

Leistungsfähige Datenerfassungs-Systeme für Diagnose und Fatigue Life Monitoring zum Einsatz in Kraft- und Lastfahrzeugen, Schwermaschinen und Windkraftanlagen

Einleitung

Die Auslegung von hochausgelasteten sicherheitsrelevanten Strukturen wie z.B. Fahrwerken, Flugzeugtragwerken, Windkraftanlagen etc. basiert meist auf mehr oder weniger fundierten Annahmen zu den im Betrieb zu erwartenden Belastungsbedingungen. Gerade der Druck zum Leichtbau aber auch die hohen Anforderungen an die Garantie der Sicherheit erfordern hier ausgefeilte Methoden zur Bestimmung der Lastbedingungen im Betrieb für die Auslegung und zum Nachweis. Die Strukturen sind wechselnden Beanspruchungen ausgesetzt, die vom mehr oder weniger zufälligen Einsatz und den Betriebsbedingungen abhängen.

Von größtem Interesse für den Konstrukteur neuer Strukturen ist die Erfassung der Belastungsbedingungen an bereits realisierten ähnlichen Konstruktionen, um hieraus Schlussfolgerungen auf den zukünftigen Einsatz der neuen Konstruktionen zu ziehen. Liegen solche Erkenntnisse nicht vor, so besteht die Möglichkeit, anhand von Wartungen in festgelegten Intervallen, wie Sie standardmäßig an Flugzeugen durchgeführt werden, sich ankündigende Schäden zu identifizieren und dann Komponenten auszutauschen, was die Gefahr birgt, dass bei hartem Einsatz die Wartungsintervalle zu lang sein können. Eine Möglichkeit solche Probleme auszuräumen – bei überschaubarem Aufwand – besteht darin, das Belastungsgeschehen messtechnisch zu erfassen und in regelmäßigen Abständen den Auslegungsdaten gegenüberzustellen, um zu bewerten, ob bereits eine Belastungsintensität erreicht wurde, die bei der Freigabe als Grenze nachgewiesen wurde.

Für beide Aufgabenstellungen, die Erfassung der Betriebsbelastungen an bereits bestehenden Konstruktionen für den Neu-Konstrukteur, sowie für die Überwachung an laufenden Einrichtungen zur Überwachung und Identifikation von Lebensdauergrenzen, können Messungen geeigneter Belastungs- und Beanspruchungsgrößen herangezogen werden. Diese werden üblicherweise aufgenommen und im Anschluss nach einschlägigen Verfahren analysiert. Im Hinblick auf Fragen der Lebensdauer werden hier üblicherweise verschiedene Zählverfahren wie z.B. das Rainflow-Zählung eingesetzt. Wegen der großen Anzahl aufzunehmender Messparameter sind jedoch die kontinuierlich aufgezeichneten Datenmengen viel zu groß, dass nur die Möglichkeit besteht, solche Daten , mit den einschlägigen Zählverfahren, online zu reduzieren.

Im Folgenden wird ein System vorgestellt, das für die beiden skizzierten Anwendungsfälle bereits vielfach eingesetzt wurde. Beispielhaft seien hier genannt:

- Aufzeichnung an Stahlbauwerken wie z.B. Braunkohlebaggern (Bild 1)
- Aufzeichnung von Kundenkollektiven an Motorrädern
- Überwachung von Einsatzbedingungen bei Testfahrten an Fahrzeugen
- Windkraftanlagen (Bild 2a)
- Schmiedepressen (Bild 2b)
- oder auch Flugzeugen.

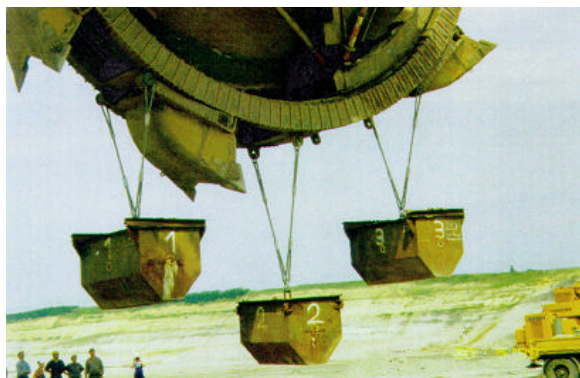


Bild 1: Aufzeichnung von Belastungen und Beanspruchungen am Braunkohlebagger, Kalibrierung

