



VISHAY
PRECISION
GROUP

PhotoStress® Micro-Measurements

- Eine kurze Einführung
- Beispielbilder —
 - PhotoStress-beschichteter Teile
 - Eine große Auswahl industrieller Arbeitsbeispiele



www.photostress.com

HAFTUNGSAUSSCHLUSS: Im Hinblick auf die ständige technische Weiterentwicklung und Verbesserung unserer Produkte behalten wir uns Änderungen in Konstruktion und Ausführung gegenüber den Angaben in unseren Datenblättern und/oder Spezifikationen vor, sofern diese nicht einzelvertraglich gesondert vereinbart wurden und hierdurch nicht der Wert und die Gebrauchsfähigkeit der von uns angebotenen Erzeugnisse beeinträchtigt wird und die Änderungen für den Besteller zumutbar sind. Vishay Precision Group, Inc., deren Partner, Vertreter und Mitarbeiter sowie alle Personen, die in deren Namen handeln (zusammen "Vishay Precision Group"), übernehmen keinerlei Haftung für etwaige Fehler, Ungenauigkeiten oder Unvollständigkeit der in den Datenblättern und/oder in den Produktspezifikationen enthaltenen Informationen oder anderen Veröffentlichungen zu einem Produkt. Die Produktspezifikationen erweitern oder ändern die Geschäftsbedingungen der Vishay Precision Group in keiner Weise, einschließlich, jedoch nicht beschränkt auf, darin enthaltene Garantien. Die Vishay Precision Group gibt keinerlei andere Gewährleistung oder Garantie als die in den Allgemeinen Einkaufsbedingungen oder in dem Kaufvertrag festgelegten. Informationen bezüglich der Spezifikationen von Produkten bedürfen für ihre Verbindlichkeit der Bestätigung durch einen schriftlichen Kaufvertrag. **Die Vishay Precision Group lehnt im größtmöglichen rechtlichen Umfang (i) jegliche, sich aus der Anwendung oder deren Nutzung von Produkten ergebende Haftung, (ii) jegliche Haftung, uneingeschränkt einschließlich spezieller, folgende oder begleitende Schäden sowie (iii) jegliche und alle implizierten Garantien, einschließlich Garantien der Eignung für einen bestimmten Zweck, Nicht-Verletzung und allgemeiner Gebrauchstauglichkeit ab.** In Datenblättern und/oder Spezifikationen angegebene Informationen sind Richtwerte und können von tatsächlichen Ergebnissen in unterschiedlichen Anwendungen und Durchführungen abweichen. Angaben bezüglich der Eignung von Produkten für bestimmte Arten von Anwendungen basieren auf dem Wissensstand der Vishay Precision Group hinsichtlich typischer Anforderungen, denen Produkte der Vishay Precision Group üblicherweise ausgesetzt sind. Es liegt in der Verantwortung des Kunden, sicherzustellen, dass ein bestimmtes Produkt mit den in der Produktspezifikation angegebenen Eigenschaften zur Nutzung in einer bestimmten Anwendung geeignet ist. Durch dieses Dokument oder ein Verhalten der Vishay Precision Group wird keine Lizenz, weder ausgedrückt noch impliziert, für irgendein Eigentumsrecht erteilt. Die hierin gezeigten Produkte wurden nicht für den Einsatz in lebensrettenden oder lebenserhaltenden Anwendungen entwickelt, es sei denn, es wird ausdrücklich darauf hingewiesen. Kunden, die Produkte der Vishay Precision Group verwenden oder verkaufen, bei denen nicht ausdrücklich darauf hingewiesen wird, dass diese für den Einsatz in solchen Anwendungen gedacht sind, tun dies auf eigene Verantwortung und stimmen zu, die Vishay Precision Group komplett von Schäden jeglicher Art, die sich aus der Nutzung oder dem Verkauf ergeben, schadlos zu halten. Bitte fordern Sie die schriftlichen Geschäftsbedingungen hinsichtlich der Produkte, die für solche Anwendungen entwickelt wurden, bei den Mitarbeitern der Vishay Precision Group an. In den Datenblättern und/oder Spezifikationen erwähnte Produktnamen und -markierungen können Markenzeichen ihrer jeweiligen Eigentümer sein. Jeder Verwender ist dafür verantwortlich, dass bei der Verwendung der Produkte alle gesetzlichen Vorschriften, einschließlich gewerblicher Schutzrechte Dritter, eingehalten werden.

Eine Einführung in das PhotoStress-Verfahren

PhotoStress ist eine weit verbreitete Technik zur genauen Messung von Oberflächendehnungen, um bei statischen oder dynamischen Untersuchungen die mechanischen Spannungen in Bauteilen und Konstruktionen zu bestimmen.

Beim PhotoStress-Verfahren wird zuerst das zu untersuchende Bauteil mit einem dehnungsempfindlichen Plastikmaterial beschichtet. Wird dann das Bauteil den Betriebslasten ausgesetzt, übertragen sich die Dehnungen in die Plastikschicht, und diese nimmt den gleichen Dehnungszustand an wie das Bauteil. Der beschichtete Bereich wird jetzt mit polarisiertem Licht von einem Reflexions-Polariskop beleuchtet, und durch das Polariskop betrachtet, erscheint ein informatives Farbmuster, das den Dehnungen (oder Spannungen) entspricht und sie somit sichtbar und messbar macht (Abb.1).

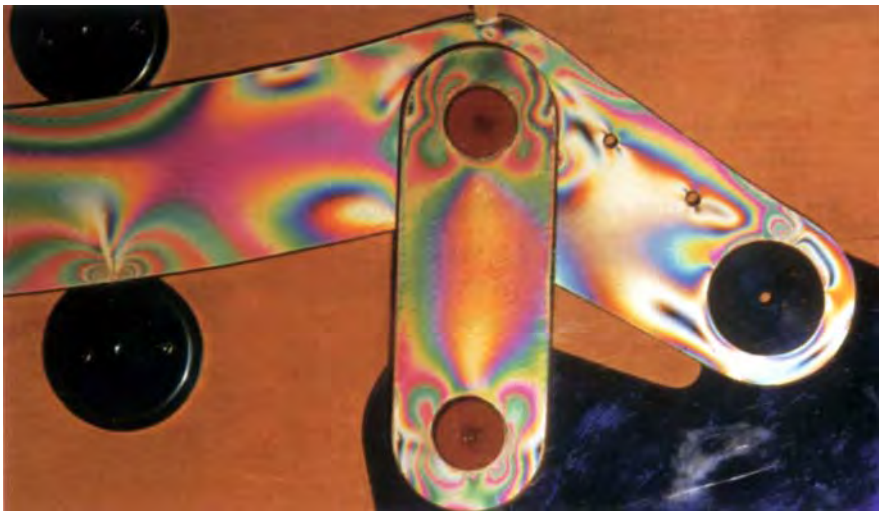


Abb.1 - PhotoStress-Farbmuster am Steuergestänge eines Passagierflugzeugs.

Es ergibt sich so ein unmittelbarer Überblick über die gesamte Spannungsverteilung und hoch beanspruchte Bereiche sind sofort augenfällig. Mit einem am Polariskop befestigten optischen Aufnehmer (Digitalkompensator) kann rasch und einfach eine quantitative Spannungsanalyse durchgeführt und die gesamten Spannungsverteilungen können fotografisch oder mittels Videoaufzeichnung bleibend dokumentiert werden.

PhotoStress ermöglicht die folgenden Analysen und Messungen:

1. Flächige Spannungsanalysen, die eine Gesamtbeurteilung der Dehnungs-/Spannungsgrößen, deren Gradienten sowie die Bereiche der Maximalspannungen zulassen.
2. Quantitative Messungen, direkt ausgedrückt in Spannungseinheiten (Pascal) oder Dehnungseinheiten ($\mu\text{m}/\text{m} = 10^{-6}$), wie:
 - a) Hauptspannungsrichtungen an jedem Punkt der beschichteten Bauteiloberfläche.
 - b) Größe und Vorzeichen der Tangentialspannung entlang freier Ränder und in allen Bereichen einachsiger Spannungen.
 - c) Bei zweiachsigen Spannungszuständen die Größe der Hauptspannungsdifferenzen an jedem beliebigen Punkt innerhalb der beschichteten Bauteilfläche.
 - d) Die individuellen Werte und Vorzeichen der Hauptspannungen mittels der PhotoStress-Schlitzmethode.

Weitere, spezielle Leistungsmerkmale:

- Unmittelbares Erkennen von Spannungsgradienten und der Gesamtspannungsverteilung.
- Sofortige Identifikation von über- und unterbeanspruchten Bereichen.
- Beobachtung der Spannungsverteilungen bei variierenden Belastungen und Belastungsarten.
- Vergleich der mit dem PhotoStress-Verfahren ermittelten wirklichen Spannungsverteilung und den entsprechenden Resultaten von Modellverfahren wie die Finite Element Methode (FEM), womit ein besseres Verständnis von FEM und daraus resultierenden Daten erlangt wird.
- Erkennen und Messen von plastischen Verformungen nach Bauteilentlastung mittels Auswertung bleibender PhotoStress-Farbmuster.

FLÄCHIGE INTERPRETATION VON SPANNUNGSVERTEILUNGEN

Das spannungsoptische Dehnungsmuster erscheint als eine Serie einander folgender farbiger Bänder (Isochromaten), wobei jedes Farbband eine unterschiedliche Größe der Differenz der Hauptspannungen repräsentiert ($\sigma_1 - \sigma_2$). Die beschichtete Bauteilfläche bleibt anfangs, im unbelasteten Zustand, dunkel (farblos). Wird das Bauteil Schritt-für-Schritt ansteigend belastet, werden in Bereichen hoher Beanspruchung die ersten Farben erscheinen. Bei weiterer Lasterhöhung breiten sich die Farbbänder schliesslich über die ganze beschichtete Fläche aus. Ein geschulter Techniker kann jetzt bereits spannungsfreie Bereiche, Spannungsgradienten und die gesamte Spannungsverteilung erkennen. Abb.2 zeigt die Abfolge der Farbänderung (von links nach rechts) an einem PhotoStress-beschichteten Aluminiumteil unter ansteigender Zugbelastung.

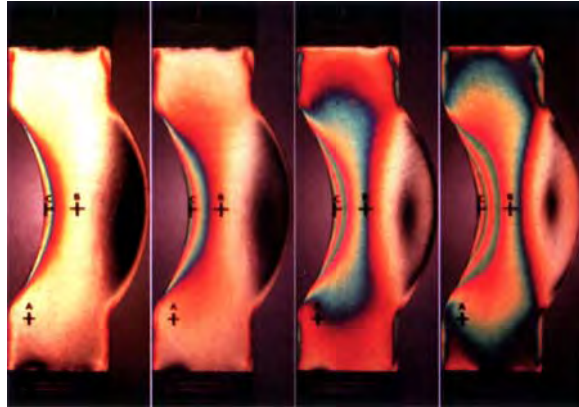


Abb. 2

zeigt die Abfolge der Farbänderung (von links nach rechts) an einem PhotoStress-beschichteten Aluminiumteil unter ansteigender Zugbelastung.

SPANNUNGSMESSUNG AN EINEM PUNKT

Können die Farbbänder als Spannungswerte identifiziert werden, so muss für quantitative Messungen doch eine spezielle Vorrichtung (Kompensator) eingeführt werden. Die Messung geschieht einfach derart, dass man am Drehknopf des Kompensators solange dreht, bis am gewählten Messpunkt die Farbe verschwindet (Abb.3). Mittels des so gewonnenen Kompensatormesswert wird mit einem Computer und der Software PhotoStress PSCalc™ der entsprechende Spannungswert errechnet.



Abb. 3

Um die Hauptspannungsrichtungen zu messen, wird ein anderer Drehknopf bedient, bis der gewählte Messpunkt von einer schwarzen Linie abgedeckt wird (siehe Abb.4). Die Hauptspannungsrichtung wird dann auf der Bauteiloberfläche als Laserlichtstrahl angezeigt.

Mit dieser einfachen Vorgehensweise erhält man schnell und sicher die Maximalspannung (σ_1) ebenso wie die Hauptspannungsdifferenz

($\sigma_1 - \sigma_2$).

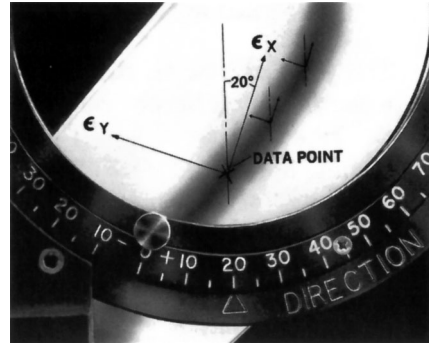


Abb. 4

Anmerkung 1: Das PhotoStress-Beschichtungsmaterial ist ein dehnungsempfindlicher Werkstoff und vorderhand wird also Dehnung gemessen. Unter Einführung der Kennwerte des Bauteilmaterials werden aus den Dehnungswerten die Spannungen errechnet.

Anmerkung 2: Wegen vollständiger Informationen über die Theorie des PhotoStress-Verfahrens, die Bauteilbeschichtung und den detaillierten Messprozess siehe die TechNote TN-702 „Introduction to Stress Analysis by the PhotoStress Method“ (VMM-TN0702) von Vishay Precision Group.

Beispiele PhotoStress- beschichteter Bauteile

PhotoStress-Beschichtungen können auf die Oberfläche von so gut wie allen Bauteilen aufgebracht werden, ohne Rücksicht auf ihre Form, ihre Größe oder ihre Werkstoffzusammensetzung. Um komplex geformte Oberflächen zu beschichten, wird flüssiges Plastikmaterial auf eine ebene Gießplatte gegossen, wo man es teilpolymerisieren lässt. Solange es in einem formbaren Zustand ist, wird es von der Gießplatte herunter genommen und per Hand an die Formen der Bauteiloberfläche angeformt (wie unten gezeigt). Nachdem die Schicht voll ausgehärtet ist, wird sie mittels eines reflektierenden Zements auf die Bauteiloberfläche geklebt, womit der Test beginnen kann. Zur Beschichtung ebener Flächen werden vorgefertigte Platten, auf gewünschte Größen zurecht geschnitten, auf die Bauteile geklebt.

Die folgenden Seiten zeigen typische beschichtete, für den Versuch vorbereitete Bauteile.



Aufformen einer PhotoStress-Beschichtung auf das Gehäuse einer Fahrzeugwasserpumpe.



Geformte PhotoStress-Schichtschalen, fertig zum Aufkleben auf ein gegossenes Motorhalterungsteil.



Motorhalterungsteil mit aufgeklebter Beschichtung. Die Beschichtung bedeckt das gesamte Bauteil, mit Ausnahme der Bereiche unmittelbar um die Schraubenlöcher und in Bereichen, die mit Komplementärbauteilen in physischen Kontakt kommen.



Getränkeflasche aus Kunststoff, beschichtet für den Vergleich zwischen einer PhotoStress- und einer FEM-Analyse.



Ständer eines Mixers aus der industriellen Nahrungsmittelverarbeitung; Beschichtung des Fußes und des vertikalen Ständers.



Beschichtung an einem Sessel in Bereichen, die zur Verbesserung der Flexibilität ausgelegt wurden.



PhotoStress-Beschichtung an der Radnabe eines Hochgeschwindigkeitszugs.



