

# **Umformverhalten und Grenzen von Schichtverbundwerkstoffen**

DISSERTATION  
zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Ingenieurwissenschaften

von  
Dipl.-Ing. Johannes Buhl,  
geb. am 21.05.1985 in Siegen,

eingereicht bei der Naturwissenschaftlichen-Technischen Fakultät  
der Universität Siegen

11/2013

Gutachter:  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinz Palkowski

Tag der mündlichen Prüfung: 05.05.2014



Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik

Band 4

**Johannes Buhl**

**Umformverhalten und Grenzen  
von Schichtverbundwerkstoffen**

Shaker Verlag  
Aachen 2014

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2822-5

ISSN 2191-0030

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Diese Arbeit basiert auf Untersuchungen, die mir während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik (UTS) der Universität Siegen in verschiedenen Projekten übergeben wurden. Ich möchte mich herzlich bei dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die Finanzierung der ersten Ideen bedanken.

Professor Dr.-Ing. Bernd Engel betreute mich bei meiner Arbeit. Ihm gilt besonderer Dank für die eingeräumten wissenschaftlichen Freiräume, die konstruktive Unterstützung und für die Möglichkeit der experimentellen Umsetzung meiner Ideen, sowie die Erstellung des Erstgutachtens.

Professor Dr.-Ing. Heinz Palkowski danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit, die Einladung auf die MNMMCS in Turin und die Übernahme des Zweitgutachtens.

Für die Zusammenarbeit bedanke ich mich bei den Mitarbeitern, Kollegen und Studenten<sup>1</sup> die mit ihren Arbeiten und damit verbundenen fachlichen Diskussionen und Anregungen sehr zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben. An dieser Stelle gilt mein besonderer Dank meinem Zimmerkollegen Dr.-Ing. Rainer Steinheimer, der mich zum Nachdenken über Inhomogenitäten angeregt und für das Messen von den physikalischen Größen angelernt hat. Christopher Heftrich danke ich für seine hervorragende Studien- und Diplomarbeit im theoretischen Bereich und hoffe, dass er diese Untersuchungen weiter verfolgt und ausbaut. Auf der experimentellen Seite gilt mein herzlicher Dank Nils Michael Klein und Michael Haag für ihren großen Einsatz und die genaue Arbeitsweise, aber auch Herrn Stahl von unserer Departments-Werkstatt. Für die zahlreichen Grundsatzdiskussionen danke ich besonders meinen Kollegen Markus Junge und Eveline Soemer.

Nicht zuletzt danke ich meinem Gott, meinen Eltern und sieben Geschwistern, die großes Interesse für die Arbeit an der UNI gezeigt haben und mich während der gesamten Zeit wesentlich unterstützt haben.

**Siegen, den 06.05.2013**

**Johannes Buhl**

„Wer nicht an Wunder glaubt, ist kein Realist.“<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> N.-M. Klein, M. Haag, C. Heep, ...

<sup>2</sup> Zitat von David Ben-Gurion

Welch hehres Ziel: vom Start bis Schluss  
ein roter Faden leuchten muss.  
Und viele Stunden gehen drauf,  
das eins baut auf dem andern auf.

O, wie ist diese Arbeit schwach,  
welch kleiner Beitrag für mein Fach!  
Komplett verstaubt wird sie bald steh'n,  
wenn weitrer Fortschritt ist zu sehn.

Mit mehr als vierzig Schreibern gar,  
und Schreibzeit über tausend Jahr,  
doch alles in dem gleichen Sinn,  
reicht Gott dem Mensch sein Worte hin.

Dass sie aufnehmen kann ein Kind,  
die Worte wahr und einfach sind.  
Unmissverständlich, göttlich klar,  
stellt Jesu Kreuz das Zentrum dar.

Solls Wahrheit oder Mythos sein,  
dass Jesu Tod der Weg allein,  
der retten kann vom Tod zum Leben,  
und Heilung von den Sünden geben?

Die Bibel ist das einzig' Buch,  
das wirklich hilft, dem der drin sucht,  
drum möcht ich hin, auf dieses zeigen,  
und Gott für seine Liebe preisen.

## **Kurzzusammenfassung**

Stetig verstärkt sich der Innovationsdruck bei gleichzeitig verkürzter Einführungszeit neuer Produkte. Hohe Materialkosten schränken experimentelle Untersuchungen zur Überprüfung der Herstellbarkeit von neuen Bauteilgeometrien stark ein. Zudem müssen Maschinen- und Umformparameter möglichst genau vorausberechnet werden. Innovative Werkstoffe, wie funktionsoptimierte Sandwichbleche, versagen bei konventioneller Weiterverarbeitung sehr schnell.

