

## Mit 3D-Scanning zur Erfassung des Knitterversagens von Sandwichpaneelen\*

Klaus Berner, iS-mainz, Fachhochschule Mainz,  
Lars Pfeiffer, iS-mainz, Fachhochschule Mainz,  
Martin Schlüter, i3mainz, Fachhochschule Mainz,  
Christian Weides, Fachhochschule Mainz

### Zusammenfassung

Mit einem mobilen 3D-Scansystem werden Deformationsmessungen an Sandwichelementen durchgeführt. Durch die schnelle und flächenhafte Erfassung geometrischer Oberflächenveränderungen werden qualitative und quantitative Aussagen zum Beulverhalten der Sandwichdeckschicht unter wachsender Belastung gewonnen. Ziel ist die Absicherung der theoretischen Modellbildung des Bauteilverhaltens mit Blick auf zukünftige Berechnungsmodelle. Diskutiert werden insbesondere der Hintergrund der Messaufgabe sowie Strategie und praktische Umsetzung der Messdatenprozessierung.

### Abstract

Utilizing a mobile 3D scanning system accurate surveying of deformations on sandwich elements is undertaken. The quick and laminar detection of geometrical changes in the sandwich face under increased loading is undertaken. The results are analysed, both in quality and quantity. It is the aim of the research to assure theoretical modelling of wrinkling (short buckling) failure of sandwich structures. This paper discusses particularly the background of the scanning request as well as implementation and strategy the results obtained in the scanning process.

### 1. 3D-Scanning am i3mainz

Forschung und Entwicklung im Bereich 3D-Scanning und 3D-Visualisierung zählen seit der Gründung des Instituts für Raumbezogene Informations- und Messtechnik i3mainz im Jahr 1998 zu den inhaltlichen Schwerpunkten. Unter anderem wurde ein Testparcours für Laserscanner mittlerer Reichweiten eingerichtet. Nicht zuletzt auch durch die erfolgreiche Arbeit des vom Land Rheinland-Pfalz am i3mainz eingerichteten Kompetenzzentrums Raumbezogene Informationstechnik in den Geisteswissenschaften (unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Böhler) steht Ende 2003 eine exzellent sortierte Palette modernster mobiler 3D-Scansysteme zur Verfügung [1]. Mit je einem Leica Cyrax 2500, Mensi SOISIC, 3dscanners Modelmaker X70 auf Faro-Messarm sowie einem GOM ATOS II werden in Mainz anwendungsorientierte Forschungs- und Entwicklungsaufgaben für Objektmessungen ab etwa zehn Zentimetern bis hin

zu mehreren hundert Metern gelöst [2].

### 2. Sandwichelemente im Hochbau

Sandwichelemente erfreuen sich in den letzten Jahren wachsender Beliebtheit im Bausektor. Insbesondere als raumbildende Dach und Wandkonstruktionen mit lastabtragender Wirkung bilden sie eine Alternative zu den konventionellen Wandverkleidungen. Der Vorteil der Sandwichtragwerke liegt in der schnellen Montage von industriell vorgefertigten Bauteilen. So werden Bauzeiten minimiert und Fehler bei der Errichtung vermieden.

#### 2.1 Tragverhalten und Aufbau von Sandwichelementen

Sandwichelemente sind tragende Bauteile. Sie geben Lasten wie Wind und Schnee an die Unterkonstruktion weiter. Aufgrund der besonderen Tragstruktur von Sandwichelementen bestehend aus einem schubsteifen Kern und zwei metallischen Deckschichten, ergeben sich unterschiedliche Versagenszustände im Vergleich zu herkömmlichen Tragwerken. So, als Versagensursache momentenbeanspruchter Elemente, ein kurzweiliges Beulversagen der auf Druck beanspruchten Deckschicht, das Knittern. Während die Querkraft durch den schubsteifen Kern aufgenommen wird, entsteht durch das Biegemoment ein Kräftepaar mit entgegengesetztem Vorzeichen in den beiden Deckschichten. Da es sich im Allgemeinen um dünne Deckschichten, also ohne nennenswerte eigene Biegesteifigkeit, handelt, müssen die Deckschichten bei Druckbeanspruchung durch die stützende Kernschicht stabilisiert werden. Die mechanischen Eigenschaften des Kerns haben daher einen signifikanten Einfluss auf das Tragverhalten der Gesamtstruktur.

