

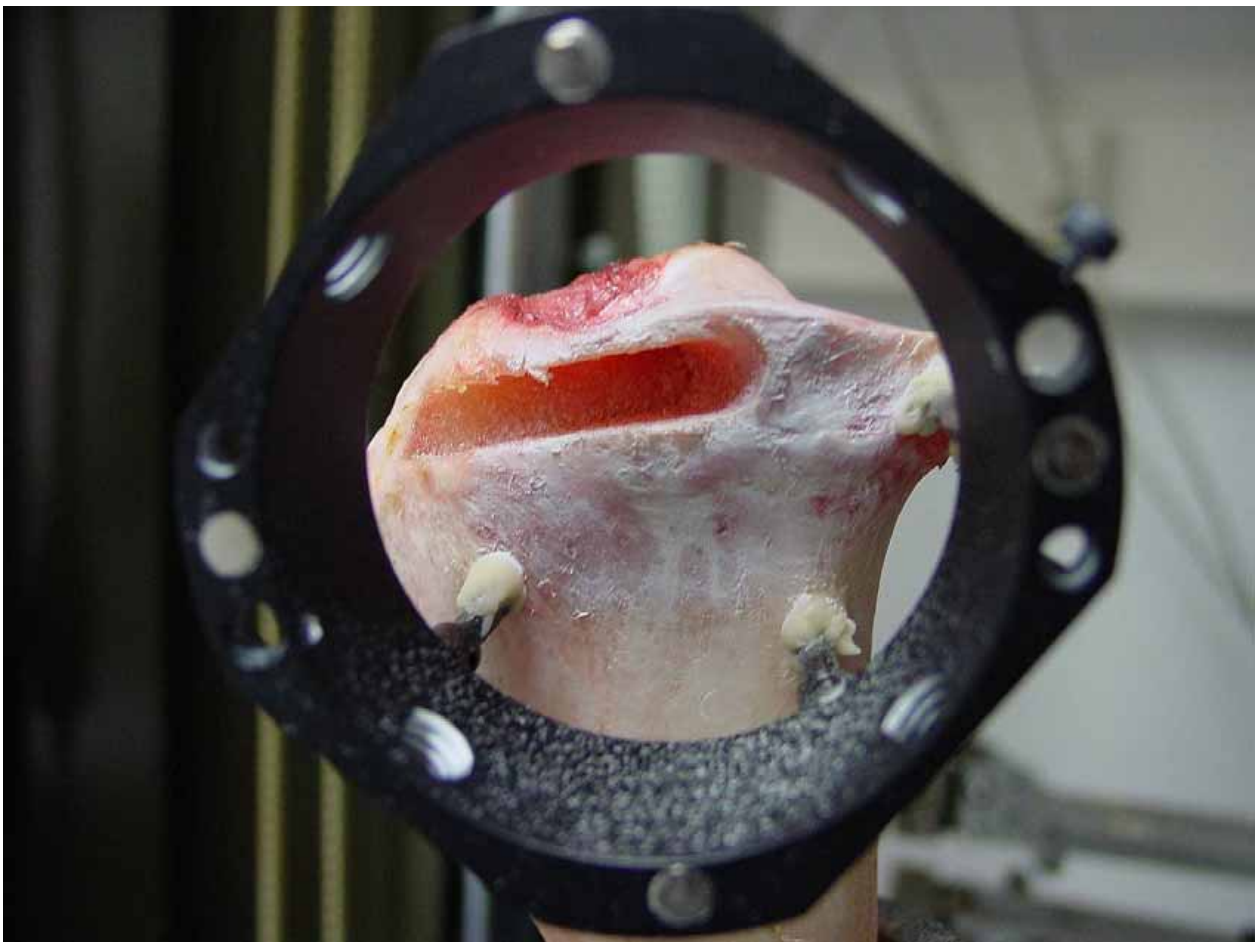
## Laseroptische, berührungslose Verformungsanalyse von Biowerkstoffen mit modernen 3D-ESPI Systemen

### Zusammenfassung

Die Speckle-Interferometrie, 3D-ESPI, bietet neue Möglichkeiten der vollflächigen und berührungslosen Messung von Verschiebungs- und Dehnungsfeldern an komplexen Bauteilen aus unterschiedlichen Materialien. Die Entwicklung eines miniaturisierten und variablen laseroptischen Dehnungssensors, basierend auf diesem Messprinzip, eröffnet neue Anwendungsfelder.

