

Experimentelle Beanspruchungsanalysen - Vorstellung eines Konzepts und Darstellung der Umsetzung an drei Beispielen

Henschel, J.

Im folgenden werden die Planung und die Durchführung von Beanspruchungsanalysen an Maschinenteilen unter realen Betriebsbedingungen vorgestellt. Die eingesetzte Meßtechnik wird kurz erläutert und die Durchführung der Betriebsmessungen an drei Beispielen dokumentiert. Die Ziele der durchgeführten Untersuchungen waren die Verifikation bzw. die Überprüfung der zur Dimensionierung verwendeten Lastannahmen. Die ausgewählten Beispiele unterschiedlicher Einsatzgebiete der Maschinen stellt die Flexibilität der zum Einsatz gekommenen Geräte unter Beweis.

You will get a description how to analyse the stress/strain behaviour from machine parts under normal working conditions.

The usage from measurement tools an the invention of upgrade parts at the IMW is shown.

A description of the way from the experimental stress/strain analysis in combination with numerical methods (f.e. Finite - Element - Method) to an overview of the machine characteristics is given.

Three examples represent the flexibility and the possibility of universal usage of the measurement tools developed at the IMW.

1 Einleitung

Die Ermittlung von Beanspruchungen (mechanisch, thermisch) von Maschinenteilen während des Betriebs stellt einen wesentlichen Punkt der experimentellen Festigkeitsanalyse dar.

Die im folgenden beschriebenen Methoden und Vorgehensweisen werden i.a. bei komplexen Bauteilstrukturen sowie bei Unsicherheiten in den Lastannahmen zur Verifikation der Berechnungsansätze herangezogen.

Desweiteren besteht die Möglichkeit, die tatsächlich aufgetretenen Lasten auf eine Maschine / ein Maschinenteil bei Schadensfällen zu ermitteln.

Die Ermittlung der Dehnungen und die hieraus berechenbaren resultierenden Belastungen an Originalbauteilen erfolgt mittels Dehnungsmeßstreifen. Bedingt durch die geringe Baugröße der Meßwertnehmer ist eine Applikation an Bauteilen jeglicher Gestalt und nahezu beliebiger Größe möglich.

In Kombination mit numerischen Verfahren (z.B. Finite-Elemente Berechnungen) wurde am IMW ein leistungsfähiges Konzept zur Analyse von Beanspruchungen auf Maschinenteile entwickelt.

2 Die Meßtechnik

Unter der Maßgabe der Entwicklung universell einsetzbarer Meßgeräte liegt der Schwerpunkt der Entwicklungen am IMW auf der Übertragung von Meßsignalen von bewegten Maschinenteilen.

Die Aufnahme und Weiterleitung an die ruhende Umgebung stellt besondere Anforderungen an die Meßtechnik.

Die durch mechanische Lasten verursachten Dehnungen in Maschinenteilen werden mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen in elektrische Signale gewandelt. Die den Anforderungen entsprechende Verschaltung der DMS in eine Wheatstonesche Brücke führt zu einer, den Dehnungen proportionalen, Brückenquerspannung.

Die Spannungsplituden der erzeugten Meßsignale liegen typischerweise in einem Bereich von +/- 20 mV. Diese verhältnismäßig geringen Meßspannungshöhe bedürfen insbesondere für eine Übertragung über Strecken von bis zu 10 m der Konditionierung. Werden die Signale nicht verstärkt, ist die Gefahr von Meßfehlern z.B. durch schwankende Leitungswiderstände sehr groß.

Im Hinblick auf eine hohe Signalqualität muß der Auswahl der Übertragungsglieder besondere Beachtung geschenkt werden. Eine Unterscheidung in zwei Lösungsprinzipien ist möglich.

2.1 Lösungsprinzipien

Eine Unterscheidung in berührlose und berührende Übertragungsmethoden ist Ausgangspunkt der Überlegungen. Die Analyse der Systeme führt zu den Vor- und Nachteilen der verwendbaren Übertragungsglieder.

2.2 Schleifringläufer

Der Schleifringläufer repräsentiert die berührenden Übertragungsglieder.

Die Übertragung der Meßsignale erfolgt über eine mit Schleifkontakten versehene Welle. Diese folgt der rotatorischen Bauteilbewegung durch eine torsionssteife Verbindung. Die Signale werden über das Aufsetzen von ortsfesten Kohlebürsten abgegriffen. Das Beispiel der Übertragung bei rotatorischer Bewegung läßt sich ebenso auf translatorische Bewegungen übertragen.

