



Doctoral Thesis

## Quantitative strain analysis with image shearing speckle pattern interferometry (shearography)

**Author(s):**

Waldner, Stephan Peter

**Publication Date:**

2000

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-003912464> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No.13469

# **QUANTITATIVE STRAIN ANALYSIS WITH IMAGE SHEARING SPECKLE PATTERN INTERFEROMETRY (SHEAROGRAPHY)**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by  
Stephan Peter Waldner  
Dipl. Masch.-Ing. ETH  
born December 11, 1967  
citizen of Basel and Oberdorf (BL)

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Paolo Ermanni, examiner  
Prof. Dr. Jürg Dual, co-examiner  
Prof. Dr. Pierre Jacquot, co-examiner

2000

# ABSTRACT

This thesis reports on the development of a quantitative method for strain analysis. The method is based on image-shearing speckle pattern interferometry, which is also known as shearography.

Shearography Shearography is an optical technique to measure the deformation of object surfaces. Its principal field of application is qualitative non-destructive testing, e.g. to find defects in structures made from composite materials. Shearography is less susceptible to environmental vibrations than electronic speckle pattern interferometry (ESPI) or holographic interferometry. Furthermore, shearography allows for the adjustment of the measurement sensitivity without changing the optical set-up or the laser wavelength.

The goal of this work is to develop shearography into a method for quantitative strain analysis. This development implies a theoretical analysis of shearography, a concept for the extraction of the strains from the measured images, the implementation of image processing routines, and the design of specific measurement equipment.

Theoretical analysis For the theoretical analysis, the relation between measured phase change and mechanical deformation is derived for a general shearography set-up and the simplifications made in the derivation are identified and analysed.

Image processing In order to extract the strain components from the measured images, the following image processing techniques are needed: Calculation of the phase from the intensity measurements, filtering of the phase fringe patterns, phase unwrapping, removal of the image doubling, isolation of the directional components, and the quantitative evaluation of the strain fields. A new filter technique – the multiply repeated anisotropic sine/cosine average filter – is introduced and compared with other advanced filter techniques, clearly showing the superiority of the new filter. Another new image processing technique presented herein calculates the displacement field from the original phase map that represents an approximation to the displacement derivative. This procedure takes into account the finite character of the shear distance and removes its image-doubling effect. Shearography measurements usually contain a combination of directional components of the deformation according to the directions of illumination and observation. It is shown here that from three measurements – each with a different illumination direction – it is possible to isolate the directional components of deformation. With the light sources arranged in a specific symmetry and plane wave illumination, this isolation is particularly simple.

Specific equipment In order to have a practical system to perform the strain measurement, a special shearography system has been designed. It consists of a compact shearography head and three illumination modules. The system is remotely controlled from the computer.

Experimental verification The developed measurement technique, the equipment, and the image processing are verified by means of an exemplary measurement. The strains on the surface of a flat tensile specimen with symmetric notches is determined and the results are compared with the strain distributions calculated with the finite element method.

Results The image processing methods developed in this work are verified individually and show a very good performance. In the final experiment for strain measurement, where all processing steps are combined, the result for the largest strain component is acceptable. The peak value is measured with an accuracy of 6 % and in the rest of the sample the strain lies within the expected range. Still, disturbances, which result from the evaluation procedure, do not allow for the accurate determination of the local strain distributions. For the other strain components, the disturbances cover the wanted strain information.

Although the accuracy and reliability of the developed strain measurement method is not yet satisfactory, this work shows the feasibility of quantitative strain analysis with shearography and provides all important tools to perform and evaluate the measurements.

# KURZFASSUNG

Diese Arbeit berichtet über die Entwicklung einer quantitativen Methode zur Dehnungsanalyse. Die Methode basiert auf der bildscherenden Specklemuster-Interferometrie, die auch unter dem Namen 'Shearographie' bekannt ist.

