

Mechanische Eigenschaften dichtemodifizierter sinuswabenförmiger Pappwerkstoffe

Mechanical properties of dense modified sinus honeycomb cardboard material

Patrick Kluge
Sven Eichhorn
Klaus Nendel

*Technische Universität Chemnitz
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe
Professur Fördertechnik*

Sinuswabenförmige Pappwerkstoffe eignen sich als Kernelement für tragende Verbundstrukturen. Ihre absolut niedrige Druckfestigkeit und -steifigkeit verhindert jedoch die technisch zuverlässige Verwendung von gleitfest vorgespannten Schraubverbindungen. Es wird eine Methode zur Erhöhung der Beanspruchbarkeit der Pappwerkstoffe unter Druck dargestellt sowie deren Auswirkungen auf gleitfest vorgespannten Schraubverbindungen beschrieben.

[Schlüsselwörter: Pappwerkstoff, Sandwichverbund, Materialmodifizierung, mechanische Eigenschaften, Schraubverbindung]

Sinus honeycomb cardboard materials are suitable as core element for load-bearing composite structures. Their absolutely low compressive strength/stiffness prevent the introduction of high-strength friction bolting. Hereinafter, a method for increasing the stressability as well as the effects of the use of threaded connections is described.

[Keywords: cardboard material, sandwich composite, material modification, pressure properties, screw connection]

1 PROBLEMSTELLUNG

Als Kernmaterial von Sandwichverbunden finden sinuswabenförmige Pappwerkstoffe breite Anwendung. Beispiele sind Innenraumausstattungen von Fahrzeugen, Dämmsysteme in der Bauindustrie sowie bei Möbeln, Inneneinrichtungen und Spezialverpackungen. Hohe Stabilität, sehr gute Dämmeigenschaften und einfache Bearbeitbarkeit bzw. Formbarkeit bei gleichzeitig extrem geringem Gewicht sind bekannte Vorteile, welche die sinuswabenförmigen Pappwerkstoffe zu einem idealen Leichtbauwerkstoff machen. [1]

Für tragende Anwendungen im Maschinenbau haben sich Metalle (z. B. Stahl- und Aluminiumlegierungen) aufgrund ihrer absolut hohen mechanischen Festig- bzw. Steifigkeiten etabliert. Sie eignen sich als isotrope Werk-

stoffe für eine einfache, schnelle Auslegung tragender Strukturen. Aufgrund ihrer hohen Dichte ist effizienter Leichtbau nur begrenzt möglich. Eine leichte und belastbare Alternative bieten Sandwichverbunde bestehend aus sinuswabenförmigen Pappwerkstoffen als Kernelement und Deckschichten aus WVC (Wood Veneer Composite - Holz furnierlagenverbundwerkstoff). Beide Sandwichkomponenten zeichnen sich durch vorteilhafte spezifische mechanische Eigenschaften (spezifisch: auf die Werkstoffdichte bezogen) aus. Darüber hinaus verfügt WVC über eine gute Resistenz gegenüber Chemikalien und eine geringe Temperaturdehnung, welche sich z. B. durch eine hohe Wärmeformbeständigkeit zeigt. Eine Kombination von Pappwerkstoffen und WVC zu einem Sandwichverbund besitzt das Potential für sehr leichte und steife Strukturen. Diese können in tragenden Anwendungen des Maschinenbaus genutzt werden.