Die Vorteile einer Signalübertragung mittels eines Schleifringläufers liegen primär in der Robustheit des verwendeten Bauteils. Die durch Kapselung erreichbare Unempfindlichkeit gegen Umwelteinflüsse führt zu einer vergleichsweise geringen Sekundärbeeinflussung der übertragenen Signale.

Als Nachteil dieses berührenden Übertragungselementes ist die hohe Amplitude eines dem Meßsignal überlagerten Rauschens zu nennen. Diese durch das Arbeitsprinzip verursachte Störung läßt sich nur bei stationärem Signalpegel, ohne Auswirkungen auf den Absolutwert des Nutzsignals, kompensieren.

Somit erscheint nur die Übertragung zeitlich konstanter Signale (z.B. Energieübertragung) als sinnvoll.

Für die Übertragung von dynamischen Signalen mit großer Varianz der Extremwerte kann ein berührendes Übertragungsglied die geforderten Genauigkeiten i.a. nicht gewährleisten. Der Einsatz eines berührungslosen Übertragers empfiehlt sich.

2.3 Telemetrie

Eine Telemetrieanlage wird zur berührungslosen Übertragung von Signalen verwendet. Zur Signalübertragung vom bewegten Maschinenteil werden ein oder mehrere FM-VHF-Sender (235MHz) eingesetzt.

Die Sender werden auf dem bewegten Bauteil appliziert. Bei einer Versorgungsspannung von 8-12V stellen sie eine stabilisierte Brückenversorgungsspannung von 5V bereit. Ein integrierter Vorverstärker mit variablem Verstärkungsfaktor stellt die Eingangssignale für einen Spannungs-Frequenzumsetzer bereit.

Die modulierte Trägerfrequenz wird von einem VHF Tuner mit Breitband ZF-Verstärker und FM-Diskriminator empfangen. An einem Analogausgang mit variablem Verstärkungsfaktor wird das Meßsignal typischerweise in einem Spannungsbereich von +/- 5V ausgegeben.

Die Vorteile der berührungslosen Übertragung liegen in der hohen erreichbaren Genauigkeit der übertragenen Signale (0,2% Meßverstärker).

Ein Nachteil des Systems stellt eine Begrenzung der Anzahl parallel betriebbarer Sender/Empfänger dar. Die Bandbreite, in welcher die am Markt verfügbaren Sender/Empfängereinheiten betrieben werden dürfen ist gering, so daß bisher nur sieben unterschiedliche Frequenzen betrieben werden durften.

Einzelne Anbieter sind mittlerweile in der Lage, Systeme mit bis zu 50 parallel betriebbaren Sendern anzubieten. Die Anschaffungskosten für diese Anlagen sind, bedingt durch den hohen Aufwand zum Erreichen der nötigen Trennschärfe jedoch vergleichsweise hoch.

Die kostengünstige Erweiterung der am IMW vorhandenen sieben Sender/Empfängereinheiten war der Ausgangspunkt der Entwicklung eines Multiplexers. Dieser "Schalter" ermöglicht eine Übertragung von bis zu 32 unterschiedlichen Signalen über vier Telemetriesender/Empfänger. Im folgenden wird der Aufbau und die Funktion erläutert /2/.

3 Multiplexer

Ein am IMW entwickelter Multiplexer schaltet 32 Meßstellen auf 4 Sender durch. Hierzu bot sich der CMOS-Baustein 4051 an, ein 8-Kanal Multiplexer/Demultiplexer mit 3 Adressen- und einer Freigabeleitung /3/. Dieser Multiplexer wählt aus 8 Eingangssignalen, entsprechend der angelegten Adresse, ein Signal aus. Kaskadiert man diesen Baustein 8fach, so eignet er sich als 8 aus 64 Auswahlregister. Jede Meßstelle ist an 2 Leitungen angekoppelt, die auch zu den Sendern

geführt werden müssen. Acht Bausteine entsprechen somit einer Erweiterung auf 32 Meßstellen.

Die durchgeschalteten Kanäle verhalten sich wie ohmsche Widerstände von 120Ω und wirken nicht verfälschend auf den Meßwert, da die Eingangsimpedanzen der Sender im Megaohmbereich liegen. Tests haben gezeigt, daß das Übersprechen der unterschiedlichen Kanäle unterhalb der Meßgenauigkeit der gesamten Applikation liegt. Das dynamische Verhalten kann bei einer Umschaltfrequenz von 100Hz als unkritisch bewertet werden.

