

Bauteiloptimierung durch DMS-Technik und FEM-Untersuchungen

Klemp, E.; Mupende, I.; Schäfer, G.

Die Bestimmung von mechanischen Spannungen kann auf verschiedene Arten erfolgen – analytisch, experimentell und numerisch. In diesem Artikel werden anhand eines Beispiels die verschiedenen Verfahren sowie mögliche Ergebnisse dargestellt. Zunächst wird die auftretende mechanische Dehnung mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS) experimentell ermittelt. Die Resultate dieser Messung bieten dann erste Anhaltspunkte für die Finite Elemente Methode (FEM). Mit Hilfe der Kombination beider Untersuchungsmethoden können im weiteren Verlauf Optimierungen der Bauteilgeometrie durchgeführt werden, ohne daß eine erneute experimentelle Untersuchung erforderlich ist.

The measurement of mechanical stress can be carried out by means of different methods including analytical, numerical and experimental proceedings. Within this article the different proceedings as well as their combination are described by an example. To find the right starting point for the Finite Element Method, a very effective numerical calculation, first the experimental strain measurements are carried out. By means of strain gauges the mechanic stretching at the surface of the part can be measured. Only the combination of these methods leads to a detailed stress prediction without any additional experiment, which has been necessary by now, and therefore to an effective way to optimise the construction.

1 Einleitung

Ausgangspunkt bei einer Festigkeitsoptimierung an Baugruppen und Maschinenteilen bildet u.a. die Fragestellung nach der Überschreitung der zulässigen Werkstoffkennwerte. Dabei bieten sich verschiedene Möglichkeiten an, wobei Computersimulationen alleine, wie z.B. die Finite-Elemente-Berechnung, aufgrund unklarer Lastannahmen und Randbedingungen nicht immer zur eindeutigen Ursachenklärung beitragen können. Messungen an der Gesamtstruktur unter Betriebsbedingungen durch den Einsatz von Dehnungsmessstreifen (DMS) bieten einen zielgerichteteren Ansatz, erfordern jedoch eine gewisse Erfahrung bei der Applikation und der Auswertung der Meßdaten.

An einem realen Bauteil soll hier ein möglicher Weg vorgestellt werden, wie mit Hilfe der Kombination von DMS-Messung und Finite Elemente Methode eine Bauteiloptimierung erreicht und damit ein zeitaufwendiges experimentelles Vorgehen vermieden werden kann.

2 Problemstellung

An einer Holzspänepresse (**Bild 1**) traten nach Belastungssteigerung Risse im Pressenoberteil auf. Diese Schäden können nicht nur zum Versagen des Maschinenteils, sondern auch zum Stillstand der ganzen Produktionslinie führen. Zur Ursachenklärung und Optimierung der Konstruktion trat der Hersteller an das IMW heran, da er selbst nicht über die Kapazitäten und die Ausstattung verfügte.

Die Untersuchungen wurden in drei Schritten durchgeführt:

1. Lokalisierung der Schwachstellen durch visuelle Begutachtung unter Berücksichtigung der verschiedenen Betriebsarten, Festlegung der relevanten Stellen zwecks Spannungsermittlung mit DMS, Betriebsmessung vor Ort und Auswertung der Meßergebnisse
2. FEM-Untersuchungen und Vergleich mit den DMS-Ergebnissen
3. Optimierung der Konstruktion.