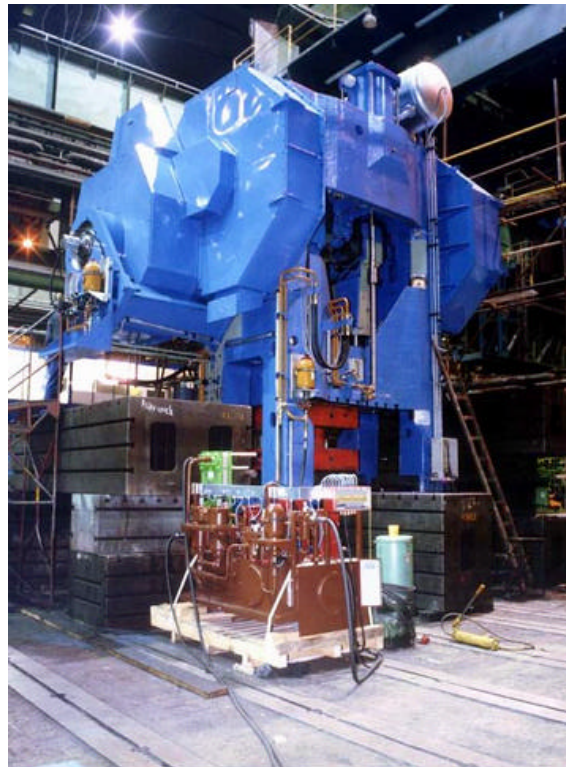


Bild 2: Aufzeichnung von Beanspruchungsdaten an Windkraftanlagen und Schmiedepressen

Online Beanspruchungs-Monitoring an Hubschraubern

In diesem Beitrag wird die Technologie und Funktionsweise des Messsystems am Beispiel seiner Implementation in eine Hubschrauberflotte zur Lebensdauererlängerung, zur Überwachung der Piloten, zur Organisation einer effektiven Wartung und Instandhaltung und auch zur Überarbeitung der Lastannahmen für die Konstruktion vorgestellt (Bild 3).

Das präsentierte Projekt beschreibt eine besonders erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen Messgeräteentwicklung unter Anwendung intelligenter Software einerseits und komplexen Anforderungen des Betreibers einer Hubschrauberflotte andererseits.



Bild 3: Datenlogger im Hubschrauber

Die holländische Marine betreibt im Rahmen ihrer militärischen Aufgabenstellung zum Schutz der eigenen Grenzen ein Mix von Schiffen und Flugzeugen, zu denen auch 22 Hubschrauber vom Typ GK Westland LYNX SH-14D gehören. Vergleichbar anderen NATO-Partnern, hat sich auch für diesen Hubschraubertyp das Einsatzspektrum erweitert, in Richtung auf küstennahe Einsätze nicht nur des eigenen Territoriums. Damit verbunden war auch eine Einrüstung neuer Systeme, u.a. Radar Warning Receiver, Forward Looking InfraRed, Global Positioning System und Chaff/Flare.

Aus beiden Änderungen ergab sich die Notwendigkeit einer genauen Überwachung des Nutzerspektrums und der resultierenden mechanischen Lasten.

Vom Hubschrauberhersteller mit konservativen Annahmen, d.h. unter Berücksichtigung von großzügig bemessenen Sicherheitsfaktoren, für ein Ermüdungsleben von 7000 Betriebsstunden konstruiert, zeigte sich auch, dass bei der jetzt erreichten jährlichen Auslastung von 350 bis 400 Flugstunden die Lebensdauer des Hubschraubers vorzeitig verbraucht sein würde, bevor ein Nachfolgemuster – der Hubschrauber NH 90 – zum Einsatz bereitstehen wird.

Die Auswertung eines tragischen Unfalls – der Absturz eines deutschen Hubschraubers gleichen Typs nach Versagen eines sog. tie-bars, der halbelastischen zugbelasteten Verbindung zwischen Rotorkopf und Rotorblatt – war zu diesem Zeitpunkt ein weiteres Argument, die Hubschrauberüberwachung zu intensivieren und von der bisher praktizierten Überwachung ausgewählter Hubschrauber auf eine vollständige Überwachung der gesamten Flotte, d.h. jedes einzelnen Hubschraubers, auszudehnen.