Die Umschaltfrequenz des Multiplexers wird von einem Quarzoszillator gebildet, der mit 100Hz taktet. Ein nachgeschalteter Dezimalzähler steuert den Adresseingang des Multiplexers an. Mit dieser Schaltung werden je 4 Meßstellen für 10 Millisekunden parallel übertragen, dann schaltet der Multiplexer auf die

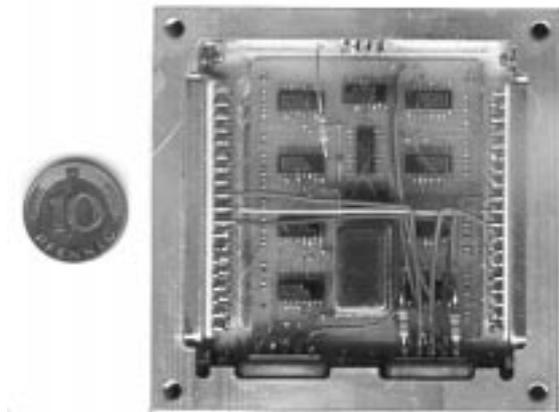


Bild 1: Ein am IMW entwickelter 32 / 4 Multiplexer in SMD - Bauweise

nächsten 4 Meßstellen weiter. Ein Zyklus durch alle Meßstellen dauert 80 Millisekunden.

4 Meßwerterfassung

Die Grenzfrequenz der erfaßten Signale wurde auf 2 Hertz festgelegt. Um einen Aliasing-Effekt zu umgehen, mußte eine Schaltfrequenz des Multiplexers von 100 Hz realisiert werden. Bei einer Abtastrate von 1 kHz je Kanal wird jede Meßstelle mit 10 Werten repräsentiert. Die Abtastung und A/D Wandlung der Signale erfolgt mittels einer Meßwerterfassungskarte der Firma Dasy-Lab.

Die Darstellung, Skalierung und Weiterverarbeitung der Meßsignale wird mit Hilfe eines leistungsfähigen PC vorgenommen. Die erfassten Meßdaten werden ohne weitere Bearbeitung auf rechnerinternen Festplatten am Ort der Messungen gesichert. Die Aufbereitung der Daten zu auswertbaren Ergebnissen erfolgt im IMW.

Mit der Entwicklung, Ausführung und Anwendung dieses Meßtechnikmoduls konnte eine preisgünstige Alternative zu handelsüblichen Systemen entwickelt werden. Der Einsatz unter härtesten Bedingungen hat bereits in mehreren Fällen die Zuverlässigkeit unter Beweis gestellt.

Beispielhaft seien die Beanspruchungsanalysen an Zementmühlen im Produktionsbetrieb genannt (siehe Beispiele).

Die eingangs erwähnte Aufarbeitung der Daten aus den Messungen durch analytische und / oder numerische Berechnungen vervollständigen die Beanspruchungsanalyse. Hierauf wird im folgenden näher eingegangen.

5 Die Auswertung der Meßergebnisse in Kombination mit rechnergestützten Dimensionierungsverfahren

Im Kombination mit der o.g. Meßtechnik wird am IMW das Konzept verfolgt, zur Vorbereitung sowie zur Auswertung der Messungen die untersuchten Maschinen / Maschinenteile als Finite - Element Modelle abzubilden.

Ziel diese Vorgehensweise, ist es eine ganzheitliche Modellvorstellung der zu untersuchenden Bauteile zu erhalten.

Im Rahmen der Vorbereitung zu einer Messung wird die Bauteilgeometrie mit dem Programmsystem MARC/MENTAT als FEM Modell abgebildet. Eine Berechnung der zu erwartenden Spannungen/Dehnungen im Bauteil kann sowohl unter Verwendung der bekannten äußeren Lastparameter, als auch unter Verwendung neuer Ansätze durchgeführt werden (siehe auch Beispiel Trommelwinde).

Die so erhaltenen Informationen über die Größe und die räumliche Anordnung der Bereiche mit den höchsten Belastungen im Bauteil sind die Entscheidungsgrundlage für die Applikationsorte der DMS.

Im Anschluß an die Auswertung der Meßwerte wer-

den auf der Basis der vorhandenen Modelle erneut FEM - Berechnungen durchgeführt. Diese Kalkulationen dienen der Verifikation der Lastannahmen.