### Einleitung

Die Forderungen nach besser Produktqualität und höherer Zuverlässigkeit bzw. Bauteilsicherheit rufen einen Bedarf an besseren und genaueren Möglichkeiten der Festigkeitsanalyse und der zerstörungsfreien Prüfung hervor. Die schnelle Entwicklung neuer Materialien und Techniken in der medizinischen Anwendungen erfordern diese Maßnahmen beispielsweise auch für die Entwicklung



Die Kombination der experimentell ermittelten Daten mit Simulationsprogrammen kann bei der Entwicklung und dem Einsatz neuer Materialien wertvolle Hilfestellung liefern. Anhand von Messungen an Biowerkstoffen kann der Einsatz zu in-vitro Verformungs- und Dehnungsanalysen an inhomogenen Materialien unter verschiedenen Belastungen erfolgreich gezeigt werden.

neuer Implantate. Das Verhalten dieser Elemente unter Belastung muss dabei simuliert werden. Hierzu ist eine genaue Kenntnis der entsprechenden Materialparameter notwendig. Um diese Werte exakt bestimmen, können neue Verfahren aus dem Bereich der industriellen Materialprüfung auf Biowerkstoffe angewendet werden.

Die Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) ist ein berührungsloses, flächenhaftes Verfahren zur 3D-Verformungsanalyse. Im Bereich der Materialprüfung und Werkstoffentwicklung hat dieses Verfahren bereits eine weite Akzeptanz erlangt. In Automobilindustrie, sowie der Luft- und Raumfahrt konnte dieses Verfahren bereits erfolgreich zur schnellen und flächenhaften Verformungs- und Dehnungsanalyse eingesetzt werden [1,2].

Die Entwicklung neuer, kompakter Sensoren erlaubt die Bestimmung der Eigenschaften und Materialparameter sowohl in Standard Zugprüfmaschinen als auch an komplexen Bauteilen und unterschiedlichsten Materialien.

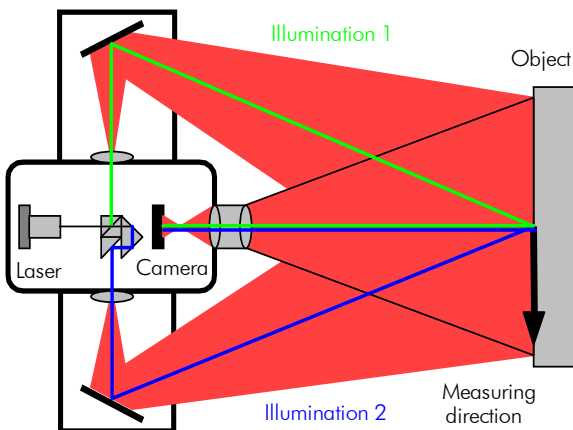


Bild 1: Inplane Anordnung eines ESPI-Sensors. (Erläuterungen siehe Text)

**3D-ESPI Messprinzip**

Bild 1 zeigt den Prinzipaufbau eines ESPI-Sensors. Der Laserstrahl eines Diodenlasers wird in zwei Beleuchtungsstrahlen aufgeweitet und beleuchtet das zu untersuchende Objekt aus unterschiedlichen Richtungen. Das diffus reflektierte Licht wird mit einem mit einem CCD-Chip detektiert. So entsteht ein Bild des Objekts, das auf dem Bildschirm des Rechners dargestellt wird. Aufgrund der speziellen Eigenschaften des Laserlichts erscheint das Objekt nicht homogen beleuchtet. Die diffus reflektierende Oberfläche erzeugt ein granulatartiges Intensitätsmuster, das so genannte Specklemuster, das in Bild 2 dargestellt ist [3].