Ziel der Dissertation ist es, die Umformeigenschaften und -grenzen von Sandwichblechen mit geeigneten Mitteln zu beschreiben, um den Umformprozess für ein Sandwichblech oder das Sandwichblech für einen Umformprozess zu optimieren.

Ausgehend von einer Literaturrecherche und der analytischen Beschreibungen homogener Bleche werden plastomechanische Ansätze in Form von Analytisch-Inkrementellen und Finite-Element Methoden dargestellt. Mit Analytisch-Inkrementellen Beschreibungen werden ganze Versuchsserien automatisch generiert und berechnet. Finite-Element Methoden, kurz FEM weisen eine höhere Genauigkeit und Berechnungszeit auf; erfordern aber in der Regel keine Programmierkenntnisse. In den verfügbaren Lösungen besteht Bedarf an Modellen zur Beschreibung des Klebverhaltens.

Zunächst werden die Versagensfälle „Verschiebung“ und „Delamination“ aufgezeigt und mit der Verschiebung der neutralen Faser verknüpft.

Um die Berechnungsmodelle zu kalibrieren und die komplexen Umformeigenschaften ansatzweise beschreiben zu können, werden drei Standard-Experimente, der Zugversuch, der Scherzugversuch und das V-Gesenkbiegen eingehend experimentell und mit beiden Berechnungsmethoden untersucht. Mit einem neuartigen Versuchsaufbau wird der Einfluss der dissipierten Energie berücksichtigt. Zur Beschreibung des Klebverhaltens wird die Steifigkeit der Deckschichten durch eine iterative Berechnung eliminiert.

Die Stärken der einzelnen Methoden werden miteinander verknüpft. Beispielsweise können die Parameter des Klebmodells mit der FEM sehr genau berechnet werden. Um Sandwichbleche zu optimieren werden die Parameter aus der FEM übernommen und ein Versagensschaubild für ganze V-Gesenkbiege-Serien aufgezeigt.

Ein weiteres Beispiel ist die Dehnungsauswertung in Dickenrichtung. Sie wird zur Verifizierung der Berechnung benötigt. Da die Kantenaufwölbung die Messung stark verfälscht, wird diese üblicherweise nicht durchgeführt. Mithilfe der FEM kann ein plastomechanisches Modell aufgestellt und die Kantendehnungen auf die Blechmitte umgerechnet werden.

Zum Abschluss werden die aufgestellten Berechnungs- und Optimierungsalgorithmen an einem Walzprofilierprozess geprüft.





## **Abstract**

Requirements, that set the construction on materials, are often no longer accomplishable economically with homogeneous materials sheets. High material costs limit experimental studies to verify the producibility of new components. In addition, the machine and forming parameters should be predicted precisely. Innovative materials, such as function-optimized sandwich panels, fail often during conventional processing.

The aim of this thesis is the description of the deformation properties and limits of sandwich plates to optimize the forming process for a sandwich plate, or to optimize the sandwich plate for a forming process. Starting with literature research, analytical descriptions of homogeneous plates in the form of incremental and finite element methods are presented. With analytic-incremental descriptions whole series of tests can generate and calculate automatically. Finite element methods (FEM) have a higher accuracy, requires no programming knowledge, but features a high computation time. For available solutions, models to describe the adhesion behavior should be improved.

First, the failure cases "shift" and "delamination" are shown and connected with the shift of the neutral axis. To calibrate the computational models and to describe the complex forming properties rudimentary, three standard experiments, the tensile test, the shear test and the v-die bending are investigated in detail; both experimentally and with calculation methods. Using a novel experimental setup, the influence of the dissipated energy is considered. To describe the adhesion behavior, the stiffness of the outer layers is eliminated by an iterative computation.

Further, the advantages of the different methods are linked. For example, the parameters of the adhesive-model can be calculated with the FEM accurately. So the parameters to optimize sandwich plates with incremental methods are taken from the FEM. V-die bending series can be determined time efficient and demonstrated with a failure diagram. Another example is the evaluation of strain in thickness direction. It is needed to verify the linear strain gradient. By the reason, that the deformation of the edges greatly influences the measurement, this proof is usually not given. Using the FEM, a plastomechanical model can be set and the measured strains at the edges can be converted to the center.

Finally, the established calculation and optimization algorithms are tested with a roll forming process.