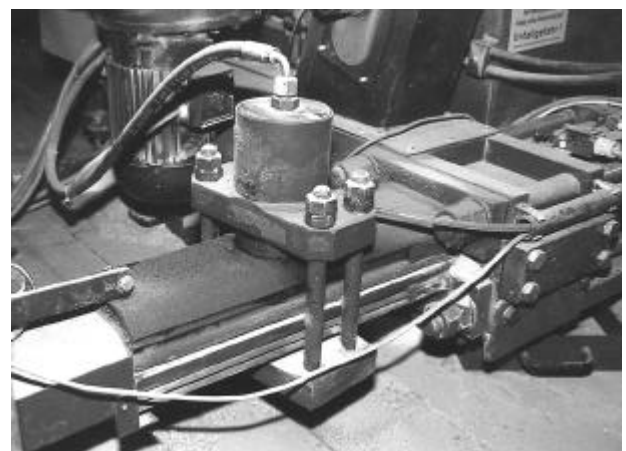


Bild 1: Holzspänepresse im Betrieb, Ober- und Unterteil der Presse werden über eine geschlossene Rahmenstruktur verspannt

3 Messen mit Dehnungsmeßstreifen

Um an einem Bauteil, oder genauer gesagt auf seiner Oberfläche, die im Betrieb auftretenden Dehnungen messtechnisch zu erfassen, werden Dehnungsmeßstreifen (DMS) verwendet. Das Prinzip des DMS beruht auf dem physikalischen Prinzip, daß ein Draht seinen elektrischen Widerstand ändert, wenn er gedehnt bzw. gestaucht wird. Bei den im Handel erhältlichen DMS sind diese Drähte fest auf einer Folie angebracht. Diese Folie wird üblicherweise auf die zu untersuchende Stelle des Bauteils geklebt. Die am Bauteil im Belastungsfall auftretenden mechanischen Dehnungen werden direkt auf die Folie und damit auf den Draht übertragen. Die daraus folgende Änderung des elektrischen Widerstandes des Drahtes wird nun gemessen. Die Messwerte liefern ihrerseits die mechanische Dehnung auf dem Bauteil, die sich bei elastischem Werkstoffverhalten mit Hilfe des Hook'schen Gesetzes in eine proportionale Spannung umrechnen lässt. Da jedoch die absolute Widerstandsänderung nur sehr gering ist ($< 0,1 \text{ Ohm}$), erfolgt die Erfassung nicht direkt über ein Ohmmeter, sondern unter Zuhilfenahme der Verschaltung über eine Wheatstonesche Brücke. Bei dieser Schaltung wird nicht der Widerstand, sondern die Brückenmittelspannung (UB) gemessen (**Bild 2**). Sie bietet weiterhin zum einen die Möglichkeit die sehr geringe Widerstandsänderungen zu erfassen und kann andererseits zu einer Kompensation von Meßeinflüssen, wie zum Beispiel der Änderung der Temperatur verwendet werden.

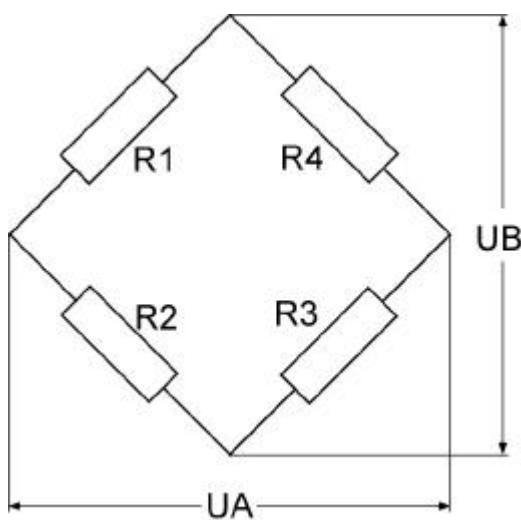


Bild 2: Wheatstonesche Brückenschaltung

Allerdings läßt sich nicht ohne weiteres von der Widerstandsänderung im DMS auf die absoluten