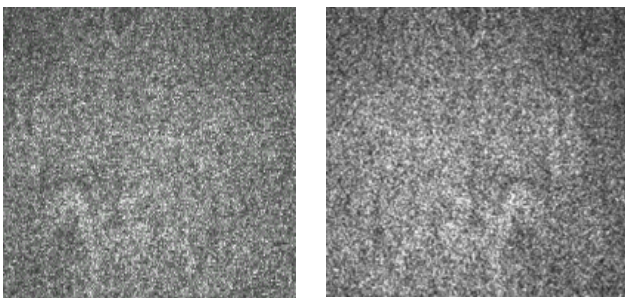


Bild 2: Speckle Bilder vor und nach einer Belastung

Belastet man das Objekt, so verschieben sich Oberflächenpunkte und die Lichtwege beider Beleuchtungsstrahlen ändern sich. Das resultierende Specklemuster ist rechts in Bild 2 dargestellt. Aufgrund der Belastung kommt es zu Änderungen der Intensität. Um diese Intensitätsänderungen sichtbar zu machen, bildet man die Differenz dieser beiden Bilder und erhält das so genannte Streifenbild (Bild 3).

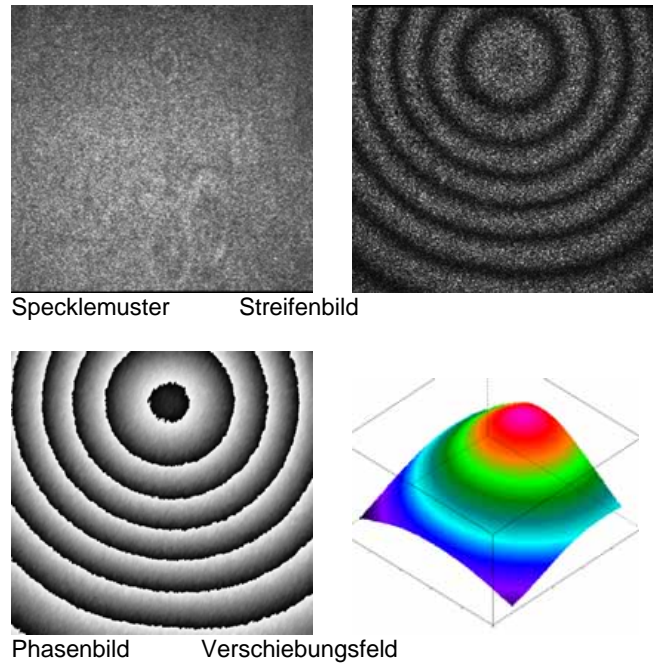


Bild 3: Vom Specklemuster zum Verschiebungsfeld (Erläuterungen siehe Text)

Durch die so genannte Phaseschiebetechnik ist es möglich, die Richtung der Verformung zu bestimmen und eine feinere Unterteilung der Streifen zu erlangen. Als Ergebnis erhält man das Phasenbild, aus dem dann das quantitative Verschiebungsfeld hervorgeht. Durch Beleuchtungen aus drei verschiedenen Richtungen können die vollständigen dreidimensionalen Verschiebungsfelder und daraus sogar die entsprechenden Dehnungsfelder quantitativ bestimmt werden.

**3D ESPI Sensoren**

Für eine einfache Anwendung der ESPI Technik zur schnellen, flächenhaften Verformungs- und Dehnungsanalyse stehen verschiedene kompakte Sensoren zur Verfügung. Bild 4 zeigt den Q-300 Sensor bei einer Messung in einer Zugprüfmaschine. Als Aufnahmeobjektiv können verschiedene Brennweiten und Zoomobjektive verwendet werden. Die Beleuchtungsarme sind austauschbar und können so an die jeweiligen Messobjekte angepasst werden. Der Q-300 Sensor ist somit sehr flexibel und eignet sich besonders für den Einsatz zur Materialprüfung.