Aktuelle formschlüssige Verbindungsmittel für Sandwichelemente mit Wabenkernen aus Pappe sind u.a. spezielle Kunststoffdübel oder Sprengnieten [3]. Diese erzeugen jedoch keine technisch nutzbare, vorgespannte Verbindung mit hoher Festigkeit, wie im Maschinenbau übliche vorgespannte Schraubverbindungen. Derartige Schraubverbindungen erzeugen hohe lokale Beanspruchungen, die im Falle von Sandwichelementen mit relativ druckweichen Deckschichten und Kernen großflächig über Zusatzelemente wie Bleche in die Verbundstruktur eingeleitet werden müssen [2]. Die Verwendung steiferer WVC-Deckschichten bedeutet ebenso wie das Einbringen steifer Zusatzelemente Mehrkosten und -gewicht. Bei Verzicht auf Zusatzelemente wird die Kraft über die funktionale Fläche der Schraubverbindung (Schraubenkopf und Unterlegscheibe) direkt in die WVC-Deckschicht geleitet. Es bildet sich, wie in Abbildung 1 exemplarisch zu sehen, ein Druckkegel in der Deckschicht aus, über den die Kraft lokal in das Kernelement geleitet wird [4]. Die exakte Form des Druckkegels ist aktuell unklar. Die allgemein geringe Drucksteifigkeit der WVC-Deckschicht in Zusammenhang mit der geringen Druckfestigkeit und -steifigkeit der Pappwerkstoffe führt zu einer lokalen Verformung des Verbundes im Bereich der Verbindungsstelle

entsprechend Abbildung 2. Diese Verformungen gilt es zu vermeiden, da sie zum Abfall der Vorspannkraft und zum Versagen der Werkstoffe bzw. des Verbundes im Bereich der Fugestelle führen können.

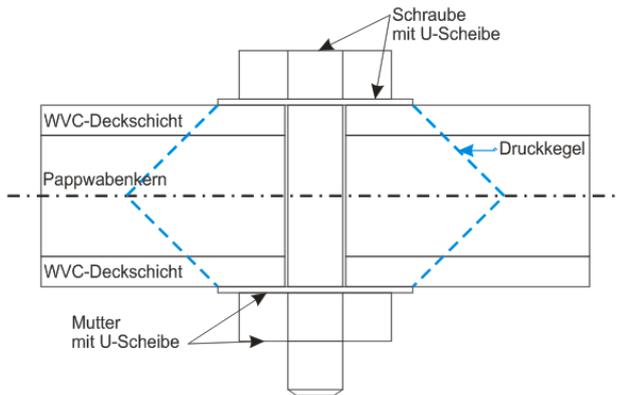


Abbildung 1. Schraubverbindung mit möglichem Druckkegel (blaue Strichlinie) in Sandwichelement vor dem Spannen der Schraube [4]

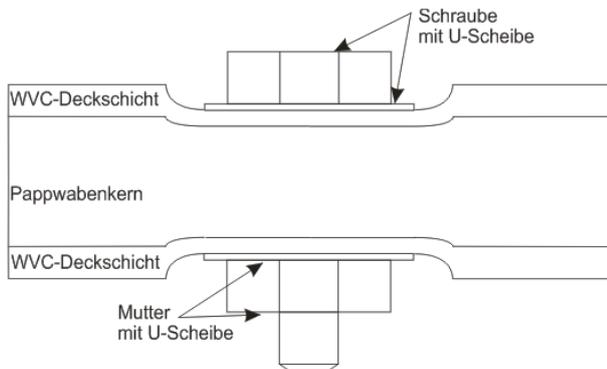


Abbildung 2. Schraubverbindung in Sandwichelement nach dem Spannen mit Verformung der Deckschicht und des Kerns

2 ZIELSTELLUNG

Es soll im Rahmen der Untersuchungen eine Verdichtung der sinuswabenförmigen Pappwerkstoffe in der Plattenebene (vgl. Abbildung 3, x und y-Richtung) stattfinden, die zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit und -steifigkeit der Wabenplatten senkrecht zur Plattenebene (vgl. Abbildung 3, z-Richtung) führt. Durch den lokalen Einsatz verdichteter Wabenkerne im Bereich der lokalen Lasteinleitungsstellen sollen Schraubverbindungen mit hoher Verbindungsfestigkeit und -steifigkeit generiert werden. Der Effekt der Verdichtung auf die mechanischen Druckeigenschaften wird im einachsigen Druckversuch untersucht, wobei nachfolgend speziell auf die Druckfestigkeit eingegangen wird. Eine Betrachtung der Drucksteifigkeit soll in späteren Analysen folgen. Zur Untersuchung der Verbindungsfestigkeit und -steifigkeit von Schraubverbindungen in Sandwichelementen mit homogenen und verdichteten Wabenkernen werden Verschraubungsversuche durchgeführt und analysiert.