Werte der Dehnung oder der mechanischen Spannung schließen. Hierzu muß die Meßkette vor Meßbeginn kalibriert werden. Diese Kalibrierung kann auf verschiedene Arten durchgeführt werden, je nachdem, ob die Randbedingungen bereits bekannt sind, oder ob die Belastungen gänzlich unbekannt sind. Bei der Messung mit einer bereits bekannten Belastung besteht die Möglichkeit, den Ablesewert einfach durch Dreisatz in eine mechanische Belastung umzurechnen (Prinzip Haushaltswaage). Bei unbekanntem Belastungen (und Dehnungen) muß hier eine Kalibrierung der gesamten Meßkette vorgenommen werden. Dies geschieht in den meisten Fällen über die elektrische Simulation einer mechanischen Spannung. Dazu wird ein Widerstand parallel zu einem DMS verschaltet, ein sog. Shunt. Er simuliert eine mechanische Belastung und „verstimmt“ die Wheatstonesche Brücke. Da die Größe des Parallelwiderstands bekannt ist, kann nun auf die mechanische Dehnung im DMS zurückgeschlossen werden und es entsteht eine Referenz der Widerstandsänderung zur mechanischen Dehnung. Diese Vorgehensweise war in dem Fall der Holzspänepresse notwendig, da hier weder die exakte mechanische Belastung im Bauteil, noch die auftretenden Dehnungen bekannt waren.

Da mit dieser Verschaltung zusätzlich eine Temperaturkompensation vorgenommen werden konnte - Verschalten von mechanisch belasteten in gegenüberliegenden Brückenweigen (R1&R4) - war der Einfluß der Temperaturänderung eliminiert worden.

In dem hier vorliegenden Fall der Holzspänepresse wurde die Dehnungsermittlung mit einer Halbbrücke und Temperaturkompensation durchgeführt. Dies bedeutet, daß R1 als aktiver DMS auf dem Bauteil appliziert wurde und R4 als der dazugehörige passive Temperaturkompensations-DMS. Bei Verwendung der Halbbrückenschaltung werden die Meßstreifen R2 und R3 vom Meßverstärker simuliert - UA bezeichnet hier die Brückenspeisespannung und UB die Meßspannung.

4 FEM-Untersuchung

4.1 Allgemein

Die Methode der Finiten Elemente ist ein numerisches Berechnungsverfahren, bei dem die Gesamtstruktur in endlich kleine Teilelemente diskretisiert wird. Für diese Teilelemente lassen sich mit Berechnungsansätzen der Kontinuumsmechanik Näherungslösungen ermitteln. Die Berechnung dieser Lösungen geschieht oftmals aufgrund der to-

hen Elementanzahl (große Anzahl an zu berechnenden Gleichungssystemen) und der einfacheren Behandlung der Randbedingungen (z.B. Auswahl von Fesselungen, Lastaufgaben etc.) durch Computer.

4.2 Modell und Randbedingungen

Von der Geometrie des Bauteils wurde für die Kontaktberechnung ein vernetztes Modell der dreilagigen oberen Preßbacke erstellt, bei dem die zu verarbeitenden Holzbriketts durch Federn ersetzt und mit dem Volumenmodell der Backe gekoppelt wurden. Die Fesselung der Preßbacke wurde so gewählt, daß nur eine Bewegung in der Lagerungsstelle um die Z-Achse zulässig war. Die Steifigkeit der anzusetzenden Federn wurde experimentell in Druckversuchen verschiedener Holzbriketts ermittelt. Auf eine Berücksichtigung der unteren Preßbacke konnte aufgrund der Symmetrie und der geschlossenen Kraftleitung an der realen Konstruktion verzichtet werden. Kräfte, die aus dem Materialtransport resultieren, wurden durch entsprechende Schubbelastungen an der Unterseite der Preßbacke berücksichtigt. Die Kompressionskraft des vertikal wirkenden Zylinders wurde über eine Druckbeanspruchung auf der oberen Preßbackenlage aufgegeben (**Bild 3**).