#### 2.2 Ermittlung ideeller Knitterlasten

Zur Ermittlung der Beanspruchbarkeit von Sandwichelementen bis zum Knitterversagen liegen zwar Theorien vor [3], [4], jedoch liefern diese, im Vergleich mit den experimentell gefundenen Ergebnissen, nur

\* Dieser Beitrag wurde durch die Zuweisung von Forschungsmitteln aus dem Forschungsfonds des Senats der Fachhochschule Mainz gefördert

unbefriedigende Werte.

Grundsätzlich beruhen diese Theorien auf der idealen Knitterlast, also der Knitterlast bis zum Beulversagen als Eigenwertproblem nach folgender Formel:

$$\sigma_{wi} = 0.851 \cdot \sqrt{E_f \cdot E_c \cdot G_c} \quad (\text{Gl. 1})$$

$\sigma_{wi}$	ideelle Knitterspannung
$E_f$	Elastizitätsmodul der Deckschicht
$E_c$	Mittelwert aus Druck- und Zugmodul der Kernschicht
$G_c$	Schubmodul der Kernschicht

### 2.3 Bettungsspannungen der Kernschicht

Bevor das Bauteil durch Knittern versagt, stellt sich eine wellenförmige Verformung der auf Druck beanspruchten Deckschicht ein. Diese Verformung aktiviert die stützende Wirkung des Kerns. In [Linke 1978] und [Plantema 1966] wird davon ausgegangen, dass diese erste Verformung einen sinusförmigen Verlauf einnimmt. Für die Beanspruchung in der Grenzschicht zwischen Kern- und Deckschicht ergibt sich folgendes Bild:

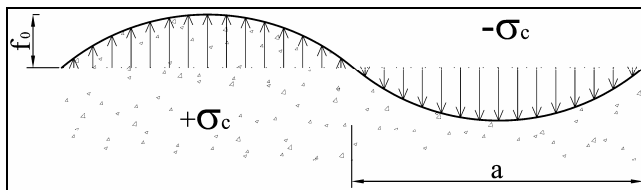


Abb. 1: Beanspruchung eines Sandwichelements in der Grenzschicht zwischen Kern- und Deckschicht

Fig. 1: supporting stresses at the boundary layer between face and core

In der Kernschicht entstehen Zug- und Druckkräfte. Reicht die Haftung zwischen Deck- und Kernschicht oder die Zug- bzw. Druckfestigkeit der Kernschicht nicht mehr aus um die Deckschicht zu stabilisieren, stellt sich ein Versagen (Knittern) vor dem Erreichen der ideellen Knitterspannung ein.

Die auftretende Bettungsspannung lässt sich nach [2] mathematisch bestimmen. Der maximale Absolutwert der Kernschichtbeanspruchung ergibt sich zu:

$$\max \sigma_c = \frac{\pi}{a} \cdot \sqrt{E_c \cdot G_c} \cdot f_0 \cdot t \cdot \frac{\sigma_x(i)}{\sigma_{wi} - \sigma_x(i)} \quad (\text{Gl. 2})$$

$\sigma$	vorliegende Bettungsspannung
$a$	Länge der Sinushalbwellen
$f_0$	Amplitude der Sinushalbwellen
$t$	Dicke der druckbeanspruchten Deckschicht

$\sigma_x(i)$	in der Deckschicht vorhandene Druckspannung
$\sigma_{wi}$	ideelle Knitterspannung

Die Bettungsspannung in der Kernschicht ist somit neben den mechanischen Kenngrößen des Kerns und der Höhe der Druckspannung in der Deckschicht vor allem abhängig von Amplitude und Wellenlänge der angenommenen Sinushalbwellen. Können Materialeigenschaften des Kerns und die vorhandene Spannung in der Deckschicht sehr genau bestimmt werden, so wären für die Eigenschaften der sinusförmigen Verformung bislang nur Annahmen möglich. In [3] wird gezeigt, dass die Länge der Halbwellen bestimmt ist durch:

$$a = \pi \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot D}{\sqrt{E_c \cdot G_c}}} \quad (\text{Gl. 3})$$

$D$  Steifigkeit der Deckschicht

Für die Amplitude der Halbwellen wird in [3] mit Verweis auf [4] angenommen:

$$f_0 = \frac{a}{500} \quad (\text{Gl. 4})$$

Zur Ermittlung der Kernspannungen ist der Einfluss der Amplitude also linear. Der Divisor 500 ist hier aber nur geschätzt und experimentell nicht bestätigt. Genauer Untersuchungen zur tatsächlichen Verformung der Deckschicht liegen aber derzeit nicht vor. Die Verformungen sind während der Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Tragfähigkeit bei Versagen durch Knittern mit bloßem Auge nicht oder nur sehr schwach sichtbar.