3 ANALYTISCHE VORBETRACHTUNG DES SINUSWABENFÖRMIGEN PAPPWERKSTOFFES

Sinuswabenförmige Pappwerkstoffe sind aus Pappe gefertigte Wabenkernwerkstoffe mit homogener Sinuswellenstruktur. Pappebahnen mit hohem Feuchtigkeitsgehalt werden durch beheizte Rollenwalzen in Wellenform gebracht und mit einer geraden Pappebahn, welche als Steg fungiert, verklebt. Durch Trocknung des Materials wird die Formbeständigkeit erreicht [5]. Die mechanischen Eigenschaften sinuswabenförmiger Pappwerkstoffe sind durch die Dichte der verwendeten Pappe (hier: WST 90; SWAP Sachsen GmbH) sowie der Werkstoffdichte einstellbar. Die Werkstoffdichte ist durch das Verhältnis aus Pappe zum Gesamtvolumen einer Platte gekennzeichnet. Sie ist über die Porosität (Luftanteil einer Platte; Hohlräume) bzw. die Wellenteilung (Größe der Rollenwalzen) einstellbar und gibt an, wie hoch der Anteil der Pappe am Gesamtvolumen einer Platte ist.

Da sinuswabenförmige Pappwerkstoffe praktisch kaum direkte Anwendung in tragenden Strukturen finden, sind Werkstoffe mit kleiner Wellenteilung in der Regel nur als teure Sonderlösung verfügbar. Deshalb soll eine Erhöhung der mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Druckfestigkeit senkrecht zur Plattenmittelebene, durch eine Verdichtung sinuswabenförmiger Pappwerkstoffe mit großer Wellenteilung in den Richtungen parallel zur Plattenmittelebene erreicht werden. Das bedeutet, dass im Vergleich zu unverdichteten Pappwerkstoffen mehr Material zur Aufnahme der lokalen Belastungen verwendet wird. Im Vorfeld der Untersuchungen werden einige geometrische Festlegungen getroffen, die für die weiteren analytischen Betrachtungen des sinuswabenförmigen Pappwerkstoffs relevant sind.

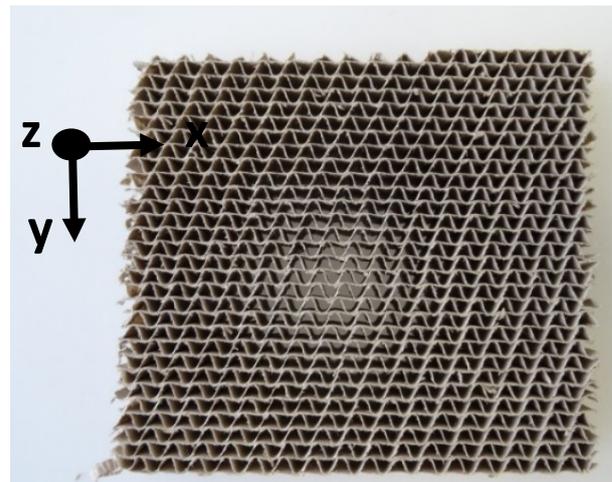


Abbildung 3. Ansicht von oben (z-Richtung, senkrecht zur Plattenebene = x-y Ebene) auf den unverdichteten, homogenen sinuswabenförmigen Pappwerkstoff