Werden signifikante Abweichungen zu denen in der ersten Phase angenommenen Lastparametern festgestellt, so ist eine Anpassung der Randbedingungen notwendig.

Die Iteration zwischen Meßergebnissen und den durch die FEM - Berechnungen erhaltenen Beanspruchungen führt u.U. zur Anpassung oder Neuformulierung der Belastungsparameter aus dem Betrieb und somit zu einem besseren Verständnis der Lastabtragung im Bauteil.

6 Beispiele

Im folgenden werden drei Beispiele erläutert, in welchen die oben beschriebene Meßtechnik sowie die genannten numerischen und analytischen Verfahren zur Durchführung einer Beanspruchungsanalyse der Maschinen verwendet wurden.

6.1 Windentrommel

Das erste Beispiel stellt die experimentelle Beanspruchungsanalyse an einer Trommelwinde dar. Es handelte sich um eine Winde mit einer maximalen Zuglast von 40 kN auf der ersten Seillage. Die Trommel wird im Betrieb mit fünf Seillagen bewickelt.

Startpunkt der Untersuchungen war die FEM - Berechnung des Trommelkörpers unter Aufbringung der von Dietz /1/ formulierten äußeren Lasten. Diese Be-

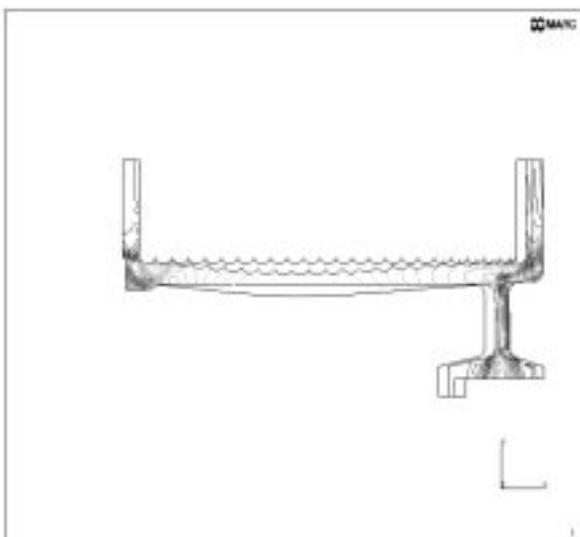


Bild 2: FEM - Modell des Trommelkörpers; Darstellung mit überhöhten Verformungen

rechnungen dienten zur bereits erläuterten Festlegung aussagekräftiger Meßpunkte.

In den durchgeführten Messungen wurden die folgenden Parameter variiert:

- Seilkraft (3 Stufen)
- Seilbauart (3 Ausführungsformen)

Zur klaren Ausarbeitung der Einflüsse der veränderten Parameter wurden die Messungen mit drei bau-

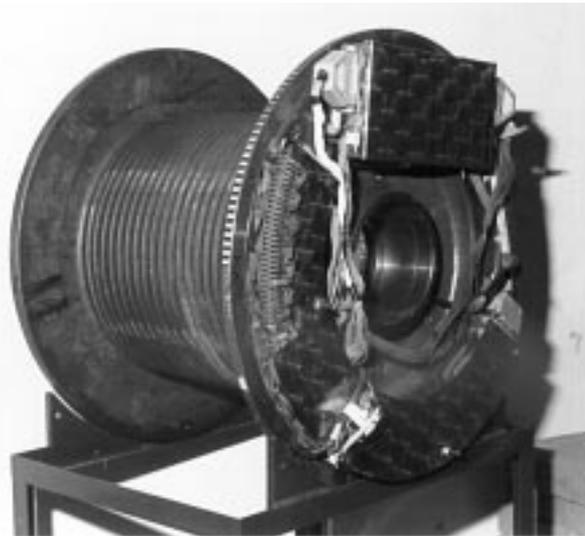


Bild 3: Trommelwinde mit applizierter Meßtechnik; zu sehen ist ein Multiplexer mit Wheatstone'schen Brücken der ersten Generation

gleichen Trommeln, mit fester Zuordnung einer Seilart zu einer Trommel, bei Variation der Zugkräfte gefahren. Während der Messung wurde jede Trommel mit den unterschiedlichen Zuglasten bis in die oberste Lage bewickelt.

Gemessen wurden sowohl die Dehnungen an 32 Meßstellen, im Trommelkörper und an den Bordscheiben, als auch die auftretenden makroskopischen Veränderungen der Trommelgeometrie (Längung des Trommelkörpers).

