Referenzzustand, als auch bei Grübchenbildung zeigt sich eine dominante Signalkomponente bei ca. 100kHz, welche vom Schallemissionsanalysesystem aufgrund der Hochpassfilterung nicht berücksichtigt wird. Im gesamten Frequenzbereich bis ca. 400kHz zeigt sich eine erhöhte deutlich breitbandigere Signalkomponente, wie bereits beim Rissfortschritt in Abb.5 beschrieben, die jedoch hier über einen deutlich längeren Zeitraum bzw. mehrmals pro Umdrehung bei mehreren Zähnen auftritt, bedingt durch die Grübchenbildung an mehreren Zähnen gleichzeitig. Bei Belastung der entsprechenden Zähne schreitet die Grübchenbildung fort und es treten Schallemissionen auf.

Die Detektion von Rissen im Zahnfußbereich und auch von Grübchen in den Zahnflanken mittels der Schallemissionsanalyse ist möglich, allerdings in diesem Fall nur bis zu einer Maximaldrehzahl von 25Hz, da der Grundsignalpegel aufgrund der steigenden dynamischen Einflüsse von Wälzlagern und dem Zahneingriff bei hohen Drehzahlen höher liegt, als die schadensspezifischen Schallemissionen.

3. Zusammenfassung

Zur Gewährleistung der Betriebssicherheit, hoher Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Maschinen und Anlagen im industriellen Produktionsprozess ist eine zustandsbezogene Instandhaltung ein Beitrag zur Verbesserung der Materialökonomie und der Auslastung der Anlage. Dafür ist jedoch die „Information über den technischen Zustand“ einzelner Maschinenkomponenten bzw. der gesamten Anlage zwingend notwendig.

Die Zustandsüberwachung des Verzahnungsprüfstands am IW erfolgt unter anderem über Schwingungsmessungen, die eine Beschreibung des aktuellen Laufzustands sowie die Entwicklung von Schäden durch geeignete Analysemethoden im Zeit-, Frequenz- und Zeit-Frequenzbereich ermöglichen. Relativ langsam entstehende Schäden, wie Grübchenbildung können dadurch frühzeitig erkannt werden. Die Detektion von Rissen im Zahnfußbereich, insbesondere deren Initiierung, ist nur mit Einschränkungen möglich.

Die Analyse von Schallemissionssignalen erlaubt eine frühere Detektion einer Rissentwicklung aufgrund des Öffnen und Schließen des Risses während eines Lastwechsels bereits bevor der Zahneingriff gestört ist. Dieses Mess- und Analyseverfahren ist allerdings in diesem Fall auf eine Maximaldrehzahl von 25Hz limitiert, da sonst der Grundsignalpegel aufgrund zunehmender dynamischer Einflüsse der Wälzlager und des Zahneingriffs die schadensspezifischen Schallemissionssignale überlagert. Weitere Untersuchungen sollen hier den Einsatzbereich erweitern.

4. Danksagung

Unser Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung dieses Projektes im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ [13].

Referenzen

- [1] N.N.: Vallen-Systeme, About AE, www.vallen.de/ae, 2007
- [2] Tscheliesnig, P., Schauritsch, G.: Schallemissionsprüfung an Trockenzyklindern in Papiermaschinen, Anwenderbeschreibung, TÜV Österreich, Institut für Technische Physik, 2001
- [3] Physical Acoustics Corporation, Acoustic Emission Measurement Technologies, www.pacndt.com, 2007
- [4] Vallen, H.: Die Schallemissionsprüfung, Castell-Verlag, 2003
- [5] Vahaviolos, S.J.: Acoustic Emission: Standards and Technology Update, ASTM, 1999
- [6] N.N.: AMSY-5 Users Manual, Vallen-Systeme GmbH, 2004
- [7] AGU-Vallen Wavelet, wavelet transformation tool, Vallen-Systeme, Icking, 2005
- [8] Misiti, M.; Misiti, Y.; Oppenheim, G.; Poggi, J.-M.: Wavelet Toolbox User's Guide, Mathworks, 2000
- [9] Barber, A.: Handbook of noise and vibration control, 6th edition, Elsevier advanced technology publications, UK
- [10] Toutountzakis, T.; Mba, D.: Observations of Acoustic Emission Activity during Gear Defect Diagnosis, NDT&E International, 2003
- [11] Tan, C. K., Irving, P., Mba, D.: Prognostic Potential of the Acoustic Emission Technique for Spur Gears, Essential Technologies for Successful Prognostics, 59th Meeting of the Society for Machinery failure Prevention Technology, Virginia Beach, US, April 2005
- [12] Löhr, M.; Bohse, J.; Effner, U.: Schallemission bei Wälzbeanspruchung, DFG SA645/4
- [13] Bernard, M.; Scheer, Ch.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Sonderforschungsbereich 489, Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile, Teilprojekt B6, Fortsetzungsantrag 2006-2008
- [14] Sporer, A.: Hohe Sensibilität entwickeln, Acoustic-Emission-Systeme für die Schleifprozessüberwachung, Walter Dittel GmbH, Werkstatt und Betrieb 03/2006