Alle genannten Gründe veranlassten die holländische Marine zu einer umfangreichen Untersuchung. Ziel war die Einführung einer genauen Analyse jedes einzelnen Einsatzes für jeden Hubschrauber, verbunden mit einer sog. Smart Maintenance Policy. Von ihr wurde erwartet, dass sie sich sehr bald bezahlt machen würde: Einerseits waren die gemessenen Lasten geringer als die in der Lebensdauerberechnung des Herstellers eingesetzten Lastannahmen und andererseits ließen sich Kosten einsparen durch verlängerte Wartungsintervalle und späteren Austausch von Triebwerkskomponenten.

Nach entsprechenden Vorarbeiten in der Marine wurde eine internationale Bewertung konkurrierender Messaufzeichnungssysteme vorgenommen, aus der das Gerät der Firma SWIFT als Sieger hervorging.

In Zusammenarbeit von Marine und Industrie, unterstützt vom National Aerospace Laboratory (NLR), wurde eine umfangreiche Spezifikation erarbeitet, die von AIDA zu erfüllen war.

Komponenten des AIDA-Systems

Herzstück des AIDA-Systems ist der Recorder „MICRO II“. In Modulbauweise – überwiegend in robuster CMOS-Technik ausgeführt – kann er bis zu 20 analoge Messkanäle (einschließlich Dehnmessstreifen-Konditionierung), 16 digitale Messkanäle und 6 Counter-Kanäle verarbeiten. Der Messbereich reicht von 1mV bis 10 Volt. Als Programmspeicher wird ein 256k Byte - Flash-EPROM verwendet. Zur Datenspeicherung dient ein Batterie-gepufferten Speicher. Die Speicherkapazität beträgt als Standard 4M Byte und ist erweiterbar bis auf maximal 16M Byte. Zur Datenübertragung können PCMCIA Memory Cards verwendet werden.

Trotz seiner sehr großen Leistungsfähigkeit hat der Recorder sehr geringe Abmessungen – BXHXT = 112X172X195 mm - und wiegt in der MIL-getesteten Version nur 3.8kg.

Zur Hardware des AIDA-Systems gehört auch eine sog. Break-out Box, die den direkten Zugang zu den einzelnen Sensoren erlaubt und für Test und Wartung verwendet wird. Sie wird bei Bedarf zwischen den Recorder und die Sensoren geschaltet.



Bild 4: Hauptfunktionen des Datenloggers

Die Bedienung des Systems und die Analyse und Verifizierung der Messdaten erfolgt über einen Laptop-Computer mit komfortabler Benutzeroberfläche. Er erlaubt dem Bediener die Einstellung und Anpassung der Messbereiche, Nullpunktkorrektur, den Start und Stop von Messungen, Datenübertragung zu einer Bodenstation und zur Anzeige von Daten auf einem Display.

Die sog. Bodenstation ist ein Personal Computer, der für die Weiterverarbeitung der gemessenen Daten verwendet wird. Er dient insbesondere zur Auswertung der Messdaten, Berechnung der verbrauchten Lebensdauer, Registrierung von besonderen Ereignissen, z.B. Über – oder Unterschreitung festgelegter Grenzwerte, Visualisierung von Messdaten und als zentraler Speicher für alle Daten der gesamten Hubschrauberflotte. Die Bodenstation einschließlich der Entwicklung der umfangreichen Software wird verantwortlich von der holländischen Marine betrieben.

Installation im Hubschrauber

Die Genehmigung zur Installation des Recorders im Hubschrauber setzt einen umfangreichen Zulassungsprozeß voraus. Die Zulassung des Recorders nach den gültigen MIL-Spezifikationen wurde gemäß den gemeinsam erarbeiteten Spezifikationen vorgenommen. Auf deutscher Seite hat die Güteprüfstelle der Bundeswehr (GPS) aktiv mitgearbeitet, um das Gerät zu qualifizieren und alle notwendigen Fertigungsschritte bzw. die Sicherstellung ihrer korrekten Durchführung wurden dokumentiert.