### 3. Experimentelle Durchführung

Um die Bettungsspannungen, die auf einen Sandwichkern wirken, genau zu bestimmen, ist es nötig, die Verformung in Deckschichtebene während eines Biegeversuchs zu beobachten, vgl. Abb. 2. Wellenlänge und Amplitude sowie die Wellenform sollen möglichst exakt bestimmt werden.

Gegenstand der Untersuchung sind Sandwichpaneele mit Polystyrol Kern und Deckschichten aus Stahlblech. Die genauen Werkstoffeigenschaften der Kern- und Deckschicht wurden experimentell bestimmt. Für die untersuchte Paneelkonfiguration ergab sich eine theoretisch zu erwartende Wellenlänge von  $a = 78,8 \text{ mm}$  und eine Amplitude von  $f_0 = 0,16 \text{ mm}$ .

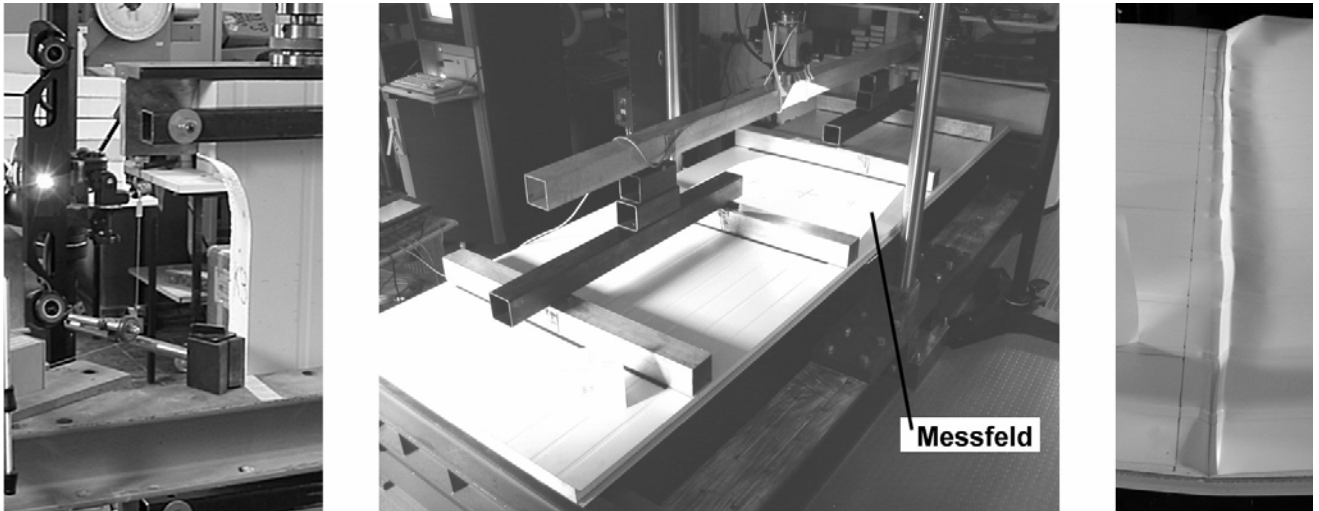


Abb. 2: Versuchsbaufbau mit Streifenprojektionsscanner GOM ATOS II und kleinem Bauteil (links); Sechs-Punkt Biegeversuch mit Lasteinleitung in den Bauteilviertelspannen. In der Mitte das Messfeld des Scanners (links); Sandwichpaneel nach dem Versagen (rechts)

Fig. 2 Test setup with band projection scanner GOM ATOS II and the small scale test setup (left); Six point bending test with loading in the quarter points of the panel. In the middle the measuring field can be seen (middle); sandwich after wrinkling failure (right)

Als Versuchsaufbau wurde ein Sechs-Punkt-Biegeversuch mit Lasteinleitung in den Bauteilviertelspannen nach [5], so wie ein neu entwickelter Kleinversuch gewählt. Untersucht wurde jeweils der Bereich mit den größten Druckbeanspruchungen in der Deckschicht, vgl. Abb. 2.