Entsprechend Abbildung 3 wird für die Untersuchungen ein kartesisches Koordinatensystem eingeführt, welches die 3 Hauptrichtungen des sinuswabenförmigen

Pappwerkstoffs definiert. Als Länge L wird die Abmessung einer Platte in x-Richtung definiert, analog dazu die Breite B in y-Richtung. Die Höhe H beschreibt die Abmessung in z-Richtung. Weitere wichtige geometrische Parameter sind die Dicke der Pappebahn t_p , der Abstand zwischen zwei Stegen t_s , der Winkel α zwischen Steg und Wellenschenkel sowie die Periodendauer T als Abstand zwischen zwei Wellenbergen bzw. -tälern. Die geometrischen Kennwerte des im vorliegenden Fall untersuchten sinuswabenförmigen Pappwerkstoffs WST 90 der Firma SWAP Sachsen GmbH sind in Abbildung 4 und Tabelle 1 dargestellt.

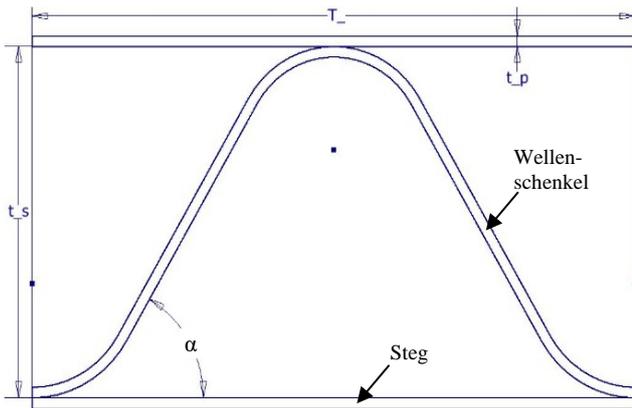


Abbildung 4. Geometrie und Parameter einer Welle innerhalb des homogenen sinuswabenförmigen Pappwerkstoffes

Parameter	Pappwerkstoff WST 90
Stegabstand t_s /mm	5
Pappe Dicke t_p /mm	0,15
Wellenabstand T /mm	9
Winkel α /°	60

Tabelle 1. Geometrische Parameter des homogenen sinuswabenförmigen Pappwerkstoffes

Da es sich bei dem sinuswabenförmigen Pappwerkstoff um einen homogenen Kern mit sich ständig wiederholenden Elementen (Wellen, Stege) handelt, ist die Berechnung des Pappeanteils Φ_{Pappe} über das Volumen einer Platte möglich. Der Pappeanteil stellt das Verhältnis aus dem Volumen der Pappe V_{Pappe} und dem Gesamtvolumen der Plattenabmessungen V_{Platte} dar:

$$\Phi_{\text{Pappe}} = \frac{V_{\text{Pappe}}}{V_{\text{Platte}}} * 100 \% \quad (1)$$

Mithilfe der in Tabelle 1 angegebenen geometrischen Parameter und der Anzahl der Stege n_s und Wellen n_w ist die Ermittlung des Volumens der Pappe mit folgender Formel möglich:

$$V_{\text{Pappe}} = n_w * A_w * H + n_s * t_p * L * H \quad (2)$$

n_w – Anzahl aller Wellen einer Platte

n_s – Anzahl aller Stege einer Platte
 A_w – Fläche einer Welle
 t_p – Dicke der Pappebahn
 H, L – Höhe, Länge der Platte

Die Fläche einer Welle A_w wurde mithilfe eines CAD-Programms bestimmt und beträgt 2,095 mm². Die Berechnung des Pappeanteils der hier verwendeten homogenen Pappwerkstoffe ergab ein Volumenanteil von 7,7% (Porosität 92,3%). Das Volumen einer Wabenplatte setzt sich aus 7,7% Pappe und 92,3 % Hohlraum zusammen.