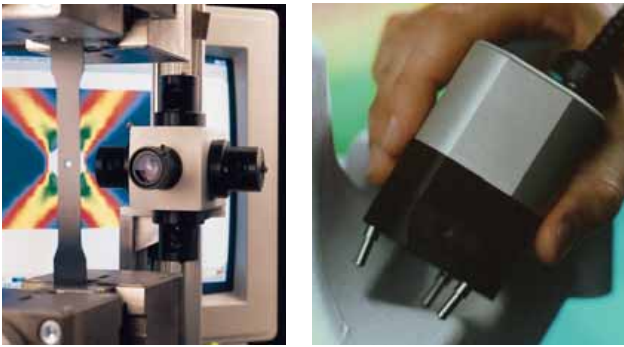


Bild 4: Q-300 Sensor an einer Zugprüfmaschine (links) und Q-100 Sensor (rechts)

Der Q-300 Sensor ist optimiert für eine schnelle und flächenhafte Dehnungs- und Spannungsanalyse an Bauteilen bei unterschiedlichen Belastungen. Wie in Bild 4 gezeigt, ist der Messkopf eine miniaturisierte Version eines 3D ESPI Sensors. Im Gegensatz zum Q-300 Sensor wird der Q-100 direkt auf dem Bauteil befestigt, so dass Relativbewegungen zwischen der Objekt- und der Sensoroberfläche vermieden werden. Die Messfläche beträgt ca. 25 x 35 mm. Um eine Dehnungs- und Spannungsanalyse auch an gekrümmten Bauteilen zu ermöglichen, ist neben der Verformungsmessung in diesem Sensor auch eine Konturerfassung integriert.

**Messung an einer Kerbprobe**

Als erstes wird eine Dehnungsanalyse an einer Compact Tension (CT-) Probe vorgestellt. Dabei handelt es sich um einen aus Aluminium gefertigten Block mit einer Kerbe. Die Belastung erfolgt durch das Aufbiegen der Kerbe mittels einer Schraube. Bild 5 zeigt das Messfeld als Livebild des Sensors.

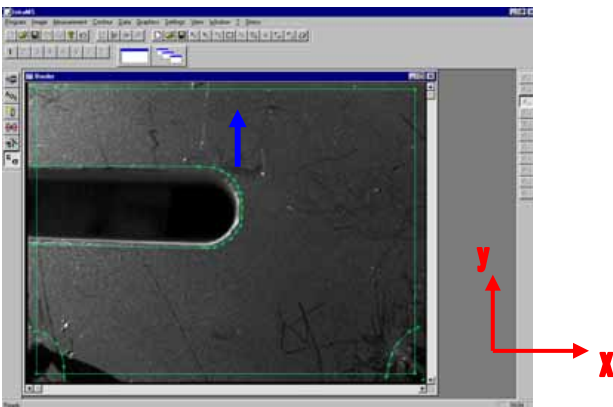


Bild 5: Livebild der Probe (als Abbildung über den Q-100 Messkopf, rot: Koordinatensystem der Messung, blau: Belastungsrichtung).

Aufgrund der Belastung erfolgt vornehmlich eine Bewegung des Bereiches oberhalb der Kerbe in der x-, y-Ebene. Die einzelnen Komponenten der mit dem Q-100

System gemessenen Verformung zeigt Bild 6. Das Aufbiegen der Kerbe erfolgt mittels einer Schraube. Dies führt, wie die z-Komponente deutlich zeigt, zu einer zusätzlichen Torsion der Probe.

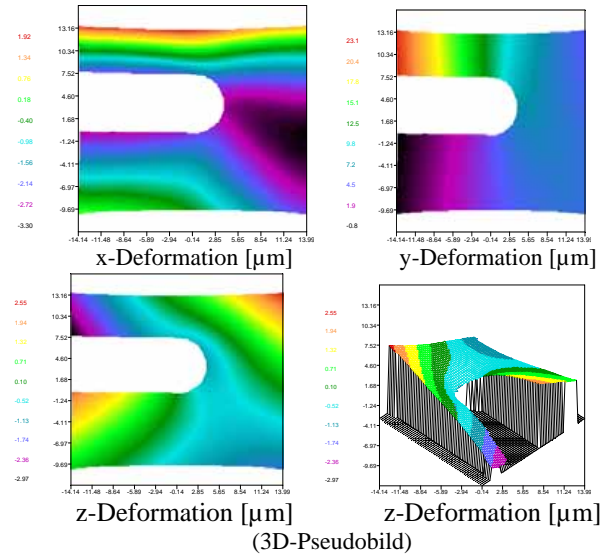


Bild 6: 3D-Deformationsfeld mit jeweiliger Empfindlichkeit in x-, y- und z-Richtung. Die Farbgrafiken zeigen die Amplitude der jeweiligen Deformation (Farbbalken links: Deformation [µm], Skalierung unten und links: laterales Messfeld [mm]).