Die erneute Berechnung der Trommelwinde mit Hilfe des FEM - Systems führte auf die Notwendigkeit der Anpassung der Eingangs gewählten Lastparameter.

Die gewählte Kombination aus DMS - Messung und FEM - Berechnung führte zu entscheidenden Impulsen bei den Modellvorstellungen zur Berechnung von Trommelwinden. Ein möglicher Startpunkt zur Entwicklung erweiterter Berechnungsansätze für die Dimensionierung von Trommelwinden wurde erarbeitet.

6.2 Rohrmühle zum Mahlen von Zement - Klinker

Das zweite Beispiel stellt die Durchführung einer Beanspruchungsanalyse an einer Rohrmühle in der Zementindustrie dar.

Bei den Untersuchung an einer Rohrmühle wurden insbesondere die im Antriebsflansch des Mühlenkörpers auftretende Belastungen analysiert. Es handelte sich um eine Mühle mit einem Mühlenzylinderdurchmesser von 5,8 m. Die Länge des Zylinders betrug 17 m. Angetrieben wird die Mühle durch einen 8,6 MW Ringmotor.

Eine Füllung des Mühlenzylinders mit 560 t Stahlkugeln ermöglicht das Aufmahlen von Zementrohmaterial (sog. Klinker) mit einem Mengendurchsatz von 360 t/h. Die Menge des Umlaufgutes beträgt 1600 t/h. Der Mahlvorgang wird durch eine Drehbewegung des Zylinders mit $13,4 \text{ min}^{-1}$ und den hieraus resultierenden Bewegungen der im Inneren befindlichen Mahlkugeln erreicht. Die Zuführung des zu mahlenden Materials erfolgt über eine Schurre. Die Abführung aus dem Mahlraum geschieht mittels eines Luftstromes, wobei die Mahlwärme das Mahlgut und die Luft auf 120°C erhitzt.

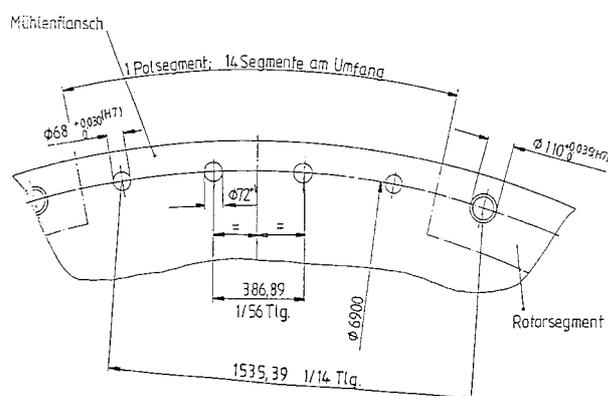


Bild 4: Antriebsflansch der Rohrmühle

Aufgrund dieser Tatsache erwärmt sich die Mühlenaußenhaut bis auf 80°C .

Der in **Bild 4** gezeigte Antriebsflansch, zur Aufnahme der Polsegmente des Ringmotors wird zum einen durch die Ausdehnung des Mühlenzylinder, zum anderen durch die befestigten Polsegmente belastet. Ausgangspunkt der Analyse der tatsächlich im Flansch auftretenden Lasten waren die Unsicherheiten bei der Berücksichtigung der durch die thermischen Verspannung entstehenden Belastungen im

Mühlenflansch.

Die Vorgehensweise der Analyse der im Betrieb auftretenden Belastungen erfolgte in gleicher Weise wie bereits in Beispiel 1 verdeutlicht.



Bild 5: Ansicht des Mühlenkörpers von unten mit applizierter Meßtechnik

Zunächst wurde der Mühlenflansch mit Hilfe der FE - Methode unter Zugrundelegung der bekannten Lastannahmen berechnet.

Auf der Basis der so erhaltenen Informationen wurden die Applikationsorte der DMS festgelegt. Die anschließende Messung der tatsächlich auftretenden Dehnungen im Mühlenflansch während der normalen Produktion vervollständigten die Informationssammlung.

Im Rahmen dieser Messung wurden 10 dreifach DMS - Rosetten sowie ein DMS zur Temperaturkompensation auf der Mühle appliziert. Die zur Verfügung stehenden 30 Meßgitter ermöglichten durch die Anordnung unter $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$ die Messung der Dehnungsanteile welche zur Berechnung der Hauptdehnungen nach Betrag und Richtung erforderlich waren.