Nach einem strengen Auswahlprozeß wurden letztendlich 17 Signale für die Überwachung ausgewählt. Diese sind im einzelnen:

- Drehzahl des Hauptrotors
- Drehzahlen der Niederdruckturbinen und der Hochdruckturbinen beider Triebwerke
- Fluggeschwindigkeit IAS
- Anstellwinkel
- Antriebsdrehmomente beider Triebwerke
- Dehnungsmesswerte in x- und y-Richtung an den Sponsons (Fahrwerksausleger rechts und links)
- Signal „Fahrwerk belastet“
- Unterschreitung des festgelegten Grenzwertes für den Radarhöhenmesser
- 2 Meßstellen zur freien Verfügung

Eingesetzte Software

Vom Auftraggeber wurde in der Spezifikation gefordert, das Speichervolumen des Recorders so auszulegen, dass eine fortlaufende Aufzeichnung – d.h. ohne zwischenzeitliche Übertragung (Auslesen von Daten) an die Bodenstation – von 100 Flugstunden ermöglicht wird. Bei der Vielzahl der analogen Kanäle mit Abstraten von bis zu 2 kHz wäre eine Datenflut entstanden, die die maximale Speicherkapazität in wenigen Stunden gefüllt hätte. Es wurde deshalb davon ausgegangen, auf eine On-line Klassierung zurückzugreifen und hierfür eine intelligente Software für diesen Anwendungsfall weiterzuentwickeln.

Der Recorder „MICRO II“ stellt eine Vielzahl von standardmäßig oder optional einsetzbaren Auswertelgorithmen zur Verfügung, die teilweise auch in Kombination eingesetzt werden können. Die wichtigsten hiervon sind:

RF-Rainflow

Der RF-Algorithmus reduziert die Daten auf die für die Schädigung relevanten Lastspitzen und extrahiert daraus vollständig durchlaufene Schwingspiele. Diese Schwingspiele werden klassiert und in einer z.B. 64*64 großen Von-Nach-Matrix gespeichert. Eine solche Matrix enthält alle Informationen, die für eine Schädigungsberechnung benötigt werden. Exemplarisch seien hier die verschiedenen Verfahren nach Miner und die erweiterten Konzepte zur Berücksichtigung der Mittelspannungsempfindlichkeit gemäß W. Schütz genannt.

Aus der Matrix läßt sich aber auch nachträglich eine Lastfolge für eine Prüfmaschine generieren. Diese rekonstituierte Lastfolge entspricht in ihrer Wirkung bezüglich der mechanischen Beanspruchung auf den Prüfling dem aufgezeichneten Dauerversuch.

Die Aussagekraft und der geringe Speicherbedarf machen das RF-Verfahren zum Mittel der Wahl, wenn es um die Langzeiterfassung von Betriebslasten geht.

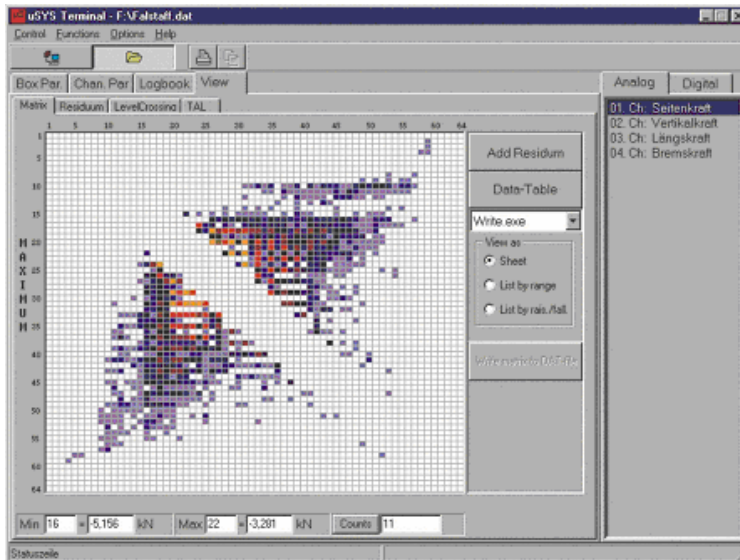


Bild 5: Rainflow ? Aufzeichnung der Spitzenwerte geschlossener Halbschwingspiele und übersichtliche Ergebnisdarstellung in Form einer Matrix.
Halbschwingspiele werden zwischengespeichert und als Residuum ausgegeben

Aus der RF-Matrix können außerdem die bekannten einparametrischen Verfahren wie Klassengrenzenüberschreitung (LC-Levelcrossings) und Bereichspaarzählung (RP-Range Pair Count) abgeleitet werden.