Ausgehend von den gemessenen Verformungsfeldern werden die Dehnungswerte numerisch bestimmt. Neben den Dehnungen in horizontaler und vertikaler Richtung werden auch die Schub- und Hauptdehnungen, bzw. mit der Kenntnis der entsprechenden Materialparameter, auch die Spannungsverteilungen berechnet. Bild 7 zeigt eine Auswahl der verfügbaren Dehnungswerte.

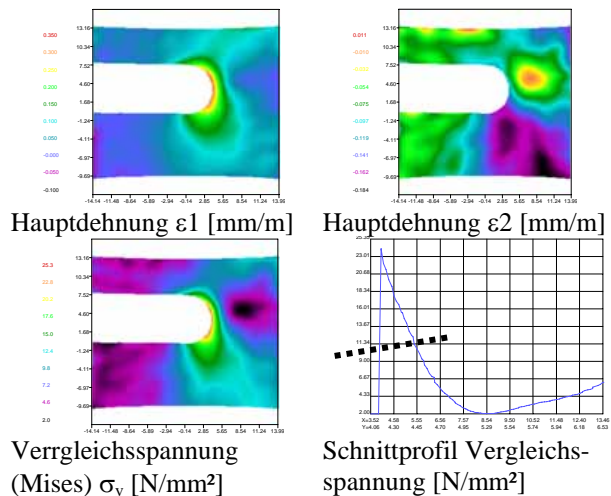


Bild 7: Hauptdehnungen  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  und die berechnete Vergleichsspannung  $\sigma_v$ . Sowie ein Schnittprofil Vergleichsspannung  $\sigma_v$  (linke Skala: Dehnung in [mm/m] bzw. Spannung in [N/mm<sup>2</sup>], untere Skala: laterale x-,y-Skalierung in [mm])

### Messung von Biowerkstoffen

Im Folgenden wird exemplarisch die Anwendung der ESPI Technik zur Verformungs- und Spannungsanalyse an Objekten aus dem Bereich der Biowerkstoffe vorgestellt. Bild 8 zeigt den Aufbau zur Messung an einem CFK-Modell eines Oberschenkelknochens.

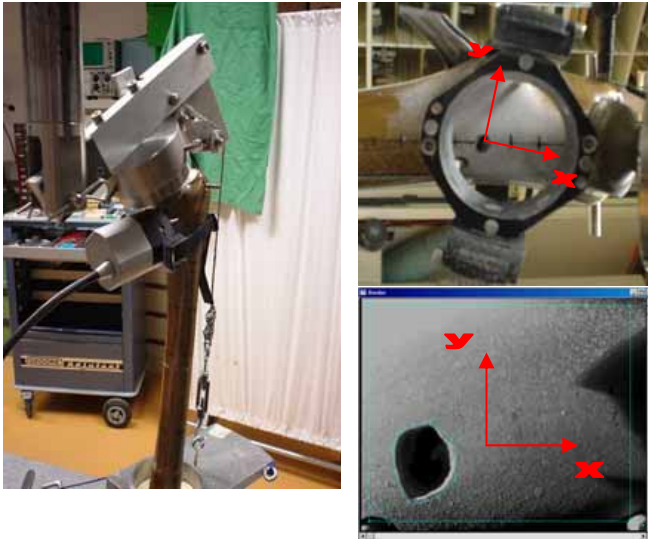


Bild 8: Experimenteller Aufbau und Messapplikation (links). Darstellung des Messfeldes und Livebild des Sensors auf der rechten Seite (rot: Lage der Koordinatensysteme).

Während der Belastung war bereits die Deformation d. h. Biegung und Torsion anhand der in Echtzeit gemessenen "Streifenbilder" zu beobachten. Bild 9 zeigt die 3D-Deformation als Vektorplot. Hierbei sind die x- und y-Komponente als Vektor zusammengefasst, die z-Komponente ist als Farbgrafik hinterlegt. Anhand dieser kann man die Deformation des Oberschenkelknochens bei der spezifischen Belastung besonders gut interpretieren.