4 MODIFIZIERUNG DES SINUSWABENFÖRMIGEN PAPPWERKSTOFFES DURCH VERDICHTUNG

4.1 FRAGESTELLUNG UND VERSUCHSAUFBAU ZUR VERDICHTUNG

Die Versuche zur Verdichtung des sinuswabenförmigen Pappwerkstoffes sollten folgende Fragen klären:

- Kommt es zum Abreißen der Pappbahnen?
- Welche Werkstoffdichten sind möglich bzw. technisch sinnvoll?
- Werden reproduzierbare Ergebnisse erzielt?
- Welche Richtung (x, y, oder beide) ist für eine Verdichtung vorteilhaft?

Mittels einer Vorrichtung wurde die Verdichtung der sinuswabenförmigen Pappwerkstoffe in x-Richtung (parallel zum Verlauf der Stege), in y-Richtung (senkrecht zum Verlauf der Stege) und in beide Richtungen durchgeführt (vgl. Abbildung 3). Es wurden verschiedene Richtungen für die Verdichtung untersucht, da der sinuswabenförmige Pappwerkstoff anisotrope Eigenschaften besitzt. So sind beispielsweise die Biegeeigenschaften in Stegrichtung (x-Richtung) größer als in y-Richtung. Ebenso sind die Druckeigenschaften in x- und y-Richtung unterschiedlich. Der prinzipielle Versuchsaufbau für die Verdichtung ist in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5. Versuchsaufbau zur Verdichtung des sinuswabenförmigen Pappwerkstoffes

Als Ausgangsmaß wurde 500 mm x 150 mm und als Zielgeometrie 150 mm x 150 mm festgesetzt. Während der Verdichtung verringert sich das Volumen der Platte

V_{Platte} , das Volumen der Pappe V_{Pappe} bleibt konstant. Mit Hilfe von Gleichung (1) kann der Pappeanteil vor und nach der Verdichtung berechnet werden. Das Verhältnis der Pappeanteile vor und nach der Verdichtung ergibt den Erhöhungsfaktor. Durch die Verdichtung erhöht sich der Pappeanteil von 7,7 % um den Faktor 3,33 auf $\Phi_{\text{PW}} = 25,64$ %. Für die Verdichtung in 2 Richtungen wurde die Probengröße 300 mm x 300 mm gewählt, was einer Erhöhung des Pappeanteils um den Faktor 4 auf $\Phi_{\text{PW}} = 30,82$ % entspricht.

4.2 BEWERTUNG DER VERDICHTETEN STRUKTUREN

Eine Bewertung der Ergebnisse der einzelnen Verdichtungsrichtungen erfolgte hinsichtlich folgender Gesichtspunkte:

- Homogenität: Wie homogen ist die Struktur nach der Verdichtung in der x-y-Ebene?
- Versagen: Reißen die verklebten Pappbahnen während der Verdichtung voneinander ab?
- Durchführbarkeit: Wie gut ist der Prozess beherrschbar?
- Reproduzierbarkeit: Sind die verdichteten Strukturen reproduzierbar?
- Materialeffizienz: Wie viel Material ist für eine homogene Verdichtungsstruktur nötig?