Neukonstruierte Gelenkkupplung, beschichtet und fertig für die PhotoStress-Untersuchung.



Fasergewickelter Komposit-Druckkessel, teilbeschichtet für eine PhotoStress-Untersuchung. Die Beschichtung kann ohne weiteres auf jegliches Material, ungeachtet seiner Homogenität, aufgebracht werden.



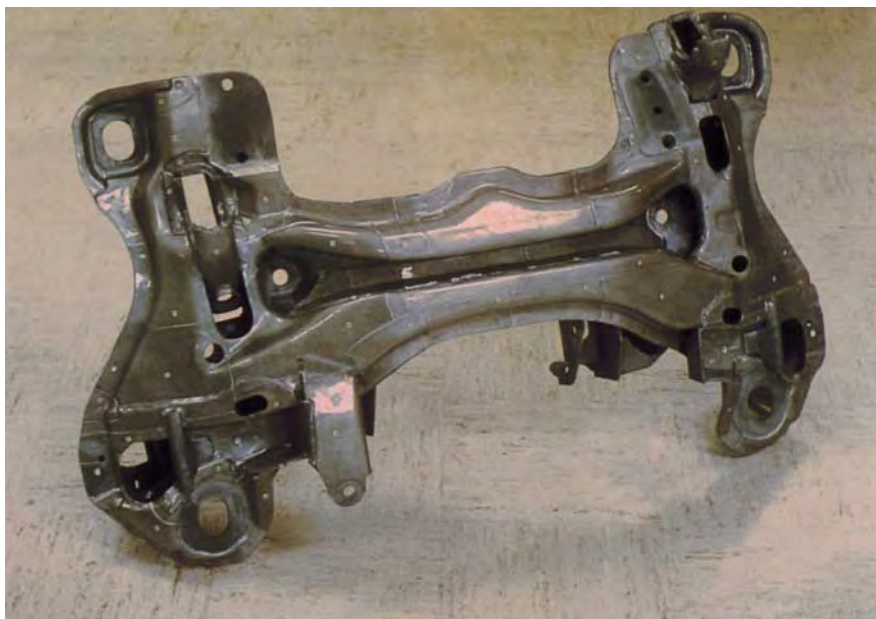
Typische Versuchsproben, die für studentische Laborpraktika an Ingenieur- und Hochschulen beschichtet sind.



PhotoStress-Beschichtung am Gussgehäuse einer komplex geformten Kraftstoffeinspritzpumpe für eine Jetturbine.



PhotoStress-Beschichtung eines Bohrkopfes aus der Ölfeldexploration.



Komplex geformtes Automobil-Rahmenteil mit PhotoStress-Beschichtung.



Großer Druckbehälter mit PhotoStress-Beschichtung in einem durch Rippen verstärkten Bereich.



Kugeliger Druckbehälter mit PhotoStress-Beschichtung über die gesamte Oberfläche.



PhotoStress-Beschichtung über die Gesamtoberfläche eines Lüfterrads zur Durchführung einer dynamischen Untersuchung.



Teil einer Automobilsteuerung, beschichtet für eine PhotoStress-Untersuchung.



Beschichtete Kettenglieder einer Erdbewegungsmaschine.



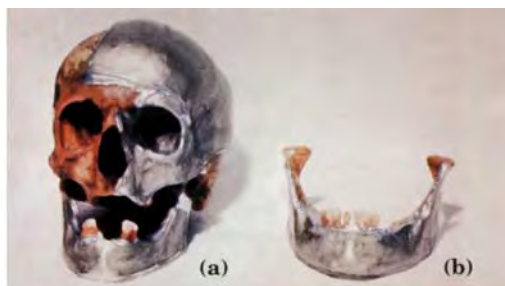
PhotoStress-Schicht zum Aufkleben auf einen Zahnring.



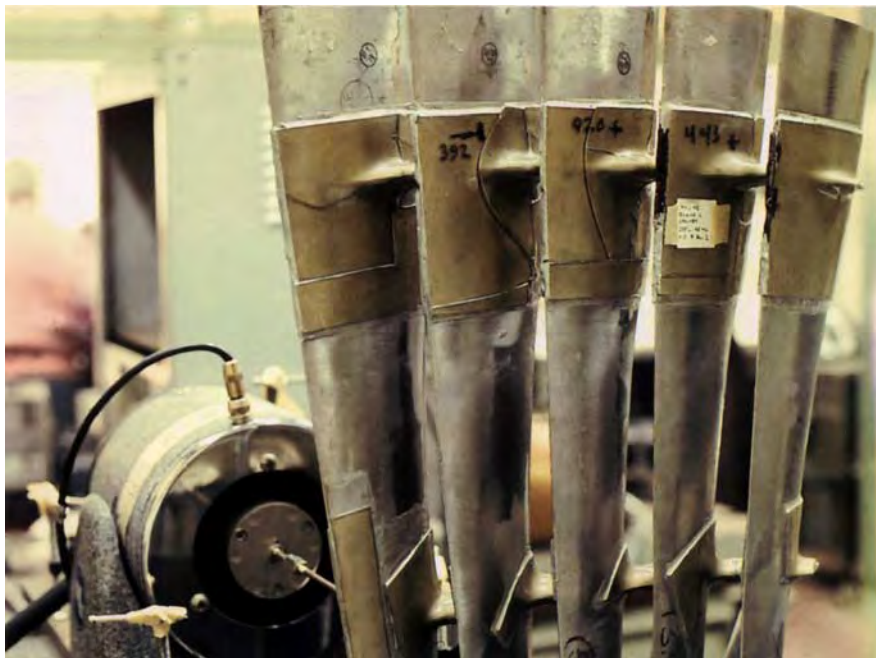
PhotoStress-Beschichtung auf dem Gussgehäuse einer Feuerwehrpumpe.



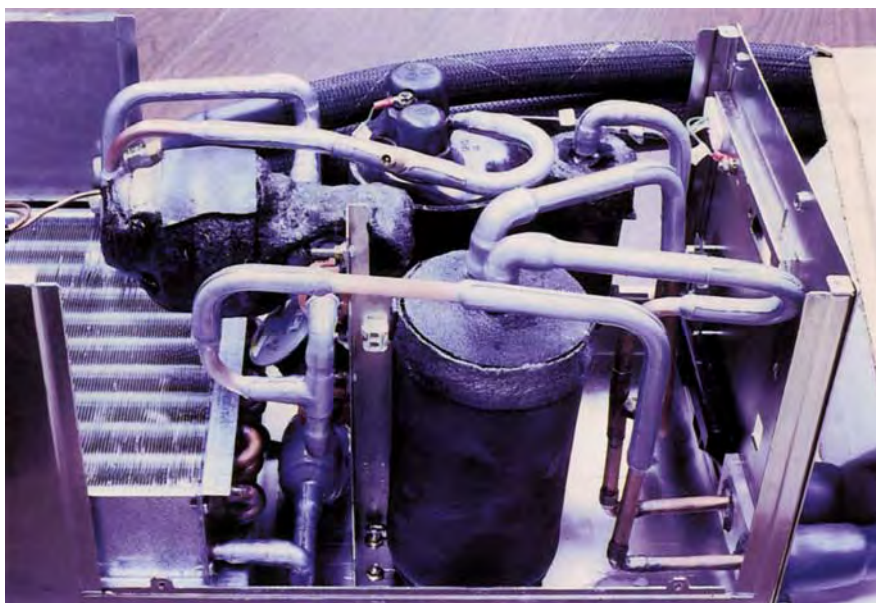
PhotoStress-Beschichtung an einem Unterkiefermodell zur Optimierung von Zahnbrücken.



Beschichtung auf einem menschlichen Schädel.
a) Impulsbelastung mit scharfen und stumpfen Gegenständen; b) Druckkraftbelastung zur Simulation von Kauvorgängen.



Dampfturbinenblätter, teilbeschichtet für die PhotoStress-Analyse unter dynamischen Bedingungen.



PhotoStress-Beschichtung auf dem Rohrsystem einer Kühlmaschine.

Industrielle Anwendungsbeispiele

Das PhotoStress-Verfahren hat eine reiche und gut dokumentierte Geschichte erfolgreicher Anwendungen in praktisch allen Bereichen industrieller Produktions- und Konstruktionsprozesse, bei denen experimentelle Spannungsanalyse eine Rolle spielt: Automobiltechnik, landwirtschaftliche Maschinen, Luft- und Raumfahrt, Hoch- und Tiefbau, allgemeiner Maschinen- und Motorenbau, Druckbehälterbau, Schiffbau, Büroausrüstungen, Brückenbau, Haushaltsgeräte und viele andere mehr. Dieses Kapitel zeigt den Einsatz des PhotoStress-Verfahrens bei einer Vielfalt von spannungsanalytischen Anwendungen, wie z.B. bei der Analyse von Montagespannungen, des Aufdeckens plastischer Verformungen, der Bestimmung von Eigenspannungen, der Untersuchung anisotroper Werkstoffe, der dynamischen Spannungsanalyse und anderer.

Luft- und Raumfahrtanwendungen

Viele Bauteile und Konstruktionen aus Luft- und Raumfahrttechnik sind mit PhotoStress spannungsanalytisch untersucht worden, sowohl unter statischen als auch unter Flugbedingungen. Das Verfahren ist für solche Anwendungen besonders gut geeignet, da es Spannungsdaten ganzer Flächen von Prototyp-Ausführungen liefern kann.

Flugzeug-Fensterrahmen.

Der Fensterrahmen eines Passagierflugzeugs wurde mehreren Tests unterzogen. Abb.1 zeigt das Farbbandmuster auf dem Fensterrahmen bei einer Belastung, die 98% der Volllast entsprach. Die Spannungskonzentration um die Bohrlöcher tritt klar hervor.



Abb. 1

Tragflächen und Zugangsöffnungen. Die Tragflächen und Treibstofftank-Zugangsöffnungen des Lockheed C-141 Militärtransporters sind unter Druckkraftbelastung untersucht worden. Die Analyse erstreckte sich auf die elastischen und elasto-plastischen Verformungsbereiche. Zusätzlich war nach der Belastungsschwelle gefragt, die elastisches Ausknicken verursacht. Das Ausknicken wurde während der Belastung der Tragfläche und dem Fotografieren des spannungsoptischen Farbmusters beobachtet. Das Einsetzen des Knickvorgangs wurde sichtbar, als plötzlich in einer Tragflügelsektion eine hohe Zahl asymmetrischer spannungsoptischer Ordnungen erschien. So wurde das Ausknicken spannungsoptisch bereits festgestellt, bevor die eingesetzten Wegaufnehmer oder die Belastungsdaten der Testmaschine irgendwelche Unlinearitäten erkennen ließen.

Abb.2 zeigt das PhotoStress-Farbmuster einer Tragflächensektion bei einer Last von 20 kN. Es ist zu bemerken, dass die Zugangsöffnung zum Treibstofftank, eigentlich als nichttragendes Bauteil konzipiert, höhere Spannungen zeigt, als der umgebende Tragflächenbereich. Abb.3 verdeutlicht die Existenz bleibender Verformung der Versteifungsrippen an der Zugangsklappe nach der Entlastung. In der gezeigten Ansicht (der Klappenrückseite) beweisen die nach der Entlastung bleibenden Farbmuster, dass ein elasto-plastisches Ausknicken der Rippen vorlag.



Abb.2

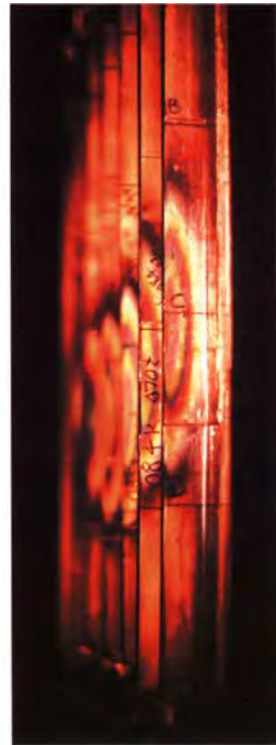


Abb.3

Landefahrwerk. Die Landefahrwerke fast aller modernen Flugzeuge sind mit PhotoStress-Komplettbeschichtungen den notwendigen Spannungsanalysen unterzogen worden. Diese Landefahrwerke sind aus geschmiedeten und aus formgebend bearbeiteten hochfesten Stählen gefertigt. Das gesamte Fahrwerk ist eine hochkomplexe Konstruktion aus verschiedenen Bauteilen, die einer Vielzahl unterschiedlicher sowohl statischer als auch schockartiger Belastungen ausgesetzt ist. Mitunter sind bestimmte Bauteile im Betrieb nicht weniger als sechs verschiedenen Belastungsbedingungen ausgesetzt. Nun kommt aber ein Fahrwerk während eines Flugs nur zweimal zum Einsatz, stellt also während der übrigen Zeit eine tote Last dar, und jegliche Gewichtsreduktion ist äußerst vorteilhaft. Gleichzeitig ist die Betriebssicherheit von offensichtlich überragender Bedeutung. Also muss mit großen Sicherheitsfaktoren konstruiert werden, es sei denn, die Spannungsverteilungen in der Konstruktion sind für alle Belastungsarten und -größen genau bekannt. Abb.4 zeigt die PhotoStress-Untersuchung des Airbus A330/340 Landefahrwerks. (Foto mit freundlicher Genehmigung von Dowty Rotal Ltd, Cheltenham, England.)



Abb.4

In diesem Fall ist das Fahrwerk im Vorentwicklungsstadium für Testzwecke als herunterskaliertes Modell aus einem Epoxyharz-Werkstoff gefertigt worden. Nach sorgfältiger Untersuchung und Analyse der Oberflächendehnungen aller Konstruktionselemente werden Änderungen vorgeschlagen und in die Konstruktion der Metall-Hauptausführung des ersten Prototyps einbezogen. Sodann werden zusätzliche PhotoStress-Analysen durchgeführt, um vor der Herstellung der produktionsreifen Ausführung und des Zulassungstests endgültige Konstruktionskriterien zu



Abb. 5

erlangen. Abb.5 zeigt das PhotoStress-Farbmuster eines bestimmten Bereichs des Airbus-Fahrwerks während einer statischen Testsequenz. In Abb.6 wird der endgültige Fahrwerk-Prototyp eines Kampfflugzeugs gezeigt, bei dem die gesamte Oberfläche beschichtet war. In Abb.7 sieht man die PhotoStress-Farbmuster in verschiedenen Bereichen dieses Fahrwerks.