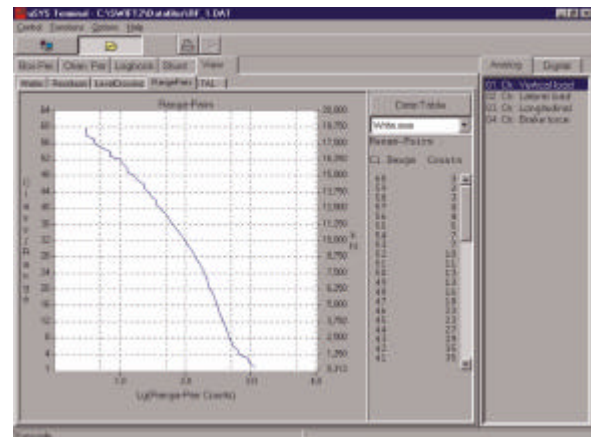
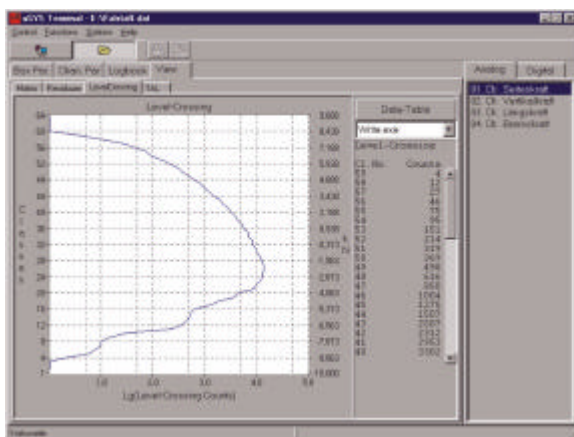


Bild 6: Level Crossings ? Aufzeichnung der Überschreitung von vorher festgelegten Klassengrenzen und übersichtlicher Darstellung als Summenhäufigkeitskollektiv.
Range Pairs ? Auswertung von Bereichspaaren, d.h. gleichgroßer Lastanstieg und -abfall, Darstellung als Summenhäufigkeitskurve.

TAL-Time at Level (Verweildauer)

Das Verfahren klassiert die Eingangsgröße in z.B. 256 Klassen und bestimmt die Dauer, in der sich das Eingangssignal während der gesamten Meßzeit in der jeweiligen Klassen aufgehalten hat. Typische Anwendungsfälle sind Zustandsgrößen wie Temperatur, Drehzahl, Geschwindigkeit.

Durch die Reduzierung auf die Verweildauer können in einem nur wenige Kilobytes umfassenden Speicher Messdaten von mehreren Jahre untergebracht werden.

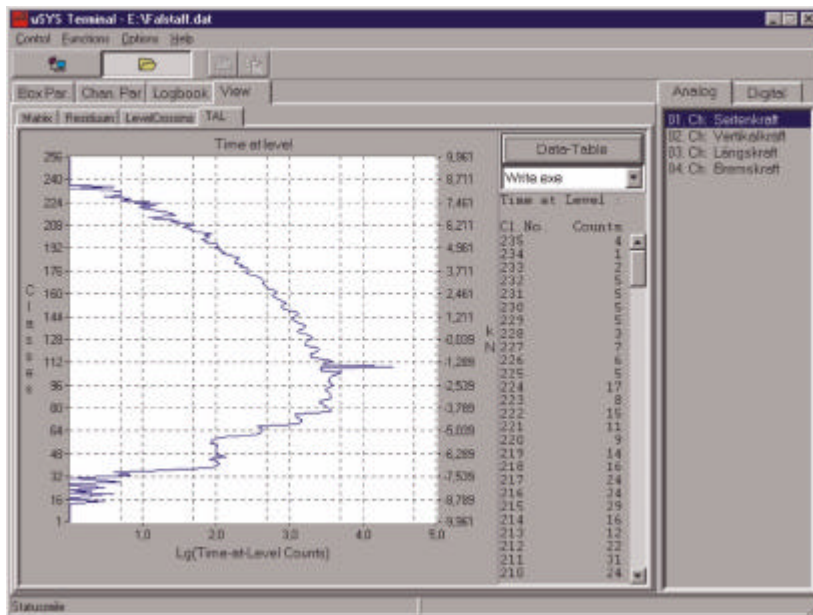


Bild 7: Time at Level ? Aufaddieren der Verweildauer eines Signals innerhalb festgelegter Klassengrenzen, Darstellung als Summenkollektiv.