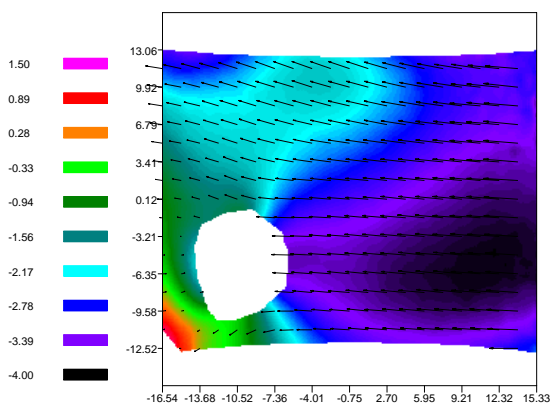


Bild 9: Vektorgrafik der 3D-Deformation. Die Hintergrundfarbe repräsentiert die out-of-plane-Komponente (d.h. z-Deformation), die Pfeile zeigen die Richtung der Bewegung tangential zur Objektoberfläche als Superposition der x- und y-Deformation.

Das Feld ist keine ebene Fläche, sondern besitzt eine gekrümmte Oberfläche. Daher wurde neben der Verformung auch die Kontur bestimmt. Für die Dehnungsberechnung wird die Krümmung berücksichtigt und es ergeben sich die in Bild 10 dargestellten Dehnungsverteilungen.

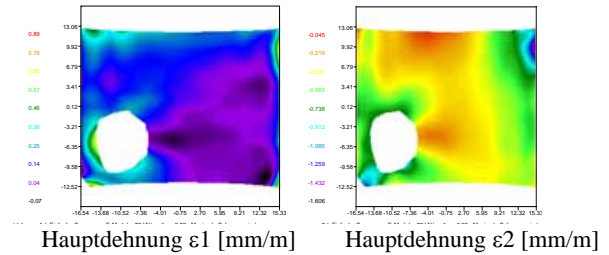


Bild 10: Hauptdehnungen  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$

Die Auswertesoftware ermöglicht es, alle Messwerte auf die Kontur zu projizieren und es als 3D-Modell im VRML Format darzustellen und bildet so eine Schnittstelle zu Simulationsprogrammen (Bild 11).

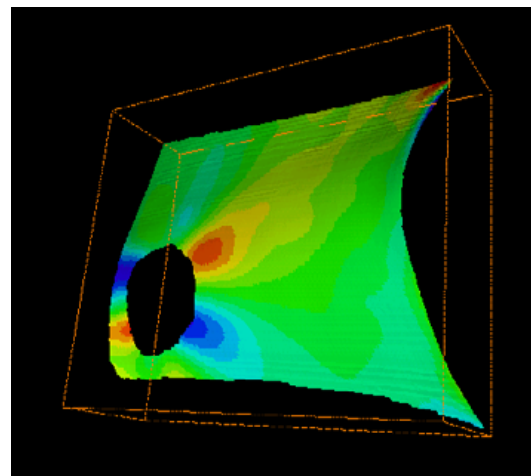


Bild 11: Darstellung und Export der Konturdatei als sog. VRML-File zur Verknüpfung mit FEM-Programmen

Eine weitere Messung erfolgte an einem Knochen (Schafstibia), die Belastung erfolgte durch eine Zugprüfmaschine von 0 N bis 200 N quasistatisch. Die eingeleiteten Kräfte verursachten am Messobjekt aufgrund der Versuchsanordnung sowohl Biege- als auch Torsionsmomente. Der Sensor wurde direkt auf dem Messobjekt befestigt, um die lokalen Deformationen und Dehnungen zu messen.