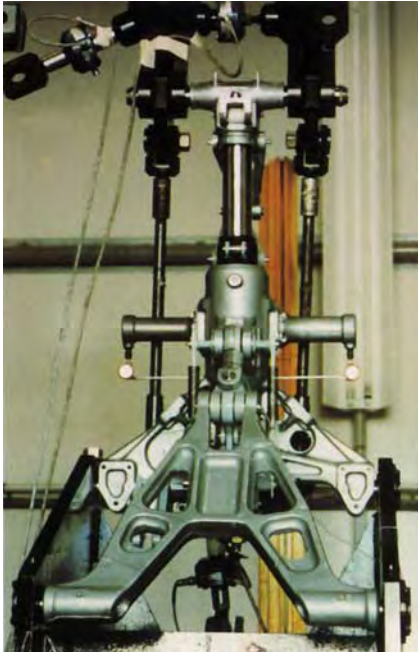


Abb. 6

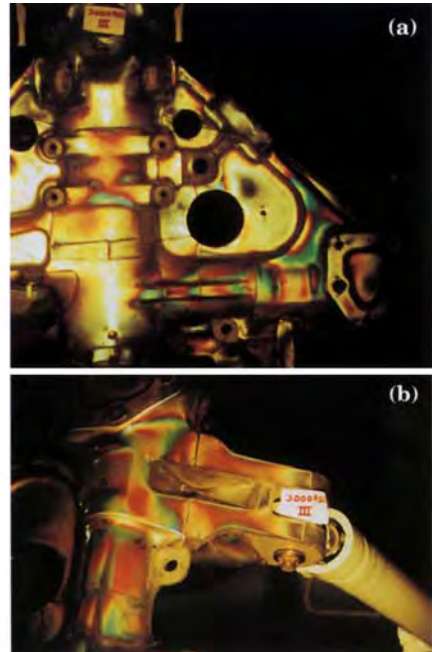


Abb. 7



Abb. 8

Abb.8 zeigt das PhotoStress-Farbmuster in einem teilbeschichteten Bereich des Boeing 767 Hauptfahrwerksprototyps.

Rahmen und Gehäuse von Flugzeugturbinen. Ein Bereich der dünnen Außenhaut einer Jetturbine wurde PhotoStress-beschichtet um den Ort, die Verteilung und die Größe von Spannungsspitzen in der Nachbarschaft von Verstärkungsplatten um die Leitungsstutzen und Versteifungsstreben zu bestimmen. Die Betriebsbelastung wurde als hydrostatischer Innendruck mittels eines Wasserumlaufsystems simuliert. Abb.9a zeigt den beschichteten Bereich, und Abb.9b das Dehnungs-Farbmuster, wie es an einem spezifischen Ort der Verstärkungsplatten und Streben zu beobachten ist. Es war klar, dass die maximalen Spannungen sich zwischen den Verstärkungsplatten entwickeln würden. Ebenso klar war es allerdings, dass in den Zwischenräumen wo Streben positioniert waren keine Spannungsspitzen auftreten würden. Unregelmäßigkeiten der Spannungsmuster an symmetrischen Punkten waren auf kleine Dimensionsabweichung zurückzuführen, die durch den Herstellungsprozess bedingt sind (Schweißen) sowie auf kleine flache Bereiche in einer ansonsten gekrümmten Oberfläche, etc.

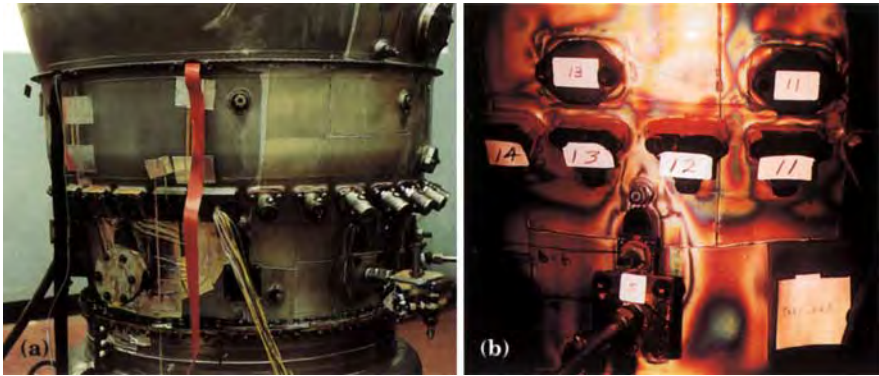


Abb.9

Einspritzpumpengehäuse einer Jetturbine. Das PhotoStress-Farbmuster enthält die gesamte Spannungsverteilung über der ganzen Oberfläche eines beschichteten Bauteils, und es ist dabei ebenso wichtig spannungsfreie Bereiche oder solche mit niedriger Spannung zu erkennen, wie solche mit hohen Spannungen. Daraus können sich nämlich Möglichkeiten ergeben, Material wegzunehmen und so Gewichtseinsparungen zu erzielen. Ein solches Wegnehmen von Material führt aber nicht nur zu Gewichtsreduzierung, sondern hilft auch bei der günstigen Umverteilung von Spannungen und dem Abbau von hohen Spannungspegeln in den umgebenden Bereichen. Im vorliegenden Fall des gegossenen Pumpengehäuses handelt es sich um Versuche zur gezielten Gewichtsminderung mittels Materialeinsparungen ohne Sicherheitseinbußen. Die Oberfläche des Einspritzpumpengehäuses wurde komplett beschichtet und dann mit Innendruck beaufschlagt. Bereiche niedriger Beanspruchung waren identifizierbar, worauf dort Material von der Innenwand des Bauteils entfernt wurde. Das Pumpengehäuse wurde jetzt einem neuen PhotoStress-Test unterzogen, um die Änderungen der Spannungsverteilung und der Spannungsgrößen zu analysieren. Dieser Prozess wurde wiederholt, bis ein idealisiertes Spannungs/Gewichtsverhältnis gefunden war. Abb.10a zeigt das Einspritzpumpengehäuse beschichtet und testbereit, und Abb.10b das durch den Innendruck hervorgerufene Spannungsfarbmuster.

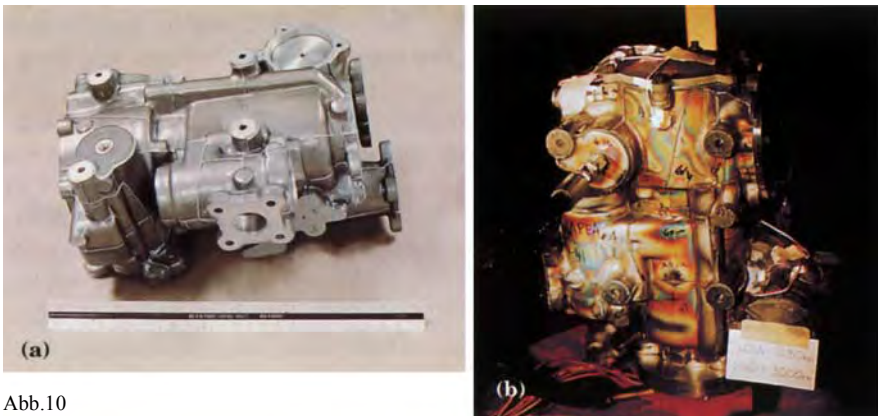


Abb.10

Aluminium-Schweißverbindungen beim Space Shuttle. Die Reaktion von Photo-Stress-Beschichtungen auf unelastische Verformungen der Materialien, auf die sie aufgeklebt sind, machen sie für die Analyse von Aluminium-Schweißverbindungen in besonderem Maße nützlich. Im allgemeinen besteht eine Aluminium-Schweißverbindung aus einem kleinen Volumen sehr duktilen Füllmaterials relativ niedriger Festigkeit, das umgeben ist von zwei großen Volumina des zu verschweißenden Grundmaterials, welches weniger duktil und von relativ höherer Festigkeit ist. Wird die Schweißverbindung belastet, ist der entstehende Spannungszustand 3-dimensional, und das Material verformt sich in den drei orthogonalen Richtungen ganz unterschiedlich.

Verbindungen aus geschweißtem Aluminium sind bei Raumfahrtkonstruktionen sehr zahlreich, einschließlich des Space Shuttles sowie bei Feststoff-Raketenantrieben, bei Flüssigkraftstofftanks und bei den Raumstationen. Grundsatzuntersuchungen an der Abgasschürze des Shuttle Feststoffantriebs und an seinen neuen Aluminium-Lithium-Außentanks beinhalteten auch eine Photo-Stress-Analyse. Bei der Untersuchung der Abgasschürze wurden die Schweißverbindungen unter einachsiger Zugspannung und unter reiner Biegung analysiert. Geschweißte Proben für Zug- und Biegeversuche wurden mit einer PhotoStress-Beschichtung versehen und in einer computergesteuerten Universalprüfmaschine getestet. Die maximalen Scherdehnungen wurden in einem Stufenlast-Programm gemessen und zwar mit einem Reflexionspolariskop, welches mit einem elektronischen Digitalkompensator, einem Telemikroskop und einer Anzeige/Drucker-Einheit ausgestattet war.

Abb.11 zeigt eine typische Zugprobe mit dem Farbmuster bei einer Spannung von 260 MPa, Abb.12 eine Probe für die reine Biegebelastung mit dem Spannungsfarbmuster bei einem Biegemoment von 1920 Nm. Die Schweißnähte dieser Proben waren 9-lagig und hatten eine Gesamtdicke von 35,6 mm.

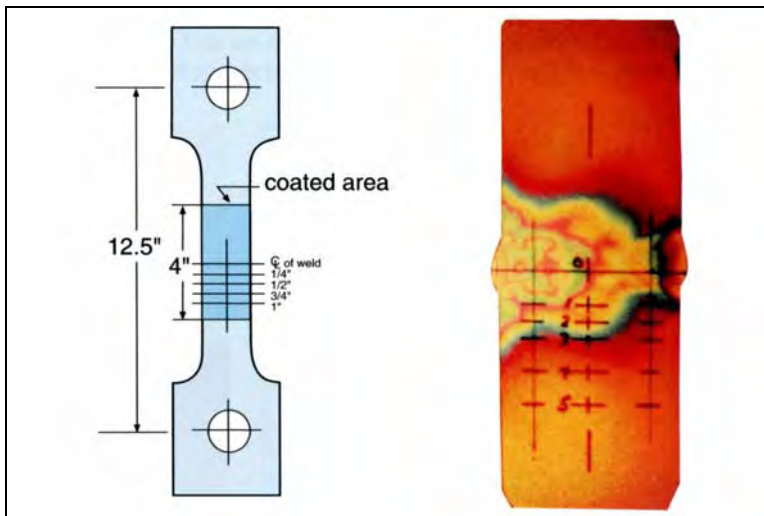


Abb. 11

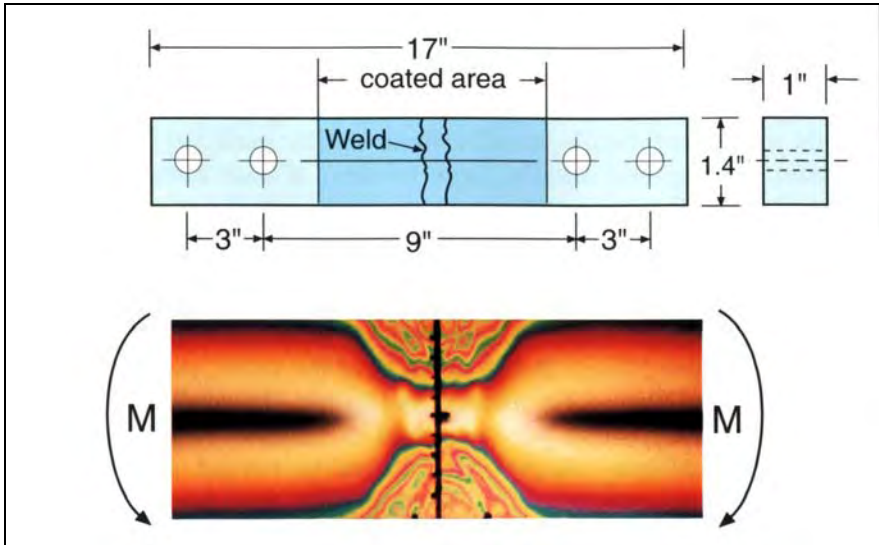


Abb. 12

Abb.13 zeigt das typische Beispiel eines Spannungs/Dehnungs-Diagramms, wie es sich an verschiedenen Punkten von Zugproben aus der Abgasschürze ergab. Obwohl im Diagramm nicht erscheinend, wurden in der Schweißnaht und der temperaturbeeinflussten Zone Scherdehnungen von über 40000 $\mu\text{m}/\text{m}$ gemessen. Individuelle Kurven repräsentieren eine polynomische Anpassung 5. Ordnung an Daten, die aus drei sequentiellen Versuchen ermittelt wurden.

In der Studie der Außen-Flüssigkeitstanks wurden die Schweißverbindungen mit Zugproben unter einachsiger Spannung getestet. Abb.14 zeigt ein typisches Spannungs-Farbmuster bei 221 kPa Zugspannung. Man sieht, dass die sich Farbbänder über und unter der horizontalen Mittellinie der Schweißung (Punkt 0)

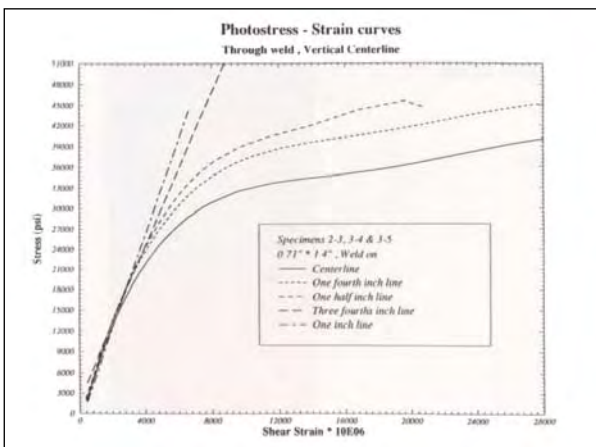


Abb. 13

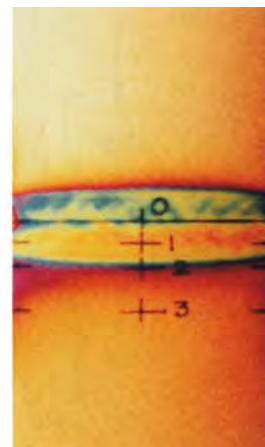


Abb. 14

unterscheiden, was anzeigt, dass die Schmelzgrenze (3,05 mm über und unter Punkt 0) zwischen dem Füllmaterial und dem Grundmaterial der bevorzugte Bereich für plastische Verformungen ist (Punkt 1). In dieser Hinsicht verhielten sich alle Proben gleich. Sie alle hatten eine Schweißnahtdicke von 5,08 mm, aufgetragen in zwei Lagen.

Als weiterer Teil des gesamten Untersuchungsprogramms wurde am Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama, ein Schweißnahttest an der Hauptausführung der Shuttle-Abgasschürze vorgenommen und zwar in der Nachbarschaft eines Niederhalters. Abb.15 zeigt eine Zeichnung des Niederhaltersposition auf der Schürze, und die Lage der Schweißnaht wird in Abb.16 angezeigt. Das Spannungsfärbemuster in der PhotoStress-Beschichtung bei 70 % der gedachten Belastungsgrenze ist in Abb.17 zu sehen. Die Versuchslasten bestanden aus Zuglast-, Torsions und Biegekomponenten, die alle gleichzeitig einwirkten.

Diese Abhandlung ist ein Beitrag von Dr. S. C. Gambrell Jr. Von der University of Alabama. Dr, Gambrell hat für die NASA mit beträchtlichen Forschungsarbeiten zur Dehnungsanalyse von Schweißnähten am Space Shuttle beigetragen.