TM – Transienten Mode

Alle bisher beschriebenen Verfahren haben den Nachteil, dass eine nachträgliche Aussage über die Glaubwürdigkeit der aufgezeichneten Signale nur schwer oder gar nicht möglich ist. Insbesondere kann dies ein Problem sein, wenn es zu unerwartet hohen Einzelereignissen kommt. Aus diesem Grunde können die Methoden RF und TaL um die getriggerte Aufzeichnung von Kurzzeitreihen ergänzt werden. Beim Überschreiten eines Grenzwertes wird dann parallel zu den aktivierten Zählverfahren der aktuelle Signalverlauf aufgezeichnet. Um das Datenaufkommen dabei in erträglichen Grenzen zu halten, kann die Aufzeichnungsrate für jeden Kanal den individuellen Erfordernissen angepasst werden.

Durch die Verwendung einstellbarer Pre- und Post-Trigger-Zeiten kann zusätzlich die Vorgeschichte und das Abklingverhalten des Triggersignals aufgezeichnet werden. So ist eine spätere Beurteilung des Signalverlaufs über das eigentliche Triggerfenster hinaus möglich. Anhand des Verlaufs kann dann bei der Auswertung der Daten meist entschieden werden, ob der Signalverlauf plausibel ist oder die Ursache einer Störung. Ergänzt wird dies noch durch die Möglichkeit der wechselseitigen Triggerung frei wählbarer Kanäle. So kann zu einem Triggerereignis auch das Verhalten anderer Kanäle mit aufgezeichnet werden, was weitere wertvolle Informationen liefern kann.

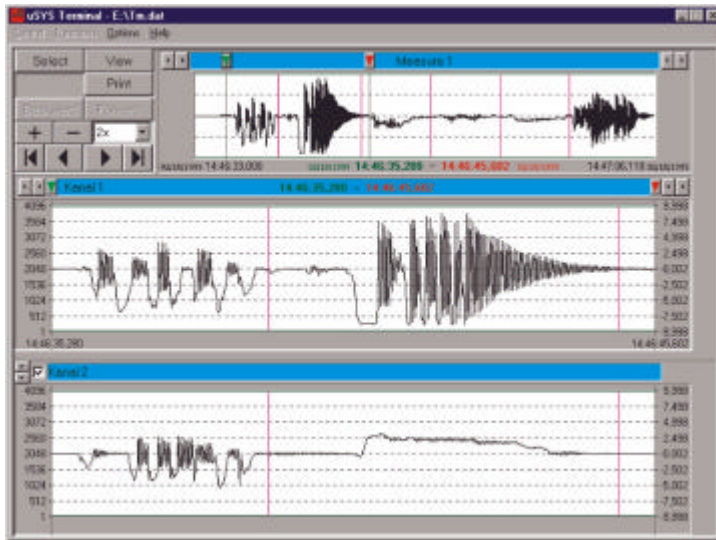


Bild 8: Transienten Mode mit Trigger. Darstellung als Amplitudenverlauf.

SQTMS – Sequential Peaks and Troughs with Time and Master/Slave

Von allen genannten Verfahren kommt SQTMS dem klassischen Zeitreihenverfahren am nächsten. Das Verfahren reduziert die Meßgröße auf die beanspruchungsrelevanten Lastspitzen und zeichnet diese mit der zugehörigen Zeitinformation auf. Die einstellbare s.g. Rückstellbreite ermöglicht die Unterdrückung von kleineren Signalwechseln und Rauschen.

Da die Menge der aufzuzeichnenden Daten nur von der Signalfrequenz abhängt, kann die Abtastrate sehr hoch gewählt werden. Dadurch werden die Extremwerte des Signalverlaufs bestmöglich bezüglich Zeitpunkt und Amplitude erfasst.