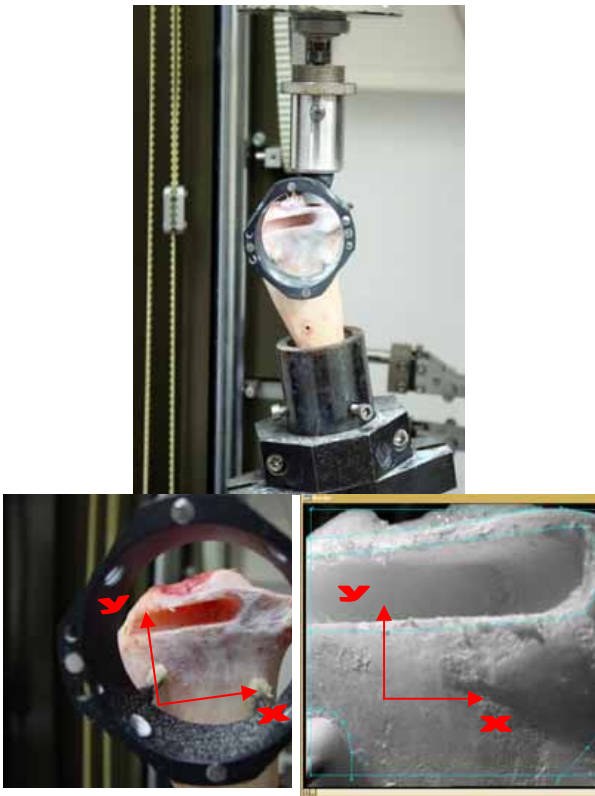


Bild 12: Experimenteller Aufbau zur Messung an einem Knochen (Schafstibia) (links).  
Darstellung des Messfeldes und Livebild des Sensors auf der rechten Seite (rot: Lage der Koordinatensysteme)

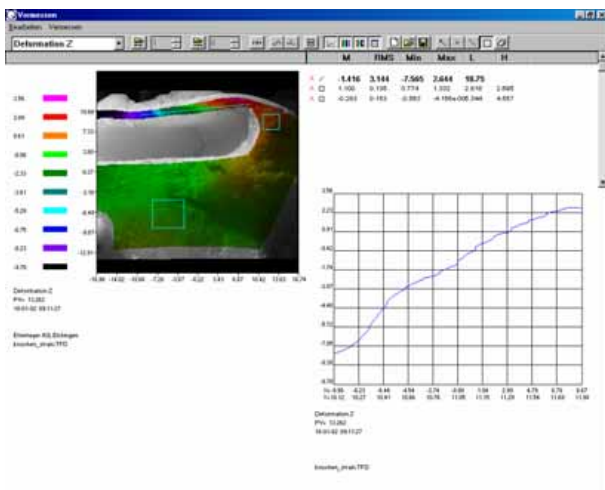


Bild 13: Livebild mit überlagertem Messergebnis, z-Deformation

Die Oberflächenform des Objektes bzw. der Messstelle wurde über die integrierte Konturerfassung ebenso ermittelt. Bild 12 zeigt den Versuchsaufbau und das entsprechende Messfeld. Eine Überlagerung des Livebildes mit dem Ergebnis der Verformung in z-Richtung sowie verschiedenen statistische Auswertungen von markierten Bereichen zeigt Bild 13.

## Danksagung

Wir danken der Technischen Universität München, Abteilung Biomechanik, sowie dem Institut für Unfallchirurgische Forschung u. Biomechanik an der Universität Ulm für die freundliche Unterstützung bei den Messungen.

## Autoren:

Th. Siebert  
H.R. Schubach  
Dantec Dynamics GmbH, Ulm

## Literatur

- [1] Ettemeyer, A.: Non contact and whole field strain analysis with a laseroptical strain sensor. VIII International Congress on Experimental Mechanics, June, 10-13, 1996, Nashville, Tennessee
- [2] Oliver Erne, Thomas Walz, Andreas Ettemeyer, "Automatic Shearography Inspection Systems for Aircraft Components in Production", Laser 1999, SPIE Proceedings 3824-38
- [3] Jones, R., Wykes, C.: Holographic and speckle interferometry. 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge 1989

**For more information please contact:**

Dantec Dynamics GmbH  
Kaessbohrerstrasse 18  
89077 Ulm  
Germany

Tel.: +49-731-933-2200  
Fax: +49-731-933-2299

E-mail: [product.support@dantecdynamics.com](mailto:product.support@dantecdynamics.com)  
Internet: [www.dantecdynamics.com](http://www.dantecdynamics.com)

Dantec Dynamics undertakes a continuous and intensive product development programme to ensure that its instruments perform to the highest technical standards. As a result the specifications in this document are subject to change without notice.