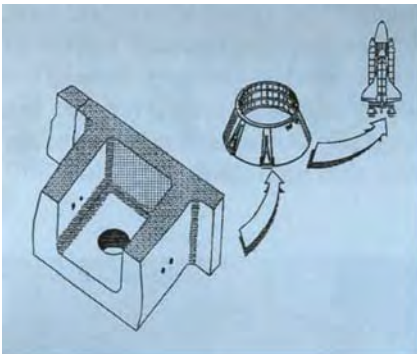


Abb. 15

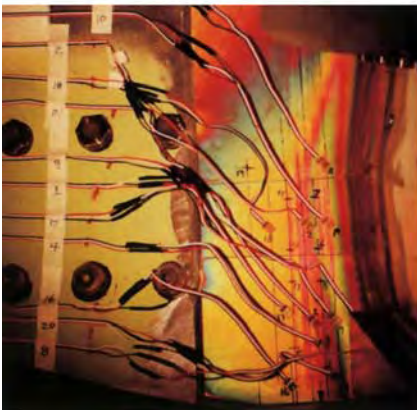


Abb. 17

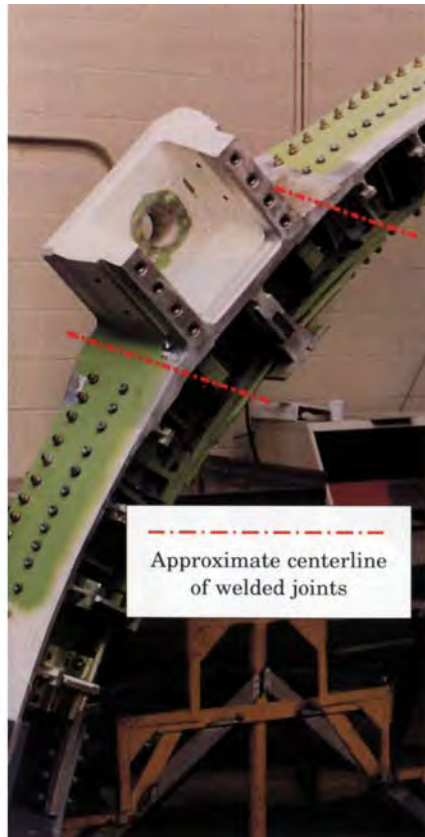


Abb. 16

Montagespannungen

Eines der in der Praxis am wenigsten beachteten Probleme tritt auf, wenn einzelne Bauteile zu einer Gesamtkonstruktion zusammengefügt, also montiert werden. Das kann unerwartet hohe Spannungen hervorrufen. Es ist durchaus nicht ungewöhnlich, dass z.B. beim Anziehen von Bolzen und Schrauben oder beim Einpressen von Teilen lokale plastische Verformungen auftreten. Obwohl solche Verformungen nicht notwendigerweise die Betriebssicherheit der Konstruktion beeinträchtigen müssen, lehren Erfahrungen aus zahllosen Fällen, dass sich Ermüdungsrisse dort entwickeln, wo alternierende Betriebslasten solche hohen Montagespannungen überlagern. Sind sie vorhanden, werden sie sofort sichtbar, wenn vor der Montage auf gefährdete Konstruktionskomponenten eine PhotoStress-Beschichtung aufgebracht worden ist.

Ständersäule aus Aluminium. Ein PhotoStress-Test enthüllte die Hauptursache für einen Betriebsschaden am Fuß einer Aluminium-Tragsäule für Verkehrsampeln, Verkehrszeichen, etc. Abb.18 zeigt die beschichtete Säule, und in Abb.19 sieht man im geschweißten Bereich des Fußes das Bild plastischer Verformung nach Anziehen der Befestigungsbolzen. Betriebslasten, die sich zu diesen hohen, bereits vorhandenen Zugspannungen addieren, verursachten den vorzeitigen Schaden. Diese PhotoStress-Analyse erwies außerdem, dass die ungünstigen Montageeffekte durch eine Änderung der Fußkonstruktion beträchtlich zu reduzieren waren. Das erzielte man durch eine leichte Aushöhlung an der Unterseite des Fußes, und mit dieser Modifikation wurden weitere Schadensfälle verhindert.



Abb. 18



Abb. 19

Schwungrad eines Dieselmotors. Das Schwungrad eines Dieselmotors zeigte Schäden im Bereich des Bohrungskranzes für die Befestigungsschrauben. Abb.20 zeigt das ausgebaute Schwungrad mit der PhotoStress-Beschichtung im gefährdeten Bereich, wie es nach der Beschichtung wieder montiert wurde. Wie aus Abb.21a ersichtlich, entstanden beim Anziehen der Schrauben sehr hohe Spannungen, die weit über die konstruktiven Grenzen des Bauteilmaterials hinausgingen. Überlagerung mit den dynamischen Betriebsbelastungen ergaben unweigerlich vorzeitige Ermüdungsschäden am Schwungrad. Durch Montagevorgänge entstandene Spannungen wurden so mittels des PhotoStress-Verfahrens als wesentliche Schadensursache festgestellt. Konstruktionsänderungen am Schwungrad (im Bereich der Welleneinfügung) haben die Montagespannungen bedeutend erniedrigt, wie in Abb.21b ersichtlich ist.

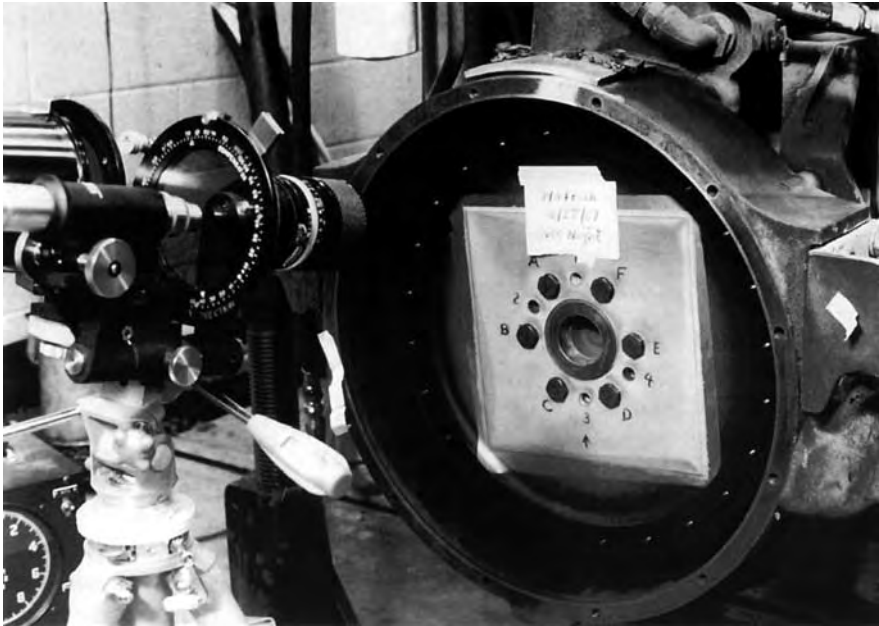


Abb. 20

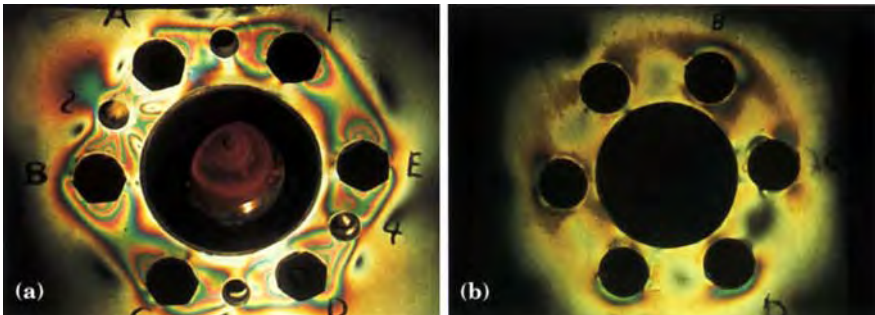


Abb. 21

Federbeinhalterung. Die Federbeinhalterung wurde an ihr Gegenstück am LKW-Rahmen angeschraubt. Davor wurde die Halterung PhotoStress-beschichtet und das Anschrauben geschah mittels eines Drehmomentschlüssels und festgelegter Momentengröße. Nach dem Anschrauben erschien in der Beschichtung ein PhotoStress-Farbmuster, das montagebedingte Spannungen auswies (Abb.22a). Danach wurden Betriebslasten simuliert, und Abb.22b zeigt das Spannungsfarbmuster in der PhotoStress-Beschichtung als Resultat der kombinierten Montage- und Betriebsspannungen.

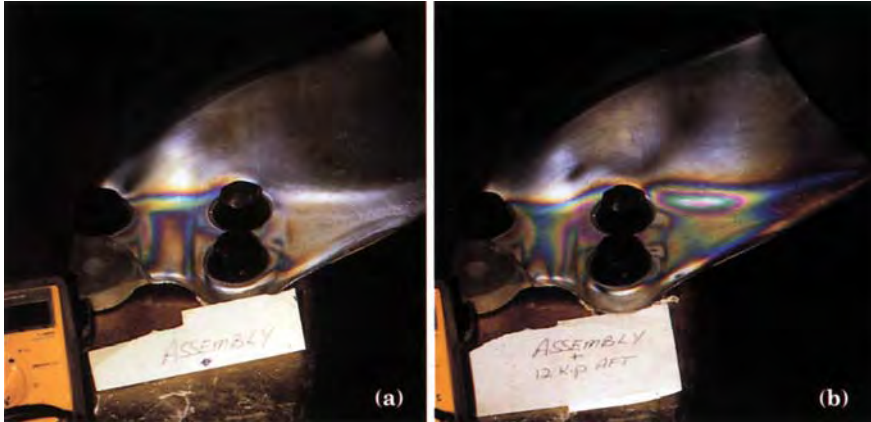


Abb. 20

ANWENDUNGEN BEI KOMPOSIT-(HETEROGENEN)-WERKSTOFFEN

PhotoStress-Beschichtungen können auf fast alle Werkstoffe aufgebracht werden. Das gilt sowohl für Kompositmaterialien wie faserverstärkte Kunststoffe, als auch für Beton, Holz oder Kompositwerkstoffe mit metallischer Matrix. Wegen ihrer Inhomogenität zeigen die meisten Kompositwerkstoffe mechanische Eigenschaften, die von Punkt zu Punkt unterschiedlich sind. Dazu kommt, dass man für die mechanischen Eigenschaften dieser Materialien gewöhnlich anisotropes Verhalten feststellen kann, d.h. die Größen dieser Kennwerte (Elastizitätsmodul, Poisson'sche Querdehnungszahl, Bruchfestigkeit, etc.) zeigen von Punkt zu Punkt richtungsabhängige Unterschiede. Daraus resultiert, dass sich die Dehnungs- und Spannungsverteilung in solchen Kompositbauteilen einer intuitiven Beurteilung in der Regel entziehen und lokale Dehnungsmessungen etwa mit Dehnungsmessstreifen (DMS) ernsthaft irreführend sein können.

Aufgrund der Möglichkeit flächiger Analysen ist PhotoStress ideal geeignet, um Grundlagen für Spannungsanalysen an Bauteilen zu erarbeiten, die aus Kompositwerkstoffen gefertigt sind. Das Verfahren enthüllt die Dehnungsverteilungen in allen Einzelheiten und die Hauptdehnungsrichtungen an jedem beliebigen Punkt über der gesamten beschichteten Bauteiloberfläche. Wie in den folgenden Illustrationen beispielhaft dargestellt, hat das Verfahren auch die Fähigkeit, die für die Inhomogenitäten ursächlichen Strukturen sichtbar zu machen.

Einfluss der Verstärkungsfasern auf die Dehnungsverteilung. Eine glasfaserverstärkte Kunststoffplatte (GFK-Platte) und eine Aluminiumplatte mit ähnlichen Abmessungen wurden beschichtet und einer einachsigen Zugbelastung ausgesetzt. Die entstehenden Dehnungsfarbmuster um die kreisrunden Ausnehmungen in den Plattenmitten waren geometrisch ähnlich, und es zeigte sich definitiv, dass die Dehnungsverteilungen im homogenen und heterogenen Werkstoff korrespondieren. Allerdings zeigen sich die farbigen Bänder im homogenen Aluminiumwerkstoff (Abb.23) als glatte, ungebrochene Linien, während sie sich im GFK-Material als diskontinuierlich darstellen und etwa wie ein Schottenkarmuster anzusehen sind (Abb.24). Abb.25 zeigt das Dehnungsfarbmuster bei einem biegebelasteten GFK-Balken.

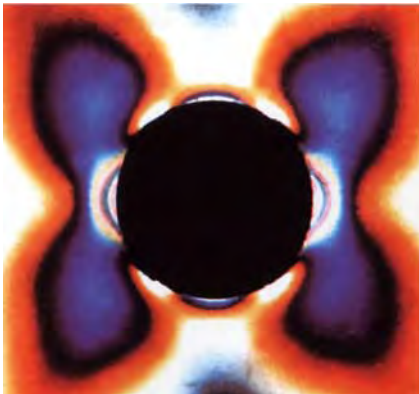


Abb. 24

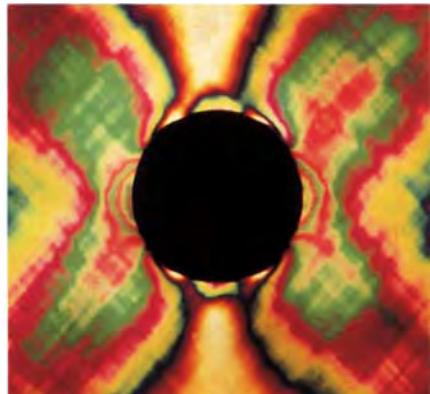


Abb. 24

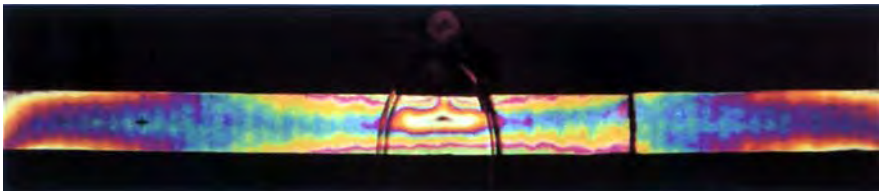


Abb. 25

Fasergewickelter Druckbehälter. Wegen unerwarteter und ungewöhnlicher Ergebnisse aus DMS-Messungen wurde an einem fasergewickelten Druckbehälter eine PhotoStress-Studie durchgeführt. Im Betriebseinsatz ist dieser Druckbehälter in einer Raumfahrtanwendung mit Festtreibstoff gefüllt, wie in Abb. 26 zu sehen ist. Nachdem der Behälter fertig gewickelt war, wurde eine kreisförmige Ausnehmung zum Einsetzen der Düse hinein geschnitten und DMS-Messungen an symmetrischen Punkten tangential zur Ausschnittkante vorgenommen. Der Behälter wurde mit Innendruck belastet, und die gemessenen Dehnungswerte

waren von einem symmetrischen Messpunkt zum anderen in hohem Maße inkonsistent. Danach wurde entschieden, einen Versuchsdruckbehälter mit einer PhotoStress-Beschichtung zu versehen (Abb.27), um ein klares Bild von der Dehnungsverteilung rund um den Ausschnitt zu bekommen; man wollte so eine Erklärung für die unterschiedlichen Dehnungsmesswerte der DMS-Messungen erhalten. Das Dehnungsfarbmuster um die Ausschnittkante (Abb.28) zeigt in eindeutiger Weise die Ursache für die unerklärlichen DMS-Messresultate. Anstelle der angenommen gleichförmigen Dehnungsverteilung um den Ausschnitt herum, zeigte sich eine Serie alternierender Farblinien mit Bereichen niedriger Dehnung zwischen ihnen, welche für die erratischen DMS-Messergebnisse ursächlich waren. Einige DMS befanden sich in Bereichen hoher Dehnung (farbiger Bereich) und andere waren zwischen den farbigen Bereichen platziert. Der Grund für diese unvorhergesehene Dehnungsverteilung liegt natürlich in der Geometrie des Faserwicklungsmusters.