Shearographie Shearographie ist eine optische Technik zur Messung von Verformungen der Objektoberfläche. Ihr Hauptanwendungsgebiet ist die qualitative zerstörungsfreie Prüfung, z.B. das Auffinden von Defekten in Strukturen aus Verbundwerkstoffen. Shearographie ist weniger empfindlich gegenüber Vibrationen der Umgebung als die elektronische Specklemuster-Interferometrie oder die holographische Interferometrie. Zudem erlaubt die Shearographie die Anpassung der Messempfindlichkeit ohne Aenderung des optischen Aufbaus oder der Wellenlänge des Lasers.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Shearographie zu einer Methode für die quantitative Dehnungsanalyse zu entwickeln. Diese Entwicklung beinhaltet eine theoretische Analyse der Shearographie, ein Konzept zur Ermittlung der Dehnungen aus den gemessenen Bildern, die Realisierung von Bildverarbeitungs-Routinen sowie die Konstruktion einer spezifischen Messausrüstung.

Theoretische Analyse Bei der theoretischen Analyse wird die Beziehung zwischen der gemessenen Phasenänderung und der mechanischen Verformung für einen allgemeinen Shearographie-Aufbau hergeleitet und die in der Herleitung enthaltenen Vereinfachungen werden identifiziert und analysiert.

Bildverarbeitung Um die Dehnungskomponenten aus den gemessenen Bildern zu ermitteln, werden folgende Bildverarbeitungstechniken benötigt: Berechnung der Phase aus den Intensitätsmessungen, Filterung der Phasenstreifenbilder, Phasenfaltung, Entfernung der Bildverdopplung, Isolation der Richtungskomponenten und die quantitative Auswertung der Dehnungsfelder. Eine neue Filtertechnik – das mehrfach wiederholte anisotrope Sinus/Cosinus-Filter – wird eingeführt und mit anderen fortschrittlichen Filtertechniken verglichen, was eine deutliche Ueberlegenheit des neuen Filters zeigt. Eine weitere neue Bildverarbeitungstechnik die hier präsentiert wird berechnet das Verschiebungsfeld aus der ursprünglichen Phasenverteilung, die eine Annäherung an die Verschiebungsableitung darstellt. Diese Prozedur berücksichtigt den finiten Charakter der Sheardistanz und entfernt den Effekt der Bildverdopplung. Shearographie-Messungen beinhalten normalerweise eine Kombination von Richtungskomponenten der Deformation, entsprechend den Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtungen. Es wird hier gezeigt, dass es möglich ist aus drei Messungen – jede mit einer anderen Beleuchtungsrichtung – die Richtungskomponenten der Verformung zu isolieren. Wenn die Beleuchtungsquellen in einer bestimmten Symmetrie angeordnet werden und die

Beleuchtung mit ebenen Wellen erfolgt, so wird die Isolation speziell einfach.

**Spezifische Ausrüstung** Um ein praktisches System zur Dehnungsmessung zur Verfügung zu haben, wurde ein spezielles Shearographie-System entwickelt. Es besteht aus einem kompakten Shearographie-Kopf und drei Beleuchtungsmodulen. Das System wird vom Computer ferngesteuert.

**Experiment** Die entwickelte Messtechnik, die Ausrüstung und die Bildverarbeitung werden mit einer beispielhaften Messung verifiziert. Die Dehnungen an der Oberfläche einer Flachzugprobe mit symmetrischen Kerben werden bestimmt und die Resultate werden mit Dehnungsverteilungen verglichen, die mit der Methode der finiten Elemente berechnet wurden.

**Ergebnisse** Die in dieser Arbeit entwickelten Bildverarbeitungsmethoden wurden einzeln verifiziert und zeigen eine sehr gute Leistungsfähigkeit. Beim abschliessenden Experiment, wo alle Verarbeitungsschritte kombiniert werden, ist das Ergebnis für die grösste Dehnungskomponente akzeptabel. Der Spitzenwert wird auf 6 % genau gemessen und auf dem Rest der Probe liegen die Dehnungen im erwarteten Bereich. Störungen, die aus dem Auswertevorgang resultieren, verunmöglichen jedoch eine genaue Bestimmung der lokalen Dehnungsverteilung. Bei den anderen Dehnungskomponenten überdecken die Störungen die gesuchte Dehnungsinformation.

Obwohl die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der entwickelten Dehnungsmessmethode noch nicht zufriedenstellend ist, zeigt diese Arbeit die Machbarkeit der quantitativen Dehnungsmessung mit Shearographie und liefert alle wichtigen Werkzeuge um die Messungen durchzuführen und auszuwerten.