Der Einsatz von bislang drei unterschiedlichen Prüfmaschinen, die sowohl vertikale als auch horizontale Anordnung der Prüflinge sowie unterschiedlich ausgedehnte Messfelder legten den Einsatz mobiler 3D-Koordinatenmesstechnik nahe. Das photogrammetrische Streifenprojektionssystem GOM ATOS II wurde als 3D-Scanner ausgewählt, weil es die erforderli-

che Flexibilität im Instrumentenaufbau bietet, weil die erforderlichen Aufnahmezeiten pro Scan von etwa 15 bis 20s im Rahmen der Versuchsaufbauten akzeptabel waren und weil eine geometrische Auflösung bis deutlich unter den Zehntelmillimeter gefordert war. Ein Belastungsversuch mit etwa 10-12 Stufen schrittweise wachsender Belastung bis zum Versagen des Bauteils kann mit diesem System incl. aller 10-12 Scans in insgesamt etwa 15-20 Minuten abgeschlossen werden.

Die Erfassung der absoluten Deckschichtbewegung durch die schrittweise gesteigerte Belastung ist hier nicht von Interesse. Das Bezugssystem wird daher di-

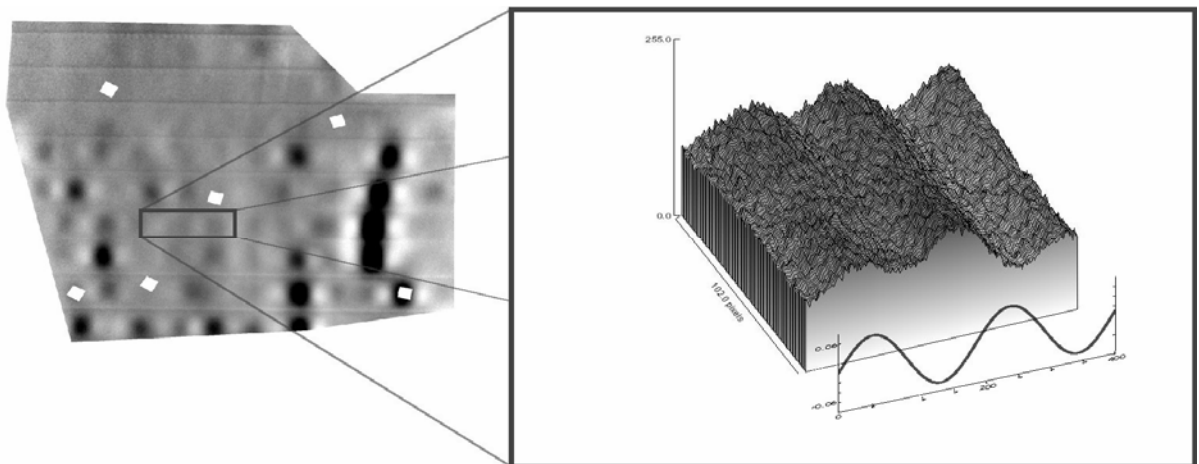


Abb. 3: Beulverhalten nach der Differenzbildung mit Graustufen als Höhenwerte (links); Oberflächendarstellung mit theoretischer Wellenverformung (rechts)

Fig. 3: pre wrinkling deformation after deviation of load increments with grey scale indicating level of deformation (left); Three dimensional surface plot with theoretical sinusoidal deformation (right)

rekt auf der Sandwichdeckschicht mittels Retrotargets als Passmarken definiert. Die Auswertesoftware setzt damit die wahre Objektbewegung in eine rein rechnerische Sensorbewegung um. Dieser Sachverhalt wurde vorab unter kontrollierten Rahmenbedingungen auf einer Richtplatte simuliert und bestätigt.