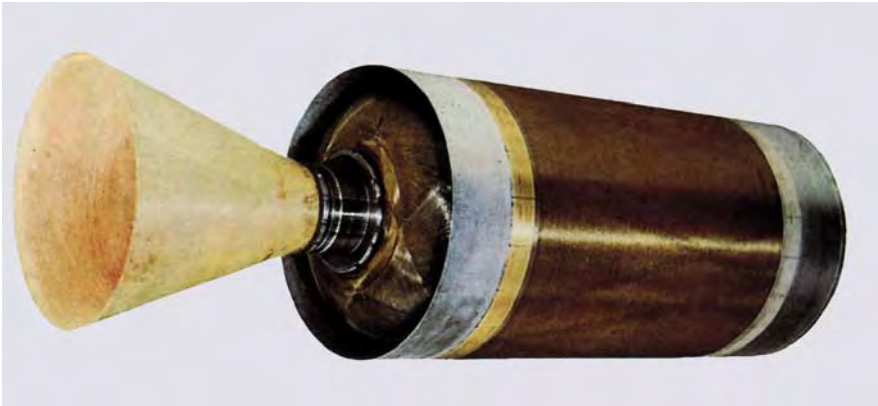


Abb. 26



Abb. 27



Abb. 28

Die letzte Lage der Glasfaserwicklungen beim Abschluss des Wickelprozesses ist vor und nach dem Ausschneiden der Düsenöffnung in Abb.29a und Abb.29b gezeigt. Es ist klar, dass an der Ausschnittkante dort, wo Faserbündel vorliegen niedrigere Dehnung vorliegen muss, als zwischen den Faserbündeln.

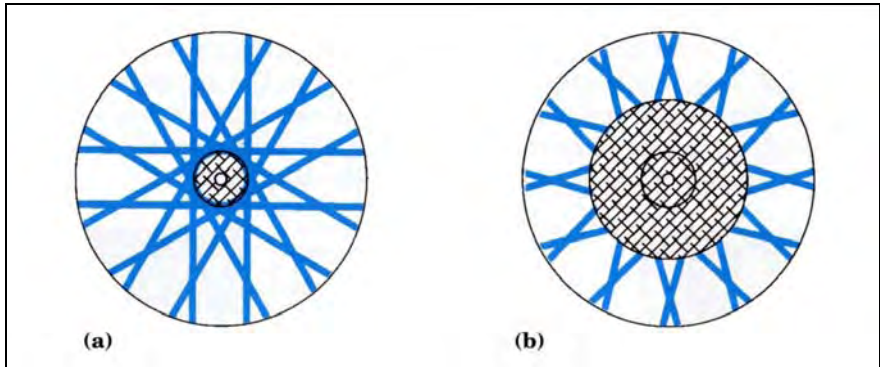


Abb. 29

Anwendungen auf Holz, Steinsalz und Wabenstrukturen. Abb. 30 zeigt ein PhotoStress-Farbmuster über den Querschnitt eines Holzträgers. Die Studie wurde zur Vervollständigung einer Analyse der Schrumpfspannungen beim Trocknungsprozess durchgeführt. Abb.31 ist die Analyse eines Paneels in Wabenkonstruktion unter Zuglast. Es wurde an der Kante des Paneels ein Schlitz als Sollbruchstelle eingeführt und die Dehnungsverteilung an der Risspitze beim Fortschreiten des Risses untersucht. In Abb.32 ist die Dehnungsverteilung in einem Steinsalzbohrkern unter Druckbelastung dargestellt. Die Studie diente zur Unterstützung von Analysen zur Tunneltechnik in Salzbergwerken.



Abb. 30

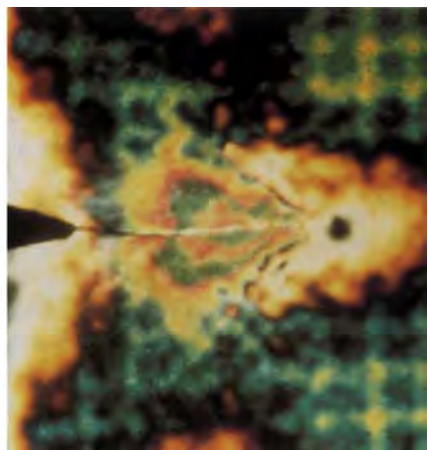


Abb. 31

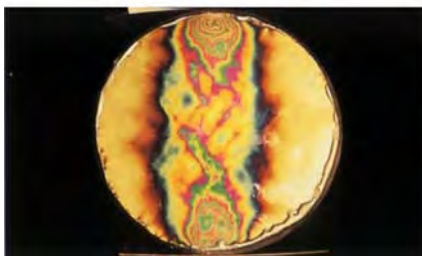


Abb. 32

Dehnungsverteilung in Beton. Die Seitenoberfläche eines Betonblocks wurde mit einer PhotoStress-Beschichtung versehen und der Block mit Druckkraft belastet. Weil Beton eine heterogene Mischung von Zuschlagstoffen (Stein) mit hohem Elastizitätsmodul und von Sand/Zement-Gemisch mit niedrigem Elastizitätsmodul ist, ergibt sich zwischen den Steinen und dem Zement eine ungleichförmige Dehnungsverteilung; dabei treten die höchsten Dehnungen im Zement auf, wie Abb.33 zeigt. Es stellte sich heraus, dass die lokalen Dehnungsspitzen bis zu viermal höher waren, als die vorliegende mittlere Dehnung, wie in Abb.34 zu sehen ist. Aus Abb.35 wird ersichtlich, dass die Position der Steine relativ zueinander den Lastfluss beeinflusst.



Abb. 33

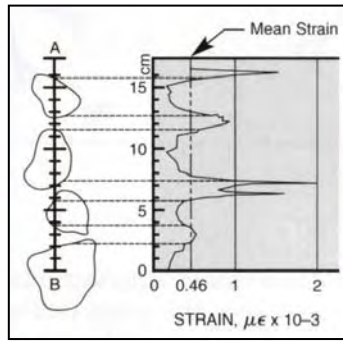


Abb. 34

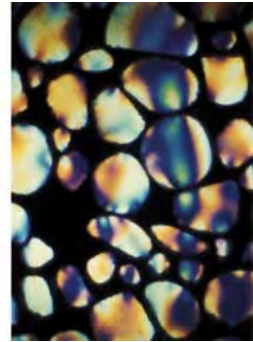


Abb. 35

EIGENSINNUNGEN

Die Entdeckung und die Messung von Eigenspannungen in Bauteilen, also Spannungen, die nicht von externen Belastungen verursacht werden, waren lange ein wichtiges und oft schwer zu fassendes Problem für den Konstruktionsingenieur. Gewöhnlich entstehen Eigenspannungen durch Produktionsprozesse wie Gießen, Schweißen, Bearbeitungsprozesse, Formgebung, Wärmebehandlungen, etc. Die hier diskutierten Eigenspannungen dürfen nicht mit den oben schon behandelten Montagespannungen verwechselt werden.

Abhängig von ihrer Verteilung, ihrer Größe und ihrem Vorzeichen relativ zu den von außen aufgetragenen Betriebslasten, sind Effekte aus Eigenspannungen für eine Konstruktion entweder vorteilhaft oder nachteilig. In vielen Fällen sind Eigenspannungen eher nachteilig und häufig die entscheidende Schadensursache für eine Konstruktion. Es gibt mehrere praktische Verfahren, mit denen man Eigenspannungen feststellen und messen kann, wobei jede ihre Vor- und Nachteile hat. In diesem Zusammenhang ist der grundsätzlich Vorteil des PhotoStress-Verfahrens, dass es die Existenz von Eigenspannungen überall dort enthüllt, wo sie auf Bauteiloberflächen auftreten. Der Nachteil besteht darin, dass die Bauteile zerschnitten, in Abschnitte zerlegt werden müssen, um die Eigenspannungen sichtbar zu machen. Bei den folgenden Beispielen wurde PhotoStress eingesetzt, um Konstruktionsprobleme zu lösen, bei denen Eigenspannungen die Hauptschadensursachen waren.

Ventilator-Nabenscheibe aus Metall. Die Nabenscheibe eines Ventilators versagte im Betrieb im Bereich des Achsen-Schweißflansches. Analytische Untersuchungen sagten für dynamische Lastsequenzen niedrige Spannungspegel voraus. DMS-Messungen nahe der Schweißverbindung unterstützten diese Voraussagen.

Für Versuchszwecke wurden mehrere Naben hergestellt und PhotoStress-Beschichtungen aufgebracht. Danach wurden die Nabenscheiben zersägt, und die aus ungleichmäßiger Erwärmung während des Schweißens entstandenen Eigenspannungen wurden ausgelöst und sichtbar. Das Spannungsfarbmuster Abb.36a enthüllt die Eigenspannungen, die im geschweißten Bereich sehr hoch waren. Moderate zyklische Betriebsspannungen, die die Eigenspannungen überlagerten, waren dann hinreichend, um zu den Schadensausfällen zu führen.

Als Konsequenz wurden die Nabenplatten nach der Herstellung spannungsfrei gegläht, und weitere PhotoStress-Untersuchungen zeigten daraufhin keine Eigenspannungen mehr (Abb.36b).

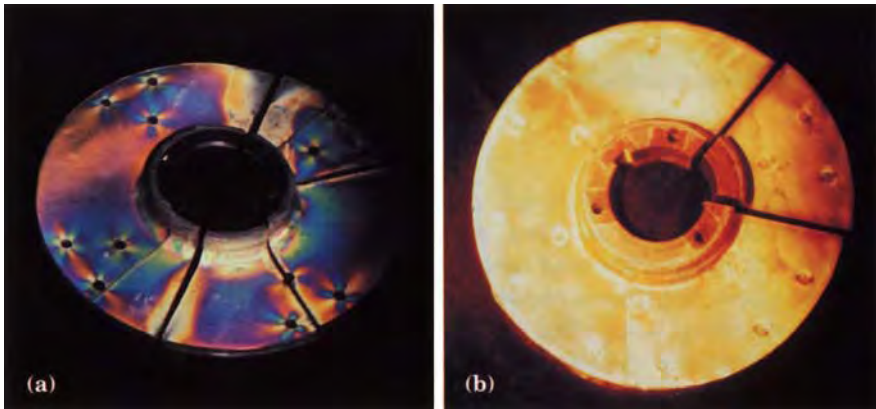


Abb. 36

Waschbecken. Für Waschbecken wurde ein neues Kunststoffmaterial entwickelt. Die Becken wurden in einem Heißformungsprozess hergestellt, und mehrere wurden installiert. Nach relativ kurzer Zeit traten im Bereich des Abflusses Risse auf. Zur Bestimmung der Schadensursache wurden im gefährdeten Bereich der Becken PhotoStress-Beschichtungen auf die Innen- und Außenseite aufgebracht (Abb.37a). Die folgenden Tests wurden durchgeführt: 1) Untersuchung der Montagespannungen bei montiertem Abflussrohr; 2) Untersuchung der durch Temperaturwechsel (heißes und kaltes Wasser) entstandenen Spannungen und 3) Analyse der Eigenspannungen.

Es zeigte sich, dass die Spannungen durch das montierte Abflussrohr unerheblich waren und die thermischen Belastungen nur einen kleinen Effekt bewirkten. Die bedeutendsten Ergebnisse ergaben sich aus der Eigenspannungsanalyse. Dazu wurde in den Abflussbereich ein Schnitt gelegt, und die PhotoStress-Beschichtung enthüllte erhebliche Eigenspannungen in diesem Bereich (Abb.37b).

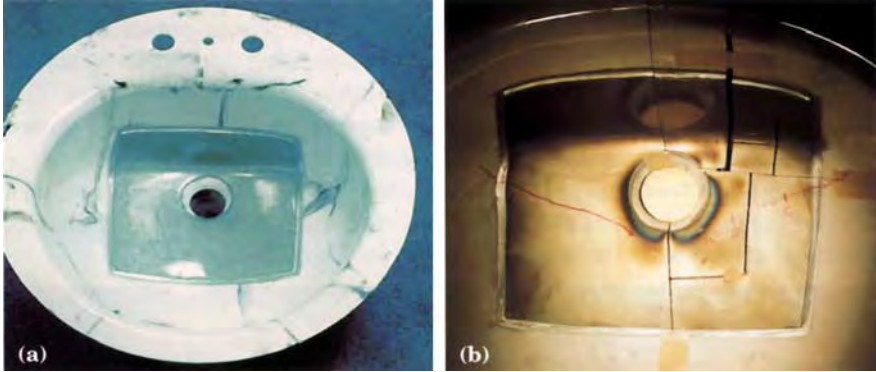


Abb. 37

Zylinderkopf eines Dieselmotors. Zu den vielen Anwendungen von PhotoStress bei der Consolidated Diesel Corporation* (CDC) zählt der regelmäßige Einsatz zur Erkennung und Messung von Eigenspannungen. Wann immer ein Zulieferer eine Änderung im Herstellungsprozess vornimmt, fordert der Cummins Engineering Standard eine Neuzulassung für die Serienproduktion. Für viele normale Gussstücke wie Motorenblöcke und Zylinderköpfe bedeutet das die Bestimmung des Eigenspannungszustand, sowohl im Hinblick auf akzeptierbare Grenzwerte als auch in Bezug auf vergleichsweise Änderungen gegenüber früher akzeptierten Prozessen.

Auslöser für solche Untersuchungen können ein neuer Zulieferer sein, Modifikationen von Wärmebehandlungen, andere Abkühlraten in der Gussform, Änderungen Gießrichtungen beim Gussvorgang oder erhebliche Verschiebungen der Masseverteilung bei konstruktiven Änderungen der Gussteile.

Consolidated Diesel Corporation ist ein Joint Venture von Case New Holland (CNH, früher Case) und Cummins Diesel, Inc. (nicht mehr Cummins Engine Company oder CECO), eine Firma die Dieselmotoren mittlerer Leistungsstärke produziert (60 bis 350 PS). Cummins produziert auch Schwerlastmotoren (300 bis 525 PS) sowie Hochleistungsmotoren 450 bis 6000 PS).



Abb. 38



Abb. 39

Eines dieser Beispiele für die Entdeckung und Messung von Eigenspannungen nach einer Änderung des Herstellungsprozesses eines Zylinderkopfs ist mit den Abb.38 und 39 illustriert. Abb.38 zeigt den beschichteten Zylinderkopf, und Abb.39 zeigt den Messaufbau mit dem Reflexionspolariscope. In Abb.40 sieht man den zur Auslösung der Eigenspannungen zerlegten Zylinderkopf, Abb.41 illustriert das Farbmuster der Eigenspannung in einer der Zylinderkopfabchnitte.