Durch die Aufzeichnung der Zeitinformation besteht nachträglich die Möglichkeit mehrere Kanäle zeitlich korreliert zu betrachten. Erweitert wird dies noch durch die Verwendung von Slave-Kanälen. Der Momentanwert der Slave-Kanäle wird bei der Erkennung eines Extremwerts im Master-Kanal automatisch mitabgelegt.

Das Datenaufkommen von SQTMS ist – wie schon gesagt – praktisch nur vom Signal abhängig. Zum Beispiel lassen sich in einem 4 Megabyte großem Speicher eine Millionen Lastwechsel ablegen, was schon fast an die Dauerbetriebsfestigkeit heranreicht.

Wegen der Aufzeichnung aller aufgetretenen Lastspitzen, lässt sich aus den SQTMS-Daten nachträglich RF erzeugen. Wodurch eine Schnittstelle zu allen gängigen Verfahren der Betriebsfestigkeitsanalyse besteht.



Bild 9: Sequentielle Extremas mit Zeit und Master/Slave-Funktion. Darstellung als Amplitudenverlauf mit Master- und Slave-Kanal

Einsatz der Auswertemethoden im AIDA-Recorder


Zur Auswertung sowohl der Drehzahlen des Hauptrotors und der Triebwerksrotoren, als auch der Dehnmesswerte an den Fahrwerksauslegern werden die Methoden SQTMS und LC herangezogen, Kriterium ist hierbei die erhebliche Reduzierung der zu speichernden Datenmenge bei gleichzeitiger Erhaltung aller notwendigen Information für eine nachträgliche Berechnung der verbrauchten Lebensdauer.

Neben der Aufzeichnung der Lastspektren übernimmt der Recorder eine Vielzahl von Überwachungsaufgaben und veranlasst akustische oder optische Warnanzeigen im Cockpit für die Piloten. Insgesamt werden 36 Prozesse gesteuert, u.a. für das Überschreiten oder Unterschreiten von festgelegten Drehzahlgrenzen des Hauptrotors, einschließlich Aufzeichnung von Zeitdauer und Häufigkeit des Auftretens oder auch das Ansprechen des Schalters „Fahrwerk belastet“, ebenfalls mit Dauer und Häufigkeit.

Hinzu kommen verschiedene Selbstüberwachungsfunktionen des Recorders.

Für Selbstüberwachung des Recorders werden folgende Hauptparameter herangezogen:

1. Schalter "Fahrwerk belastet"
2. Drehzahlen der Triebwerke
3. Test des Recorder-internen Speichers
4. Echtzeituhr zur Überwachung der zentralen Prozessoreinheit des Recorders
5. Speicherüberlauf



Die Kombination der Werte dieser Parameter werden verwendet für:

1. Sofortige Anzeige für den Piloten, wenn der Recorder keine Warnung bei Rotorüberdrehzahl abgibt.
2. Bericht für der Wartungspersonal, um das System zu überprüfen

Bild 10: Überwachungsfunktionen

Auslesen und Bewerten der Daten

In regelmäßigen Abständen, z.B. einmal im Monat, werden die Daten vom Wartungspersonal mittels Laptop und PC-Card ausgelesen und auf den PC der Bodenstation zur weiteren Bearbeitung übertragen.

Hierbei werden insbesondere Schädigungsrechnungen mit einer Schadensakkumulations-Software durchgeführt, um die im Betrieb aufgetretenen Belastungen und Beanspruchungen relativ in ihrer Schädigung gegenüber den Lastkollektiven der Auslegung zu bewerten. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Möglichkeit, relative Schädigungsberechnungen mit tatsächlichen Bauteil Wöhlerlinien durchführen zu können, um die während einer betrieblichen Nutzung auftretenden vielen kleinen Schwingenspiele in ihrer schädigenden Wirkung wirklichkeitsnah bewerten zu können.