Die gescannten 3D-Punkte werden jeweils dreiecksvermascht und in die 2,5D-Rasterdatendarstellung eines digitalen Bildes mit 4Byte pro Stützstelle überführt. Um die Feinverformung der Deckschicht sichtbar zu machen, wird anschließend eine Differenzbildung der Ergebnisse unterschiedlicher Belastungsstufen eines Bauteils vorgenommen. Damit verbleiben in den Ergebnissen die Verformungen zwischen den Belastungsstufen, welche wiederum einer Frequenzanalyse unterzogen werden. Im Wesentlichen lassen sich nun die verbliebenen Verformungen in einen stark tieffrequenten Anteil, also eine Art globale Durchbiegung, sowie das gesuchte hochfrequente Beulverhalten (vgl. Abb. 3) aufspalten.

Da sich die Sandwichpaneele je nach Zweck und Hersteller in ihrer Linierung stark unterscheiden, wurde für die sofortige Auswertung der Scans vor Ort das Bildverarbeitungspaket ImageJ eingesetzt (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>). Damit ergeben sich folgende Vorteile: Kleine Änderungen im Bildverarbeitungsprocedere können in Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur der Paneele direkt vorgenommen werden; Anwender und Messdienstleister können durch den Freeware-Status der Software auf ein gemeinsames Verarbeitungstool zugreifen; die Programmiersprache Java erlaubt den Einsatz sowohl auf dem Linux-basierten Industrie-PC des GOM-Scansystems als auch auf der Windows-basierten Plattform des Anwenders; die Extraktion von Oberflächenprofilen und deren Export in die Tabellenkalkulation zum Zweck der Analyse z.B. via diskreter Fourier-Transformation ist per drag'n drop denkbar einfach und schnell. Ein Flaschenhals in puncto Rechenzeit (Java!) wurde durch die Implementierung separierter Filtermasken auf Basis einer Gaußpyramide beseitigt, [6].

#### 4. Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

Ziel der Untersuchung war es, die Verformung von druckbelasteten Deckschichtmembranen an Sandwichbauteilen zu bestimmen. Mit Hilfe von 3D-Scans wurden Sandwichelemente in Bauteilbiegeversuchen untersucht.

Mit Hilfe von 3D-Scans gelang es erstmals, die Beulverformungen in der druckbeanspruchten Deckschicht sichtbar zu machen. Es wird eine gute Übereinstimmung der theoretischen Beullänge (a) mit der

experimentell gefundenen festgestellt. Die ermittelten Amplituden zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Werten, jedoch sind die Ergebnisse hier nicht so eindeutig. Kleine lokale Störungen führen zu teilweise starken lokalen Verformungen.

Für weitere theoretische Betrachtungen, so wie für Untersuchungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode bilden die angenommenen Verformungswerte eine gute Ausgangsbasis. Die Ergebnisse sollten jedoch mit anderen Paneelkonfigurationen (Art der Linierung und Art des Kerns) bestätigt werden.

#### Kontaktadressen der Autoren

Prof. Dr.-Ing. Klaus Berner

Dr. Dipl.-Ing. (FH) Lars Pfeiffer

iS-mainz, Institut für Sandwichtechnik  
Lauterenstraße 37, 55116 Mainz  
Fachhochschule Mainz,  
Holzstraße 36, 55116 Mainz

Prof. Dr.-Ing. Martin Schlüter

Dipl.-Ing. Christian Weides

i3mainz, Institut für raumbezogene Informations-  
und Messtechnik  
Fachhochschule Mainz,  
Holzstraße 36, 55116 Mainz

#### Literatur:

- [1] BÖHLER, W.; Marbs, A.[2002]: 3D Scanning Instruments. CIPA, Heritage Documentation, Intern. Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, Greece, 2002.
- [2] MARBS, A. [2003]: Über Altes und Neues. 3D-Scanning im Bereich der Denkmalpflege. GeoBIT, S. 11-13, 11/2003.
- [3] LINKE, K.-P. [1978]: Zum Tragverhalten von Profilsandwichplatten mit Stahldeckschichten und einem Polyurethan-Hartschaum-Kern bei kurz- und langzeitlicher Belastung, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt.
- [4] PLANTEMA, F.J [1966]: Sandwich Construction, The Bending and Buckling of Sandwich Beams, Plates and Shells, John Wiley and Sons, New York, London, Sydney
- [5] prEN 14 509 Self-supporting double skin metal faced insulating sandwich panels – Factory made products - Specification
- [6] WEIDES, C. [2003]: Untersuchung des 3D-Scanners GOM ATOS II am Beispiel einer Deformationsanalyse im Submillimeterbereich. FH Mainz, Diplomarbeit Nr. 1592.