Abb. 40

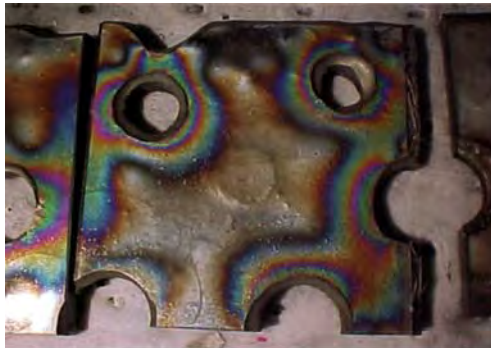


Abb. 41

ERKENNEN VON MATERIALFLIEßEN

Plastische Dehnungen, die in PhotoStress-beschichteten Bauteilen auftreten, rufen in der Schicht bleibende Dehnungsfarbmuster hervor. Somit ist das PhotoStress-Verfahren ein extrem nützliches Werkzeug zum Erkennen von Fließvorgängen in Werkstoffen. Ein simples Anschauen der beschichteten Oberflächen nach der Entlastung des Bauteils macht Bereiche, in denen plastische Verformungen stattgefunden haben, sofort augenfällig. Analytische Methoden können das Auftreten von lokalisierten Fließvorgängen nicht zuverlässig voraussagen, da solche Vorgänge zufällig sind und ihr genauer Ort unvorhersehbar ist. DMS sind ebenso wenig zuverlässige Indikatoren für lokalisierte plastische Verformung, da sie im Vergleich zu PhotoStress punktförmige Messmittel sind und nicht notwendigerweise dort installiert sein müssen, wo plastische Dehnung eintritt. Das Erkennen solcher Fließvorgänge mit dem PhotoStress-Verfahren jedoch kann auf einfachste Weise erreicht werden. Wird ein beschichtetes Bauteil oder eine Konstruktion unter Belastung beobachtet, erscheint das vielfarbige Spannungsmuster. Wird die Last weggenommen, wird das Farbmuster überall da verschwinden, wo das Bauteil in seinen Ursprungszustand zurückkehrt.

In Bereichen aber, in denen Verformungen aufgrund von Fließvorgängen bleiben, wird das Spannungsfarbmuster erhalten bleiben. PhotoStress lässt sogar das Einsetzen der ersten Fließanfänge in Form von Lüder'schen Linien erkennen, was in der Materialprüfung und bei Abnahmeversuchen von besonderer Bedeutung ist.

Schleudersitz eines Flugzeugs. PhotoStress-Beschichtungen wurden auf Schleudersitzteile eines Militärflugzeugs appliziert. Der Sitz mit einem Dummy-Piloten wurde für den Versuch in den entsprechenden Bereich der Kabine installiert. Nach dem Ausschleudern kehrte der Sitz mit dem Dummy-Piloten am Fallschirm zur Erde zurück (Abb.42). Die beschichteten Abschnitte des Sitzes wurden dann mit dem Reflexionspolariscope inspiziert, um plastische Verformungen, die eventuell während des Versuchs aufgetreten sind, zu erkennen (Abb.43).



Abb. 42

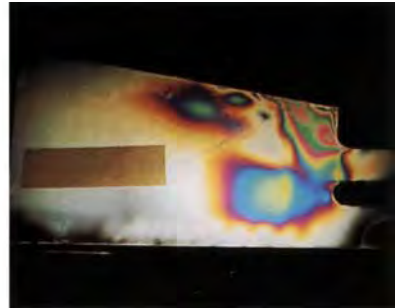


Abb. 43

Werkstoffprüfung. Das PhotoStress-Verfahren wurde eingesetzt, um das Dehnungsverhalten an gekerbten Zugproben jenseits der Materialstreckgrenze zu studieren. Abb.44a zeigt ein breites Feld plastischer Dehnung über fast die gesamte Oberfläche einer Probe, während Abb.44b bei einer anderen Probe den Initialfließvorgang in Form Lüder'scher Linien darstellt.



Abb. 44

Druckbehälter. Ein PhotoStress-beschichteter Druckbehälter wurde mit einer Kombination axialer Druckkräfte und Innendruck belastet (Abb.45a). Bei der Abnahmedruckgrenze wurde im Bereich einer Schweißverbindung eine starke Spannungskonzentration beobachtet, die zu Materialfließen führte (Abb.45b).

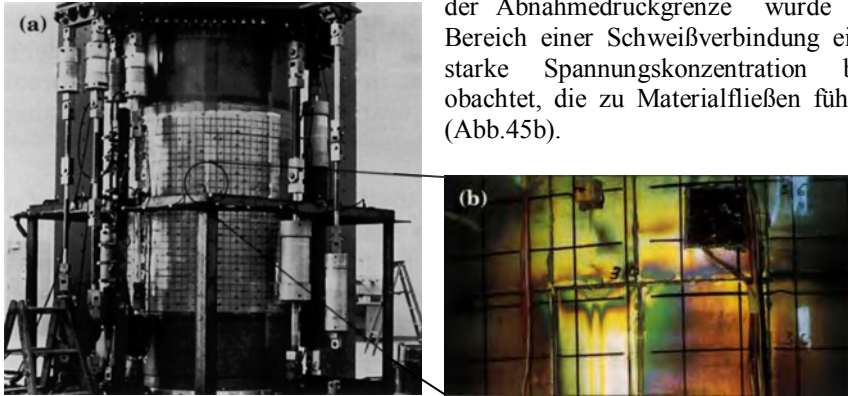


Abb. 45

Lüder'sche Linien. Eine andere Technik kann angewandt werden, wenn es gilt, plastische Verformungen auf der Innenoberfläche eines Druckbehälters zu erkennen. Man geht folgendermaßen vor:

1. Die Innenoberfläche wird im interessierenden Bereich beschichtet.
2. Der Behälter wird bis zu einem vorbestimmten Pegel mit Innendruck beaufschlagt. Nach Druckentlastung wird die Beschichtung auf permanente Farbmuster inspiziert.
3. Ist bei Schritt 2 kein permanentes Farbmuster zu beobachten, wird der Vorgang mit höherem Druck wiederholt und so fort, bis permanente Farbmuster erscheinen oder die zulässige Druckgrenze erreicht ist.

Abb.46 zeigt solche permanenten Dehnungsfarbmuster in Form Lüder'scher Linien, wie sie bei einem großen, dickwandigen Druckbehälter nach dem Abnahmetest beobachtet wurden.



Abb. 46

PHOTOSTRESS IN DER BIOMECHANIK

Äußerst interessante und bedeutende Anwendungen des PhotoStress-Verfahrens geschehen in der Biomechanik. Einsatzbereiche sind hier, um nur ein paar zu nennen, Spannungsanalysen an Skelettteilen wie Hüftgelenke, Beckenknochen und Schädel, Anwendungen bei Knie-, Ellbogen- und anderen mechanischen Gelenkproblemen, Zahnimplantate und -brücken und medizinische Hilfsapparate mechanischer Natur wie chirurgische Klammern, Zangen und andere Werkzeuge.

Hüftgelenkprothesen. Besonders bemerkenswert ist das Ausmaß der PhotoStress-Anwendung bei der Analyse von Spannungen bei Komplett-Hüftgelenkprothesen. Arbeiten auf diesem Gebiet werden sowohl in orthopädischen Forschungskliniken als auch von den Herstellern prothetischer Vorrichtungen durchgeführt. Nach Aussage einer medizinischen Forschungsgruppe hat die Anwendung von PhotoStress auf Knochen eindeutige Vorteile gegenüber anderen Dehnungsmessmethoden wie z.B. die Finite-Elementen-Methode (FEM), Reißlack, DMS oder spannungsoptische Modellverfahren. Jedes der genannten Verfahren zeigt bei der Untersuchung von Knochen problematische Einschränkungen, sei es in Hinblick auf Ungewissheiten bei der Messpunktpositionierung, der Messrichtungen und der gewöhnlich notwendigen, aber unrealistischen Annahme von Materialhomogenität. Wegen der flächigen Natur des Verfahrens bestehen solche Anwendungseinschränkungen für PhotoStress nicht, da es die Beobachtung und Messung von Dehnungsrichtungen und -größen unter variierenden Belastungsbedingungen erlaubt, ohne Rücksicht auf die Homogenität des Knochenmaterials. Einige Beispiele für die Anwendung des PhotoStress-Verfahrens auf Knochen werden hier beschrieben.

Beispiel 1. Eine PhotoStress-Analyse des Oberschenkelknochens wurde unternommen, um bezüglich einer Komplett-Hüftprothese Aufschluss über die Spannungsübertragung zu bekommen. Abb.47a zeigt das Spannungsfärbemuster am Oberschenkelknochen vor dem Einsetzen der Gelenkprothese, Abb.47b den Knochen mit der eingesetzten Prothese, und Abb.47c und 47d zeigen die Änderungen der Dehnungsverteilung auf der Knochenoberfläche im Vergleich zum Zustand vor der Gelenkimplantierung.

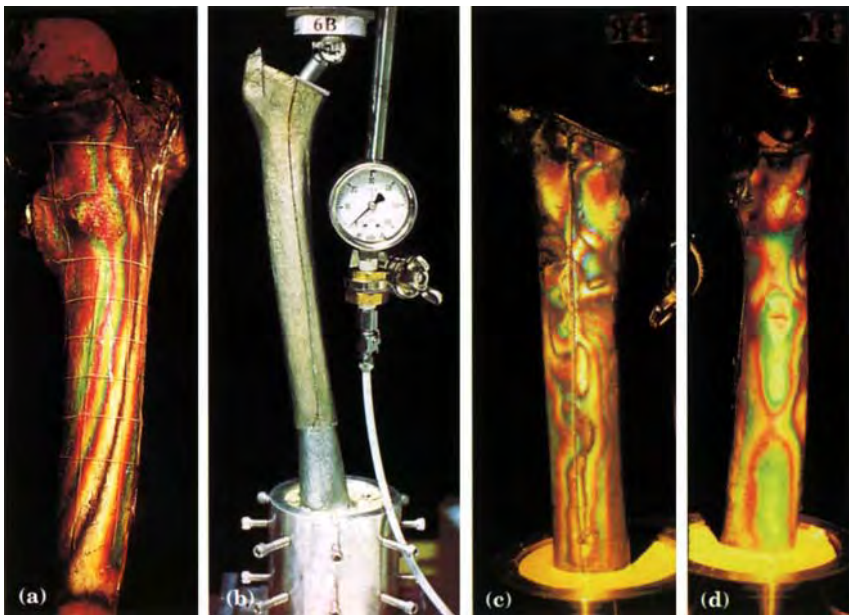


Abb. 47

Beispiel 2. In Abb.48a sieht man Versuchsproben von Oberschenkelknochen mit verschiedenen Typen von Gelenkprothesen, präpariert für die PhotoStress-Analyse. Abb.48b illustriert die Spannungsverteilungen, die aus verschiedenen Prothesenimplantaten resultieren. Nach dem Abschluss der Modellversuche werden ausgesuchte Prothesentypen für weitere PhotoStress-Versuche mit wirklichen Oberschenkelknochen herangezogen.

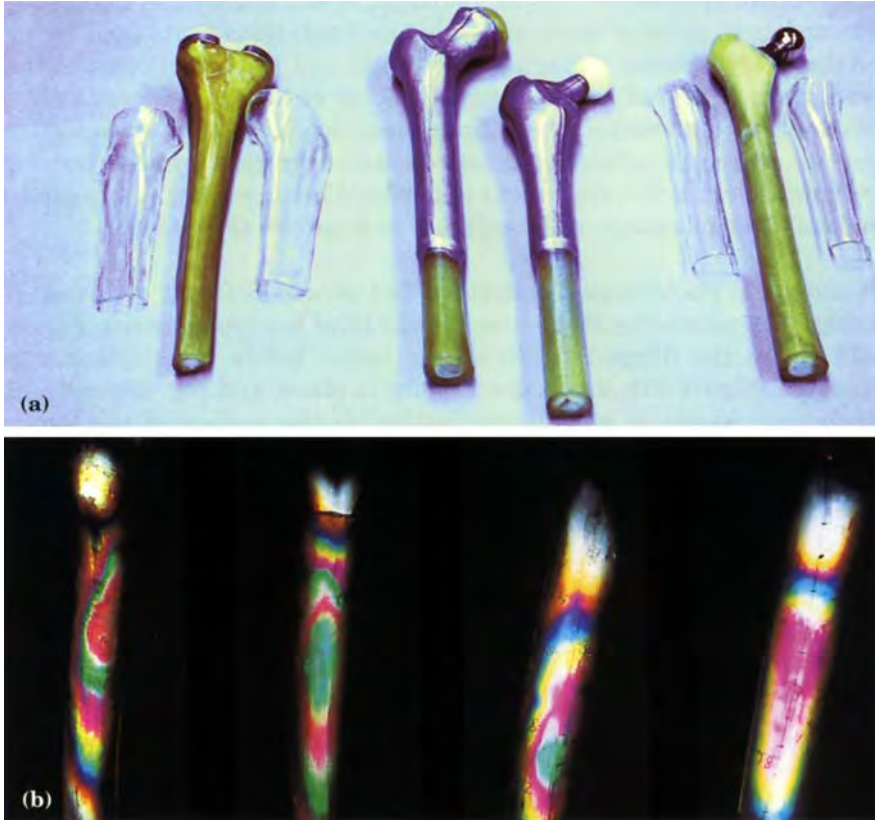


Abb. 48

UNTERSUCHUNGEN VON GUMMI UND ANDEREN ELASTOMEREN

Materialentwicklungen auf dem Gebiet der Elastomere haben diese in den letzten Jahren ihre gegenwärtige Rolle als leistungsstarke und vielseitig einsetzbare Konstruktionswerkstoffe einnehmen lassen. Viele industrielle Einsätze dieser Werkstoffe haben keine mechanisch-konstruktive Bedeutung und erfordern wenig oder gar keine quantitativen technischen Untersuchungen. In anderen Fällen aber wird von Komponenten aus diesen Materialien berechenbares und reproduzierbares Einsatzverhalten gefordert, was ein tiefgehendes quantitatives

Verständnis voraussetzt. Elastomerische Verformungen in Dehnungsbereichen zwischen 50 und 100 % sind nicht ungewöhnlich. Diese hohen Dehnungen und großen Auslenkungen, einhergehend mit viskoelastischen mechanischen Eigenschaften, führen zu großen Unsicherheiten bei theoretischen Untersuchungen komplex geformter 3-dimensionaler Gebilde. In solchen Fällen ist eine experimentelle Verifizierung äußerst wünschenswert.

Auch das Erarbeiten gültiger Dehnungs/Spannungsmesswerte von Elastomerkomponenten ist eine singuläre Sache, da die meisten konventionellen Messwertaufnehmer, einschließlich DMS, unakzeptable Versteifungseffekte hervorrufen. Infolgedessen können „gemessene“ Dehnungen um Größenordnungen niedriger sein, als die wirkliche Dehnung im Elastomerbauteil ohne die Präsenz eines installierten DMS. Demzufolge ist die Anwendung besser angepasster Sensoren, die weniger mechanische Versteifung produzieren bei Elastomermaterialien wünschenswert, wobei natürlich ein kontaktlose Messverfahren immer vorzuziehen sind. Bei hinreichend großen Deformationen ist es z.B. praktisch, eine konventionelle Messskala zur Messung der Deformation zwischen zwei Punkten einer Elastomerprobe einzusetzen.