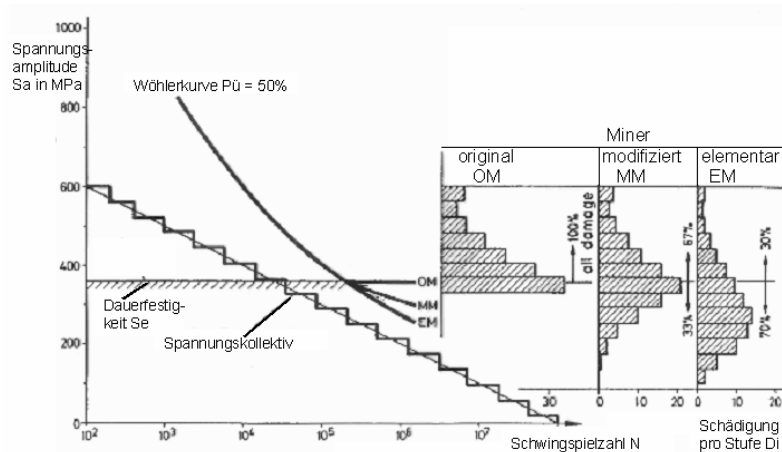


Bild 11: Schädigungsbewertung der aufgezeichneten und online reduzierten Daten

Bild 12 zeigt den Einfluss unterschiedlicher Schadensakkumulationsrechnungen mit Wöhlerlinien, bei denen eine ausgeprägte Dauerfestigkeit angenommen wurde (original Miner), was nicht dem tatsächlichen Schädigungsverhalten der Komponenten im Betrieb entspricht und hohe Risiken birgt. Andererseits kann die Wöhlerlinie auch in den Bereich hoher Schwingenspielzahlen bei gleicher Neigung verlängert werden elementar Miner), was einer extrem konservativen Abschätzung entspricht, mit der wertvolle Festigkeitsreserven verschwendet werden. Nach Stand der Technik hat sich die Annahme einer in den Dauerfestigkeitsbereich bei flacherer Neigung verlängerten Wöhlerlinie (modifiziert nach Haibach) für eine zutreffende Bewertung der Schädigung von Bauteilen bewährt.

Ergebnisse

Nach einer angemessenen Erprobungszeit hat das AIDA-System Anfang 99 als fester Bestandteil der Smart Maintenance Policy seinen regulären Dienst bei der holländischen Marine aufgenommen.

Als Ergebnis sind folgende „Erfolge“ festzuhalten:

- Die Wartungskosten für die gesamte Flotte konnten um ca. 2,5 Mio \$ pro Jahr gesenkt werden.
- Die Austauschintervalle für Triebwerkskomponenten konnten verlängert werden. Eine periodische Grundüberholung verursacht damit bis zu 25% geringere Kosten.
- Die Sicherheit im Flugbetrieb hat sich erhöht, da keine unerkannten Rotorüberdrehzahlen mehr möglich sind (Einfluß auf die Disziplin der Piloten?)
- Die Lastannahmen zur Ermüdungsberechnung konnten entschärft werden, durch den Übergang von pauschalen Flugstunden auf gemessene Lastwechsel während des realen Einsatzes.
- Die Marine kann zurückgreifen auf eine umfangreiche Datenbank über die realen Belastungsabläufe ihrer gesamten Flotte und damit die gleichmäßige Auslastung besser steuern.

Ausblick

Die Erfolge des AIDA-Systems in Bezug auf

- Erhöhung der Sicherheit
- Einsparung von Wartungskosten
- Verlängerung der Lebensdauer bzw. der Einsatzzeit

für den LYNX Helikopter sind so überzeugend, dass sich auch andere Betreiber für dieses System interessieren.

Das System steht mit vergleichbaren Vorteilen bereits bei der brasilianischen und niederländischen Marine im Einsatz. Die dänische Marine hat eine Voruntersuchung gestartet. Die deutsche Marine hat, nach erfolgreichem Einsatz von zwei Prototypen, alle ihre Sea Lynx mit AIDA Recorder Systeme ausgestattet.

Neben diesen militärischen Anwendungen setzt sich die abgeleitete Industrieversion mit Erfolg bei vielen Anwendern durch, u.a. im Flugzeugbau, im Fahrzeugbau und bei den Herstellern von Motorrädern, im allgemeinen Maschinenbau und auch bei Sonderkonstruktionen wie z.B. bei großen Krananlagen im Tagebau.

Dabei erschließt die ständige kundenorientierte Weiterentwicklung des Recorders – sowohl seiner Hardware als auch seiner Software – ständig neue Anwendungsgebiete, die ihn für einen noch größeren Anwenderkreis interessant machen.

Renate Dickler-Schütz – SWIFT GmbH
Prof. Dr.-Ing. Andreas Rupp, FH Kempten