Die erneute FEM - Berechnung des Mühlenflansches unter Berücksichtigung der Meßergebnisse konnten Belastungsüberhöhungen in begrenzten Bereichen des Flansches nachweisen.

Die Ausführung der Befestigung der Polsegmente, mit zwei Paßschrauben (siehe **Bild 4**) zur Positionierung der Segmente, an den äußersten Punkten der jeweiligen Segmentenden, führte zu den beschriebenen Überlasten.

Durch eine Änderung hin zu einer ausdehnungsgerechten Konstruktion konnten die Lastspitzen auf ein für den Werkstoff erträgliches Maß gesenkt werden.

6.3 Gutbettwalzenmühle in der Zementherstellung

Das dritte Beispiel gibt einen Überblick zu einer Beanspruchungsanalyse an einer Gutbettwalzenmühle, welche in der Zementindustrie zur prozeßbegeleitenden Rohmaterialmahlung eingesetzt wird.

Die Problemstellung, welche zu der Notwendigkeit einer detaillierten Betrachtung der Beanspruchungen der Mühle im Betrieb führte, war ein durch die konstruktive Ausführung entstandenes Kontaktproblem zwischen einer Welle und darauf aufgesetzten Verschleißschutzsegmenten.

Die untersuchte Gutbettwalzenmühle ist durch zwei gegenläufige Walzen von 1900mm Außendurchmesser gekennzeichnet. In einem Spalt zwischen den beiden angetriebenen Walzen wird das zugeführte Mahlgut, sowohl zwischen den Walzenaußenseiten, als auch durch Kontakt untereinander, zermahlen.

Die Walzen werden durch zwei 1,4 MW Elektomotore angetrieben. Die Kraftübertragung erfolgt durch zwei dreistufige Planeten / Stirnradgetriebe.

Der Materialstrom durch die Mühle beträgt ca. 600 t/h.

Die genannten Parameter verdeutlichen, daß im Hinblick auf eine betriebs sichere Applikation der Meßtechnik größtmögliche Sorgfalt herrschen mußte. Die auf einen Zeitraum von ca. 8 h angesetzte Meßdauer erforderte eine hermetische Kapselung der gesamm-

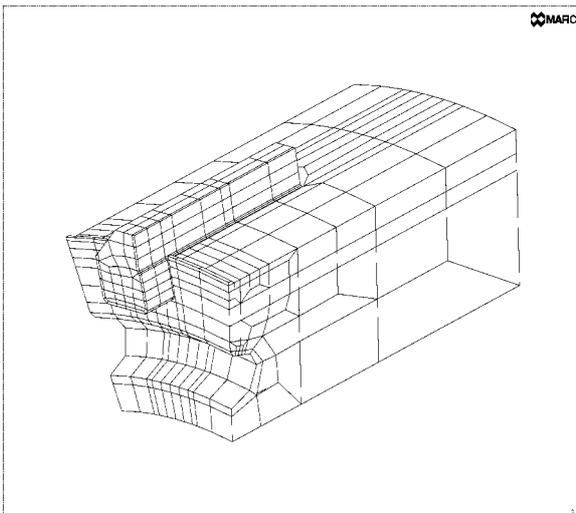


Bild 6: 3D FEM - Modell eines Teilbereiches der Mühlenwelle

ten Meßtechnik, um frei von störenden Einflüssen aus dem Betrieb (Schmutz; Vibrationen, etc.) zu sein. Die in der Vorbereitung durchgeführte FEM - Berechnung

ermöglichte die Festlegung der Applikationsorte an unterschiedlichen Bereichen einer Walze. Im Rahmen der Messung wurden 32 DMS auf der Walze angebracht.

Die so ermittelte Dehnungsverteilung wurde wie bei den bereits gezeigten Beispielen durch erneute FEM -



Bild 7: Applizierte Meßtechnik auf der Gutbettwalzenmühle vor der Inbetriebnahme

Berechnungen zur Analyse der wahren Betriebslasten verwendet. Das Resultat der Untersuchung ist eine deutliche Verbesserung der Lastannahmen für Neukonstruktionen. Desweiteren können nunmehr deutlichere Aussagen zu dem dynamischen Verhalten der Mahlwalzen im Betrieb getroffen werden.

Literatur

/1/ Dietz, P.; Ein Verfahren zur Dimensionierung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; VDI-Fortschrittsberichte 1972

/2/ datatel Telemetrieelektronik
Applikationsschrift der Fa. datatel

/3/ CMOS-Taschenbuch, Standardbausteine
IWT-Verlag 1987