Im öfter vorkommenden Fall eines irregulär geformten Elastomerteils, können stark lokalisierte Dehnungs/Spannungsgradienten und -konzentrationen vorhanden sein, und die Wahl einer geeigneten und akzeptablen Messtechnik wird zunehmend schwieriger. In einer solchen Situation ist die PhotoStress-Technik unter Anwendung von Beschichtungsmaterialien niedrigen Elastizitätsmoduls eine bevorzugte Dehnungsmessmethode, da diese Beschichtungen den unerwünschten mechanischen Versteifungseffekt minimieren. Die Abbildungen in diesem Abschnitts zeigen einige typische Fälle, bei denen PhotoStress auf Elastomeren oder anderen Werkstoffen niedrigen Elastizitätsmoduls erfolgreich eingesetzt worden ist.

Automobilreifen. Versuche wurden durchgeführt, um ein besseres Verständnis für das Spannungsverhalten von Automobilreifen zu erlangen. Die äußere Gummioberfläche der Reifen wurden mit PhotoStress-Beschichtungen versehen und nach Entfernen des Gummis auch direkt das Gewebe der Reifenkarkasse. Wegen der sehr hohen Dehnungen, wurde eine dünne Beschichtung, in der Regel 1 mm oder weniger, mit niedrigem Elastizitätsmodul aufgebracht.

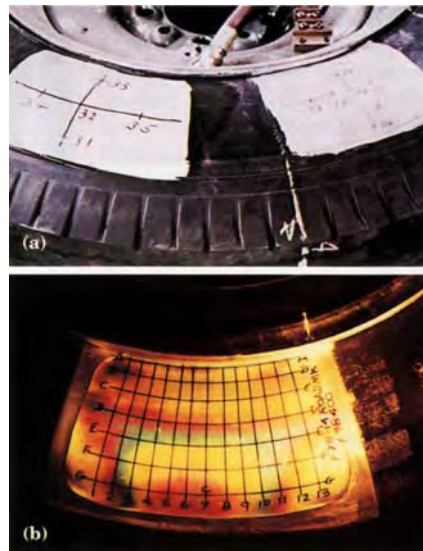


Abb. 49

Die Analyse der Reifen wurde für folgende Belastungsbedingungen durchgeführt: 1) Reifeninnendruck; 2) Reifeninnendruck plus vertikale äußere Belastung; 3) Reifeninnendruck plus vertikale äußere Last plus Reifenrotation. Abb.49a zeigt die Beschichtung an der Seitenwand des Reifens; Abb.49b zeigt das PhotoStress-Dehnungsfärbemuster des Reifens bei vertikaler Belastung.

Auskleidungselemente bei Ölbohrlöchern (Packer). Dabei handelt es sich um Auskleidungselemente, die verhindern sollen, dass Ölbohrlöcher einstürzen. In diesem Fall sind sie aus einem Werkstoff niedrigen Elastizitätsmodul gefertigt, der mit Stahldraht verstärkt ist. Ihr Betriebsverhalten bei Innendruck und beim Einschluss in die Bohrlochauskleidung war nicht hinreichend klar, und das PhotoStress-Verfahren wurde eingesetzt, um ein besseres quantitatives Verständnis für die Dehnungsverteilung in den Elementen zu erhalten. Abb.50a zeigt einen typischen Packer, versuchsfertig mit einem Beschichtungsmaterial für hohe Dehnungen versehen. In Abb.50b sieht man das Dehnungsmuster in einem Packer bei einem bestimmten Innendruckpegel. Weitere Tests wurden durchgeführt, nachdem die Packer in der metallischen Bohrlochauskleidung installiert waren, und die Dehnungsfärbemuster an den Enden der Packer, die aufgrund ihrer Längenänderungen entstehen, wurden beobachtet.

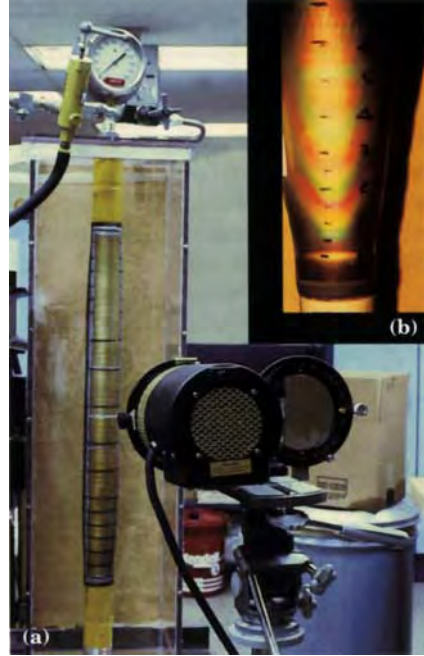


Abb. 50

Festkörpertreibstoff. Abb.51 zeigt das Spannungsbild aus thermischen Spannungen in Festkörpertreibstoff (Material mit niedrigem Elastizitätsmodul). Diese Spannungen entwickelten sich aus dem Zusammenziehen des Raketengehäuses beim Abkühlen des eingegossenen Festkörpertreibstoffs auf Raumtemperatur.

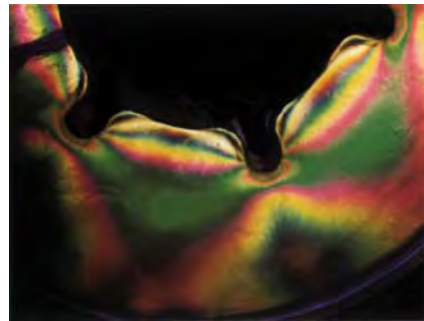


Abb. 51

DYNAMISCHE VERSUCHE

Für dynamische Spannungsanalysen mit zyklisch variierenden Dehnungen fester Größe und Frequenz wird das Standard-Reflexionspolaroskop umgerüstet, d.h. die normale Lichtquelle durch eine stroboskopische Lichtquelle ersetzt, mittels derer das Dehnungsfarbmuster zum Standbild wird. Der weitere Messvorgang unter stroboskopischer Beleuchtung bleibt jetzt derselbe wie bei der statischen Messung. PhotoStress kann auch angewandt werden, um Spannungen zu beobachten, die aufgrund von Stossbelastungen entstehen, also z. B. bei Aufprall, Explosionen und anderen schnellen Vorgängen. In solchen Fällen können die Spannungsfarbmuster mit an das Reflexionspolaroskop adaptierten hochintensiven Lichtquellen und Hochgeschwindigkeitskameras erfasst werden. Das neu entwickelte System PhotoStress Plus enthält eine Digital-Videokamera, die dynamische PhotoStress-Untersuchungen bis zu 30 Hz Signalfrequenz erlaubt.

Industriegebläse. Eine PhotoStress-Beschichtung wurde auf die Nabe und die Blätter eines Gebläseventilators aufgebracht. Der Ventilator war dynamisch ausgewuchtet und drehte mit normalen Umdrehungszahlen. Man entschloss sich für zwei Versuche, um die Vorteile zweier verschiedener Arten von Ventilatorblattbefestigungen beurteilen zu können. Ein Reflexionspolaroskop, ausgerüstet mit einer stroboskopischen Lichtquelle, wurde für die Messungen eingesetzt und die Stroboskopblitzfrequenz mittels einer Fotozelle mit dem Ventilator synchronisiert. Die erforderliche Diskontinuität der Lichtintensität für das Fotozellensignal erzielte man einfach mit einem Stück schwarzen Klebebands auf der Ventilatorwelle. Die folgenden Erkenntnisse wurden gewonnen:

1. Die Montagespannungen lagen deutlich über den dynamischen Spannungen und produzierten in bestimmten Bereichen plastische Verformungen.
2. Spannungen aus Zentrifugalkräften waren vernachlässigbar.
3. In der Kehle am Übergang Blatt/Nabe waren so gut wie keine Spannungskonzentrationen vorhanden, womit eine exzellente Kraftübertragung vom Blatt in die Nabe während der Ventilatorrotation bewiesen ist.
4. Eine der Blattbefestigungsarten ergab dreimal höhere Montage-
spannungen als die anderen.



Abb. 52



Abb. 53



Abb. 54



Abb. 55

Der beschichtete Ventilator ist in Abb.52 zu sehen und der Versuchsaufbau in Abb.53. Abb.54 zeigt das Farbmuster für die statische Dehnung aufgrund der Montage der Ventilatornabe auf die Welle und Abb.55 das Farbmuster der Montagespannung in der Blattkehle im Nabenbereich.

Wäschetrockner. In einem anderen Fall sollte die Spannungsverteilung im neu-konstruierten Ventilator eines Wäschetrocknergebläses analysiert werden. Abb.56 zeigt das Spannungsfarbmuster des rotierenden Gebläseventilators bei nomineller Umdrehungsgeschwindigkeit.

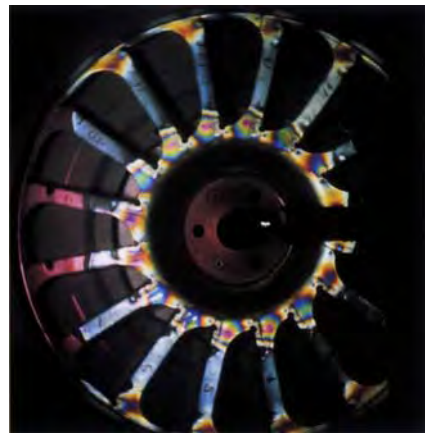


Abb. 56

Gußstücke von Dieselmotoren. Jacobs® Vehicle Equipment Company, ein Unternehmen der Danaher Corporation, entwickelt und produziert eine Produktlinie der bekannten Jake-Brake® Dieselmotoren-Retarder. Dabei handelt es sich um hydraulische Vorrichtungen, die Dieselmotoren, eigentlich Energiequellen, in Energieabsorber umwandeln, um so am Fahrzeug Bremsseffekte zu erzielen. In der Praxis dienen solche Bremssysteme dazu Fahrzeuge (LKWs, Busse) auf flachen Fahrstrecken zu verlangsamen oder auf sehr abschüssigen Strassen ihre Geschwindigkeit unter Kontrolle zu halten.

Komplexe Gehäuse aus Metallguss, die mehrere hydraulische Regelkreise enthalten, sind auf die Kipphebel der Dieselmotoren montiert. Werden die Hydraulikkreise aktiviert, modifiziert die Jake Brake die Öffnungs- und Schließzyklen der Auslassventile des Motors. Verständnis für die dynamischen Spannungsfelder zu erlangen, die aufgrund der zyklischen Druckänderungen in den internen Hydraulikkreisen auftreten, ist eine herausfordernde analytische Aufgabe. Des weiteren ist es ebenso schwierig, die Orte und Größen der lokalisierten Montage-spannungen zu bestimmen, die durch das Anschrauben der Retardergehäuse an den Motor entstehen. Und schließlich erfordern Überlegungen zum Ermüdungsverhalten, dass die zyklischen Spannungen den statischen Montagespannungen akkurat überlagert sind. Bei Jacobs Vehicle hat man das PhotoStress-Verfahren eingesetzt, um ein besseres Verständnis für die Betriebsspannungen dieser Komponenten zu erlangen.

Abb.57 zeigt zwei typische Gehäuse mit den aufgetragenen PhotoStress-Beschichtungen. Jedes Versuchsgehäuse ist auf eine ihm eigene Befestigung geschraubt, welche die wirklichen Befestigungsplatten am Dieselmotor simuliert. Diese Gehäuse/Befestigungs-Versuchseinheit wird nun mittels einer hydraulische Prüfmaschine belastet, um folgende Lastsituationen herzustellen:



Abb. 57

- Zyklische Druckänderungen in den internen Hydraulikkreisen.
- Zyklische externe Belastungen, welche die Reaktionen auf die Dynamik der Auslassventile simulieren, etc.

Der Versuchsablauf beginnt damit, dass die Gehäuse auf die Befestigungsvorrichtungen geschraubt werden, um sodann die PhotoStress-Beschichtung mit dem Reflexionspolariscope zu betrachten. Damit wird die Lage initialen Montage-
spannungen bestimmt. Es folgt die quantitative Analyse der statischen Montage-
spannungen, worauf eine stroboskopische Lichtquelle an das Polariscope adaptiert
wird, zur Beobachtung und Messung der Spannungen, wenn die dynamischen
Belastungen aufgebracht werden. Abb.58 zeigt einen typischen Versuchsaufbau.
Das Insertbild zeigt das Spannungsfarbmuster der Montage-
spannungen durch das Anschrauben eines typischen Jake Brake-Gehäuses. Dabei handelt es sich um
statische Spannungen. Das kombinierte Spannungsfarbmuster mit den überla-
gernden Spannungen aus dem hydraulischen Innendruck erhält man im nächsten
Versuchsschritt. Die Differenz zwischen den beiden Belastungsarten ergibt dann
den zyklischen oder alternierenden Spannungspegel.

Zur Analyse des dynamischen Vorgangs, wird das Stroboskop zeitlupen-
gesteuert, damit man die druckinduzierten Spannungsfelder, welche die statischen
Montagespannungen überlagern, beobachten kann. Ist das Ermüdungsverhalten
eines Bauteils in spezifischen Bereichen ein bestimmendes Konstruktionskriteri-
um, hat sich dieser statische/dynamische Versuchsablauf sehr bewährt, wenn es
um die erste Identifikation und dann quantitative Messung von Spannungen geht.

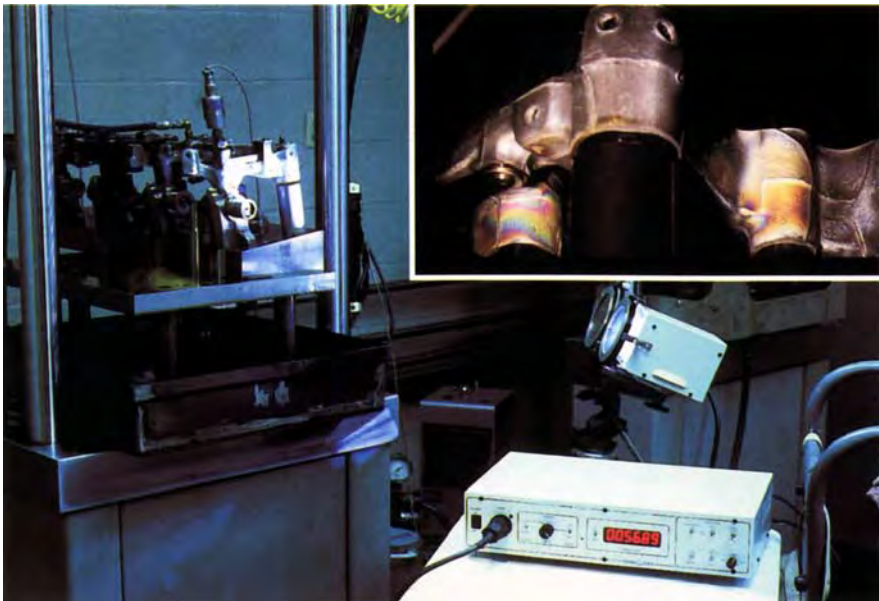


Abb. 58

PHOTOSTRESS UND DIE FINITE-ELEMENTEN-METHODE

Als die Finite-Elemente-Methode (FEM) sich zuerst als schnelles und bequemes Verfahren für die strukturelle Konstruktionsanalyse anbot, dachten viele Ingenieure, dass sie konventionelle Dehnungs/Spannungsmesstechniken wie DMS oder spannungsoptische Methoden ersetzen könne. Auf der Basis heutiger leistungsstarker Computer und Softwareprogramme wird FEM in weiten Bereichen bei der Lösung komplexer mechanischer Spannungsprobleme eingesetzt und dient auch zur Formverfeinerung, bevor ein Bauteil oder eine Konstruktion als Hauptausführung hergestellt wird. Aber der Konstruktionsprozess mit dem Ziel maximaler Gestaltfestigkeit und Produktionsreife erfordert fast immer einen Qualifikationstest, um die mit FEM errechneten Resultate zu verifizieren.