---

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Einteilung und Aufbau von Schichtblechen .....	3
3	Versagensarten von Sandwichblechen.....	7
3.1	Verschiebung.....	7
3.2	Delamination .....	9
3.3	Messmethoden zur Bestimmung der Verschiebung .....	10
4	Modellierungen der Umformung von Sandwichblechen.....	12
4.1	Analytische Verfahren zur Beschreibung des Biegeverhaltens von Blechen 12	
4.2	Beschreibung der Umformung von Sandwichblechen mit inkrementellen Methoden.....	16
4.2.1	Starre Verbindung .....	16
4.2.2	Schubübertragende Verbindung.....	17
4.3	Anwendung von FE-Methoden.....	19
4.3.1	Optimierungsbeispiele mit FE-Methoden.....	19
4.3.2	Modellierungsmöglichkeiten von Sandwichblechen mit FEM .....	21
4.4	Zugversuche für die Deckbleche.....	23
4.4.1	Zugversuche nach der DIN EN 10002-1 .....	23
4.4.2	Einfluss von Probeninhomogenität am Beispiel des Zugversuches .....	26
4.4.3	Ansätze zur Eliminierung von Inhomogenität im Zugversuch.....	27
4.5	Scherversuche zur Ermittlung der Klebereigenschaften.....	30
4.5.1	Messung der Dehnungen im Scherversuch.....	30
4.5.2	Testen der Zug und Schubbeanspruchung der Klebschicht.....	33
4.5.3	Modellierung der Spannungs-Dehnungsbeziehung.....	36
5	Aufgabenstellung .....	40
6	Abbildung der Grundlagenversuche mit FE-Methoden.....	43

---

6.1	Vereinfachungsgrad der Kopplung von Temperatur und Geschwindigkeit beim Kaltumformen von Sandwichblechen.....	43
6.2	Isotherme Zugversuche an Sandwichblechen.....	45
6.3	Scherversuche an Sandwichblechen .....	47
6.3.1	Voruntersuchungen .....	47
6.3.2	Einflussparameter im Scherzugversuch nach DIN .....	49
6.3.3	Nachbildung des Scherzugversuchs mithilfe numerischer Simulation	50
6.3.4	Isotherme und temperaturabhängige Scherversuche .....	54
6.3.5	Iterative Bestimmung der Parameter des Traction-Separation-Law´s .	57
6.4	Testen der Klebschicht auf Zug- und Schubbeanspruchung .....	61
6.4.1	Versuchseinrichtung zur Zug- und Schubbeanspruchung .....	61
6.4.2	Versuchsdurchführung und Messtechnik.....	62
6.5	V-Gesenk-Biegeversuche.....	66
6.5.1	Versuchsaufbau und Probenvorbereitung.....	66
6.5.2	Auswertung der Dehnungsverteilung in Dickenrichtung .....	69
6.5.3	Experimentelle Ermittlung des Biegescheitels und der Kantenabsenkung .....	71
6.5.4	Auswertung der Kantendehnungen.....	75
6.5.5	Beziehung der Dehnung zwischen Kante und Blechmitte .....	77
6.5.6	Deckblechverschiebungen aus Simulation und Experiment.....	79
6.5.7	Dehnungsverteilung für schubübertragende Sandwichbleche.....	83
6.5.8	Bestimmung der Klebparameter mithilfe der Deckblechverschiebung	85
7	Umformberechnung und Optimierung von Sandwichblechen .....	87
7.1	Verschiebung der neutralen Faser.....	87
7.2	Modell „viskoelastische Klebverbindung“ .....	88
7.3	Modell „schubübertragende Klebverbindung“ .....	90
7.4	Modell „Klebverbindung mit Versagensbeschreibung“ .....	97

---

7.5	Optimierung von Sandwichblechen .....	104
7.5.1	Dämpfung eines Sandwichbleches .....	104
7.5.2	Vorschläge zur Optimierung von Sandwichblechen mit Sondereigenschaften .....	105
7.5.3	Versagensschaubild mit Darstellung der Schwingungsdämpfung .....	107
8	Anwendungsbeispiel: Walzprofilieren von Verbundblech.....	109
8.1	Walzprofilierung einer Führungsschiene aus dem Automotive-Bereich....	109
8.2	Aufbau des Simulationsmodells zum Profilieren von Sandwichblechen mit schubweicher Zwischenschicht.....	110
8.3	Vergleich der simulativen- und experimentellen Ergebnisse .....	112
8.4	Eigene Sandwichbleche nach Optimierungsmethode.....	115
9	Zusammenfassung und Ausblick .....	117
10	Literaturverzeichnis .....	121
11	Anhang .....	144