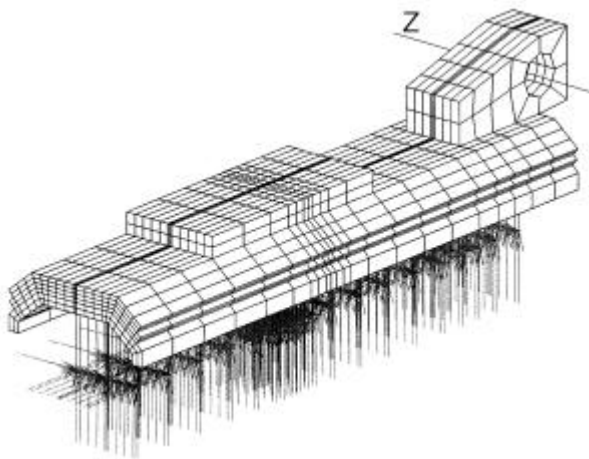


Bild 3: FEM mit Federn ohne Kompensationskraft

5 Ergebnisse

Bei der Durchführung der DMS-Betriebsversuche traten an den Stellen M2 und M3 (**Bild 4**) hohe Spannungen auf. Bei der Untersuchung ergab sich sowohl aus den Ergebnissen der DMS-Messungen, als auch aus dem numerischen Berechnung, daß die höchsten Beanspruchungen an der Querkraft-

einleitung der Querzylinder (M3) und an der Verbindungsstelle mit dem Gelenk (M2) auftreten. Die ebenso sehr hohen Belastungen an M1 führten nicht zu einem optisch wahrnehmbaren Versagen.

Aufgrund der konstruktiven Ausführung war zu erwarten, daß an diesen beiden Stellen (M1 und M2) in etwa gleich hohe Belastungen auftreten. Allerdings zeigte sich schon bei den DMS-Messungen, daß dies nicht der Fall war. Da auch die FEM-Berechnungen markante Unterschiede an dieser beiden Stellen zeigten, wurde nach den Ursachen an diesen Stellen gesucht. Die detaillierten mechanischen Betrachtungen zeigten, daß die Ursache in der versteifenden Wirkung des Gelenkes zu suchen war. Bei der Konstruktion dieses Bauteils war nicht erwartet worden, daß durch diesen konstruktiv hervorgerufenen Steifigkeitssprung eine zu hohe Belastung an den geschweißten Verbindungsstellen auftreten könnte. Somit ließen sich die Beanspruchungen in Verbindung mit möglichen Schweißspannungen auf der Oberseite des Bauteils erklären.

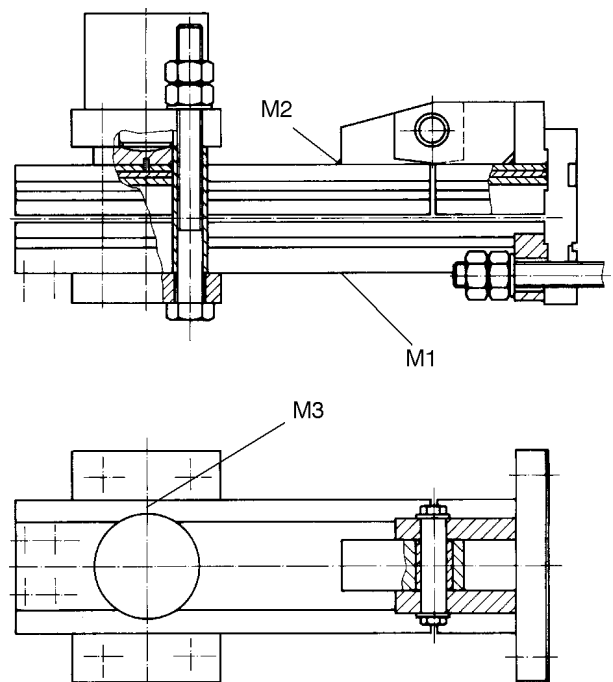


Bild 4: Holzspänepresse, Darstellung der DMS-Meßstellen

Bei der Analyse und dem Vergleich der Meßergebnisse aus den DMS-Versuchen und den numerischen Berechnungen stellte sich heraus, daß lediglich Abweichungen zwischen dem experimentellen Verfahren und den numerischen Berechnungen von ca. 7% auftraten. Aus dem Vergleich der bei-