Im Falle von Spannungskonzentrationen z.B. wird die Genauigkeit einer FEM-Analyse wesentlich vom Typ der gewählten Elemente und vom Abstand der Knotenpunkte bestimmt. Einige wenige PhotoStress-Messungen können hier schnell und kostengünstig zur Überprüfung der numerischen Resultate durchgeführt und gleichzeitig zur Optimierung des FEM-Modells herangezogen werden. Bei weiter verfeinerten Hybridtechniken werden die spannungsoptischen Messwerte direkt in ein Computerprogramm eingegeben und zwar gewöhnlich als Knotenpunktwerte an freien Rändern. Diese Vorgehensweise ist besonders effektiv, weil sie sich eine der Stärken der Spannungsoptik, nämlich die zuverlässig genaue Bestimmung von Randspannungen zu Nutze macht, um eine potentielle Schwäche numerischer Methoden zu kompensieren. Das folgende Prozedere beschreibt eine vereinfachte Anwendung zur optimalen und verifizierbaren Spannungsanalyse einer Konstruktion, bei der PhotoStress FEM ergänzt.

- Eine PhotoStress-Untersuchung wird an einem herunterskalierten Modell des Bauteils durchgeführt. Modellmaterial und -größe werden so gewählt, dass hinreichende spannungsoptische Signale (Spannungsfarbmuster) bei zweckmäßig niedrigen Belastungskräften entstehen.
- Jetzt folgt eine FEM-Analyse des Modells zur Bestimmung der Hauptdehnungsdifferenzen ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) an den Knotenpunkten. Die Ergebnisse werden in einer Grafik farbig dargestellt, um mit dem Spannungsfarbmuster der PhotoStress-Analyse zu korrespondieren.
- Die beiden Farbmuster aus FEM und PhotoStress werden verglichen. Auf der Basis der Übereinstimmung oder Diskrepanz wird das FEM-Modell so modifiziert, dass es entsprechend der PhotoStress-Analyse die richtige Spannungsverteilung ergibt. Sind beide Farbmuster in voller Übereinstimmung, können die individuellen Hauptdehnungen mit FEM bestimmt werden, womit die Notwendigkeit einer spannungsoptischen Trennung der Hauptdehnungen elegant umgangen wird.
- Jetzt wird auf Basis des schlussendlich gültigen FEM-Modells eine Hauptausführung des Bauteils aus dem wirklichen Material und in voller Größe hergestellt. Es könnten jetzt an ausgewählten Punkten weitere Dehnungsmessungen mit PhotoStress oder DMS folgen, um die errechneten Daten aus der FEM-Analyse zu bestätigen.

Der beschriebenen Vorgehensweise wurde bei der Spannungsanalyse an einem 160 t (ca. 1,6 MN) Kranhakens gefolgt, der aus einer Stahlplatte gefertigt war. Von dem in der Hauptausführung 3,5 m langen Haken wurde ein um den Faktor 10 herunterskaliertes Plastikmodell hergestellt und für die PhotoStress-Untersuchung beschichtet. In Abb.59a sieht man das Isochromaten-Farbmuster (Dehnungsgröße) bei einer Last von 1000N am Modell sowie in Abb.59b die dunklen Isoklinen-Muster (Dehnungsrichtungen). Das FEM-Netz für die numerische Analyse zeigt Abb.59c, und in den Abb.59d und 59e erkennt man die computergenerierten Isochromaten- und Isoklinenmuster. Der Vergleich von Abb.59a und 59b mit 59d und 59e zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der experimentellen mit den rechnerischen Ergebnissen. Das resultierende Spannungsprofil der σ_x -Hauptspannung wird in Abb.59f gezeigt.

Dieses ist ein Beitrag von B. Mynař, P. Šperka und M. Vašiček, Institut für Bau- und Transportmaschinen, Technische Universität Brno, Brno, Tschechische Republik.

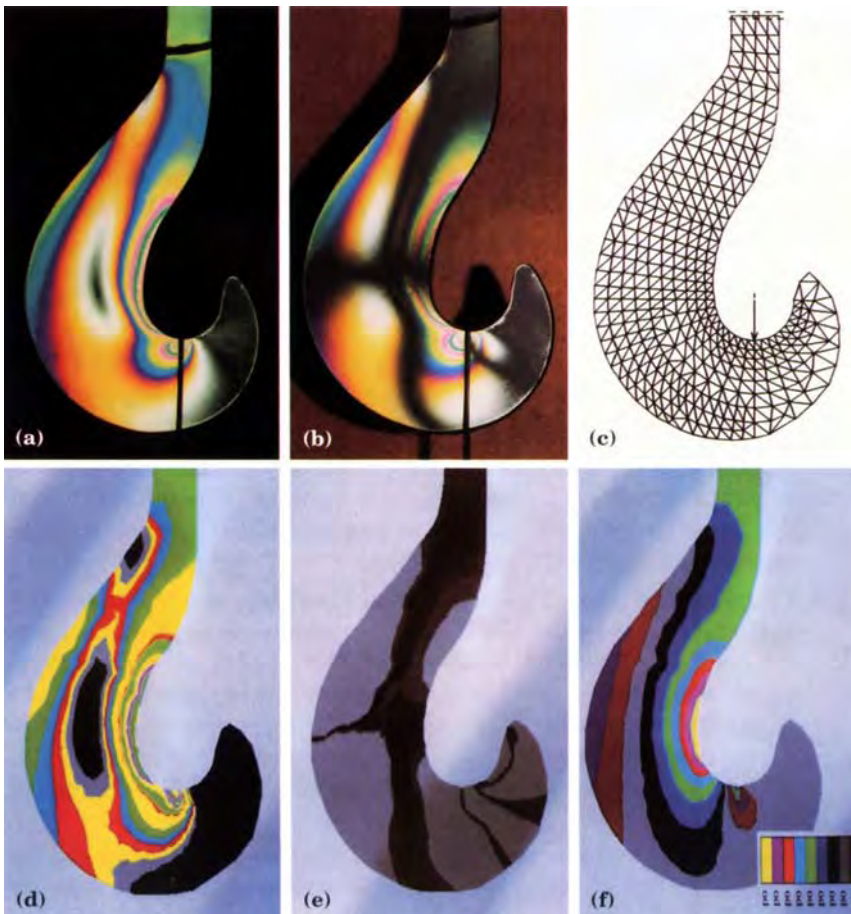


Abb. 59

Halterung einer Federbein-Spiralfeder. Ein komplizierteres Problem, bei dem PhotoStress zur Optimierung eines FEM-Modells eingesetzt wurde, ergab sich bei der Konstruktion einer Spiralfederhalterung innerhalb einer Automobilfederung. Die mit FEM bestimmte Spannungsverteilung in der Halterung ist in Abb.60 dargestellt, und man sieht aus der Abwesenheit heller Farbbreite, dass die gesamten Spannungspegel niedrig und keine Spannungskonzentrationen vorhanden sind. Nach Fertigung des ersten Prototyps wurde dieser mit PhotoStress untersucht, um die rechnerischen Resultate zu verifizieren. Das PhotoStress-Erscheinungsbild ergab wesentlich kompliziertere Spannungsverhältnisse als das FEM-Modell und zeigte an bestimmten Stellen der Halterung Spannungskonzentrationen (Abb.61). Nachdem man beobachtet hatte, wie sich die Federkräfte bei der realen Belastung auf die Halterung verteilen



Abb. 60

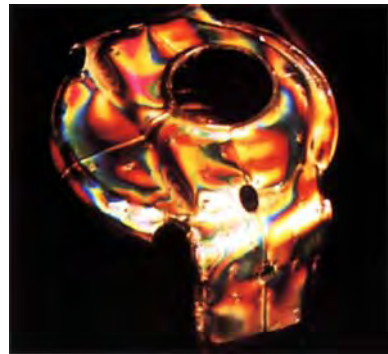


Abb. 61

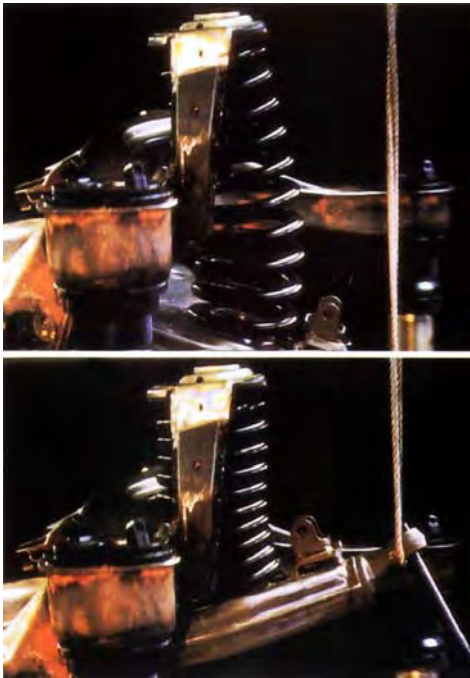


Abb. 62



Abb. 63

(Abb.62), wurde klar, dass die angenommenen Bedingungen der Krafteinleitung (positiver und negativer Federweg, verschiedene Biegeformen der Feder) beim FEM-Modell nicht der Realität entsprachen.

Steuerungshebel. Die FEM-Analyse eines Steuerungshebels ist ein anderes Beispiel, das hier beschrieben werden kann. Nach Herstellung der Hauptausführung griff man auf PhotoStress zurück, um die FEM-Ergebnisse zu bewerten. Abb.64a zeigt den Steuerungshebel, wobei die Pfeile die Belastungsrichtungen anzeigen. In Abb.64b sieht man das FEM-Resultat, und es zeigt sich, dass die höchsten Spannungen im Kehlgrund der hervorstehenden Hebelteile auftreten. In Abb.64c erkennt man ein PhotoStress-beschichtetes Modell der Hauptausführung im Versuchsaufbau, und Abb.64d zeigt die Spannungsfarbmuster der PhotoStress-Untersuchung. Diese Untersuchung bestätigte die Ergebnisse der FEM-Analyse bezüglich der Bereiche, wo nach den FEM-Ergebnissen wesentliche Spannungen vorhanden waren. Allerdings ergab die quantitative Auswertung des PhotoStress-Versuchs, dass die Spannungsspitzen in Wirklichkeit 20 % höher lagen, als die FEM-Computerberechnung ausgesagt hatte.

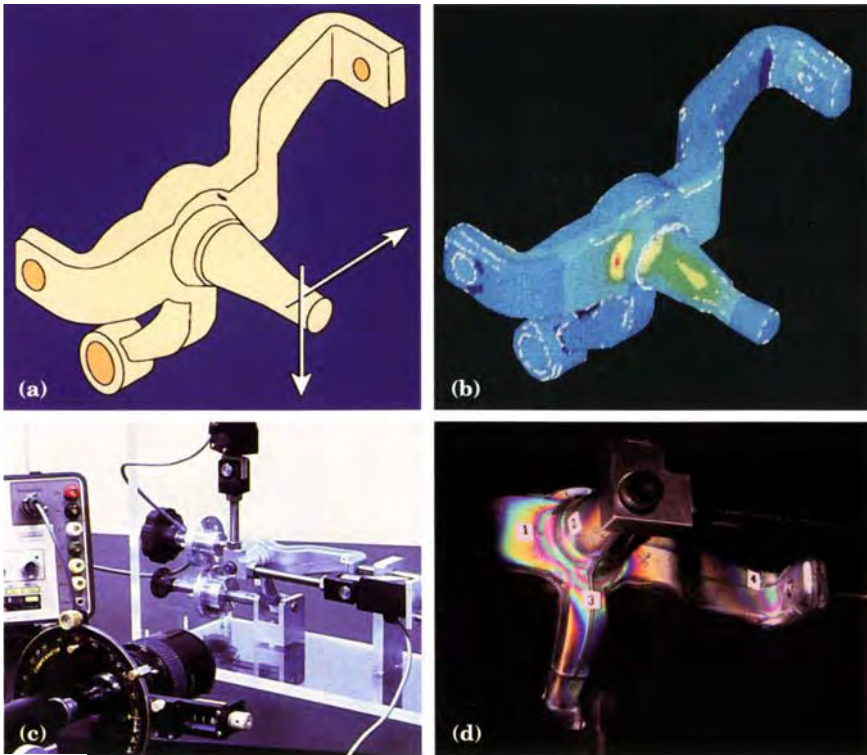


Abb. 64

Raum für Ihre Notizen

Raum für Ihre Notizen

The Americas

United States **Vishay Precision Group – Micro-Measurements**
P.O. Box 27777 • Raleigh, NC 27611
Ph: +1-919-365-3800 • Fax: +1-919-365-3945
E-mail: mm.us@vishaypg.com

Asia

P.R. China **Vishay Precision Group – Micro-Measurements**
A8220, Shanghai Jia Hua Business Center
No. 808 Hong Qiao Road • Shanghai 200030
Ph: +86-21-6448-6090, Ext. 6098 • Fax: +86-21-6448-6070
E-mail: mm.cn@vishaypg.com

Israel **Vishay Precision Group – PhotoStress Technology**
2 HaOfan Street • Holon 58814
Ph: +972-3-557-0981 • +972-3-559-5715
E-mail: photostress@vishaypg.com

Europe

France **Vishay Precision Group – Micro-Measurements**
16 Rue Francis Vovelle • 28000 Chartres
Ph: +33-2-37-33-31-20 • Fax: +33-2-37-33-31-29
E-mail: mm.fr@vishaypg.com

Germany **Vishay Precision Group – Micro-Measurements**
Tatschenweg 1 • 74078 Heilbronn
Ph: +49-7131-39099-0 • Fax +49-7131-39099-229
E-mail: mm.de@vishaypg.com

Spain **Vishay Precision Group – Micro-Measurements**
C/Copenhague, N°4, 6 y 8 - Planta 1ª - Oficina 12 • Edificio Al Andalus
Polígono Európolis • 28232 Las Rozas, Madrid
Ph: +34-916-407-624 • Fax: +34-916-375-601
E-mail: mm.es@vishaypg.com

United Kingdom **Vishay Precision Group – Micro-Measurements**
Stroudley Road • Basingstoke • Hampshire RG24 8FW
Ph: +44-(0)125-646-2131 • Fax: +44-(0)125-647-1441
E-mail: mm.uk@vishaypg.com

© Copyright 2011 Vishay Precision Group. ® Registered trademarks of Vishay Precision Group. All rights reserved.
Specifications subject to change without notice.