den Verfahren konnten die Tendenzen der Beanspruchungen und der Beanspruchungsverläufe abgeleitet werden. Damit war sichergestellt, daß die Annahmen bei der Krafteinleitung und der Befestigung (Randbedingungen) bei den FEM-Berechnungen richtig ausgewählt worden waren. Mit dieser Bestätigung konnten weitere FEM-Simulationen zur Bauteiloptimierung durchgeführt werden, ohne daß neue experimentelle Betriebsversuche notwendig waren.

6 Bauteiloptimierung

Hervorgerufen durch den Spannungsunterschied zwischen den Meßstellen M1 und M2, wurde der Einfluß der Versteifung auf die Festigkeit der Konstruktion gezeigt. Diese Versteifung führt nicht, wie zunächst angenommen zu einer Erhöhung der Belastbarkeit der Konstruktion, sondern zu einer Schwächung. Um die Beanspruchungen zu senken, mußte auf eine verformungsweichere Gestaltung übergegangen werden.

Mit Hilfe der in den Betriebsversuchen ermittelten Dehnungen konnte die FEM-Berechnung verifiziert und optimiert werden. Die weiterführenden Simulationen wurden mit 3 verschiedenen Gelenkgestaltungen (zwei schräge und eine ausgerundete) durchgeführt. Dabei ergaben die beiden schrägen Gelenkseiten fast keine Verbesserung in der Spannungshöhe und in deren -verteilung an der Stelle M2. Das ausgerundete Gelenk hingegen hat erwartungsgemäß zu einer Minderung der auftretenden Spannungen und zu einer Abflachung deren Verläufe geführt. Die Ausführung des Gelenkes als ausgerundetes Element führte durch den kontinuierlichen Wandstärkeübergang mit geringerer Kerbwirkung zu deutlich besseren Ergebnissen (**Bild 5**).

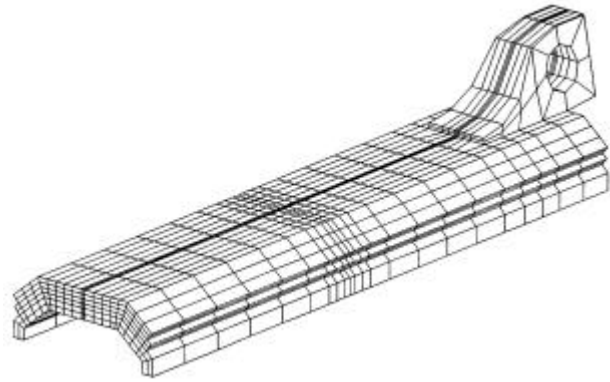


Bild 5: Optimierte Geometrie mit schrägen Seitenwänden und großzügiger Verrundung im Schweißnahtbereich des Gelenkes

7 Zusammenfassung

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen zeigten sich gute Übereinstimmungen zwischen den DMS-Betriebsmessungen und den numerischen Simulationen mit der FE-Methode. Anhand der fast identischen Ergebnisse (Abweichung von 5% - 10% zwischen den beiden Methoden), konnte die numerische Berechnung verifiziert werden.

Die Kopplung von FEM-Simulation mit den DMS-Messungen ermöglicht sowohl eine Plausibilitätspüfung der Messungen, als auch eine Bestätigung der bei den Berechnungen vorgenommenen Annahmen und Randbedingungen. Dieses Vorgehen empfiehlt sich besonders bei komplexen Bauteilen und stellt die Basis für eine schnelle und zuverlässige Bauteiloptimierung dar.

8 Literatur

- /1/ Buck, K. E.; Scharpf, D.W.; Stein E.; Wunderlich, W.: Finite Elemente in der Statik, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1973
- /2/ Hoffmann, K.: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen, Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Darmstadt, 1987