4.3 ERGEBNISSE DER VERDICHTUNGSVERSUCHE

Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Verdichtungsversuche in y-Richtung (oben), in x-Richtung (mitte) und in beide Richtungen (unten). Grundsätzlich beginnt der Werkstoff während der Verdichtung an einer willkürlichen Stelle einzuknicken. Bei steigendem Verfahrensweg setzt sich das Einknicken in den angrenzenden Bereichen fort, bis sich eine relativ homogene Struktur über die gesamte Platte einstellt. Es hat sich gezeigt, dass eine Verdichtung um mindestens den Faktor 3 notwendig ist, um eine ausreichende Verdichtung mit annähernd homogener Struktur zu erzeugen. Geringere Verdichtungen besaßen stets noch unverdichtete Bereiche. Die Versuche haben weiterhin gezeigt, dass eine Verdichtung der sinuswabenförmigen Pappwerkstoffe grundsätzlich in allen Richtungen möglich ist. Beschädigungen in Form von Abreißen der Pappebahnen sind an keiner Probe aufgetreten. Bei einer Verdichtung in x-Richtung sind die Proben vergleichsweise homogen gestaucht. Eine Verdichtung in y-Richtung und in beide Richtungen erzeugte stets lokale Bereiche mit höherer (blaue Kreise in Abbildung 6) bzw. geringerer (grüne Kreise in Abbildung 6) Verdichtung innerhalb der Probe. Aufgrund der geringeren Druckfestigkeit in y-Richtung war die Verdichtung in y-Richtung mit einem geringeren Kraftaufwand verbunden als die Verdichtung in x-Richtung. Eine Verdichtung in beide Richtungen erforderte den höchsten Kraftaufwand und war daher am schwierigsten durchzuführen. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die in Abbildung 6

dargestellten Strukturen innerhalb der einzelnen Chargen wiederkehrten, sodass eine relative Reproduzierbarkeit vorhanden ist. Lediglich bei der Verdichtung in y-Richtung und in x-y-Richtung kann nicht vorhergesagt werden, an welchen Stellen höher bzw. geringer verdichtete Bereiche auftreten.

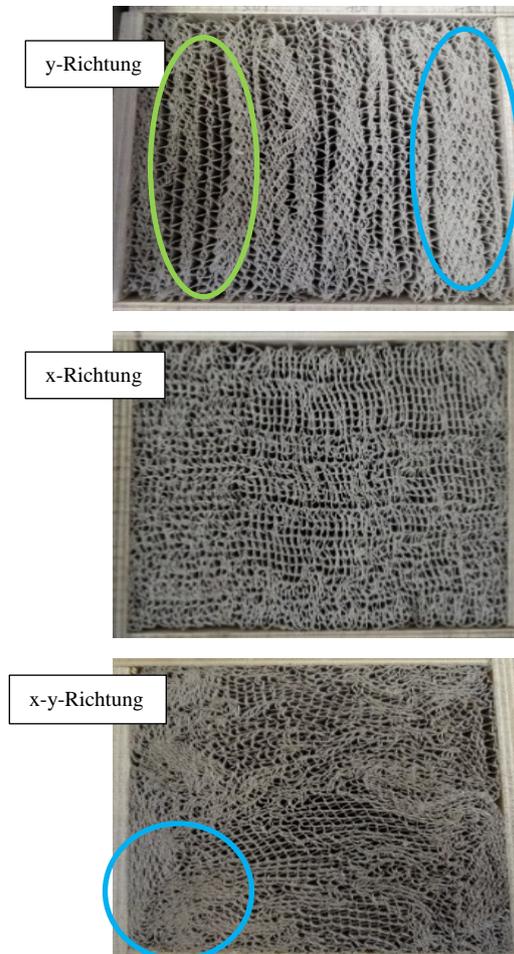


Abbildung 6. Ergebnisse der Verdichtungsversuche; oben: x-Richtung, mitte: y-Richtung, unten: beide Richtungen

5 DRUCKFESTIGKEIT UN- / VERDICHTETER SINUSWABENFÖRMIGER PAPPWERKSTOFFE SENKRECHT ZUR PLATTENEbene

5.1 VERSUCHSAUFBAU UND PROBEN

Im ersten Schritt wurde die mechanische Druckfestigkeit senkrecht zur Plattenebene homogener und verdichteter Proben im einachsigen Druckversuche mit Aufbau nach Abbildung 7 ermittelt. Dabei wurden jeweils 5 Proben pro Zustand (homogen, verdichtet) und Werkstoffhöhe (20 - 50 mm) über einen Druckteller mit Kreisquerschnitt (Durchmesser 108 mm) belastet. Da in Kapitel 4 festgestellt wurde, dass eine Verdichtung in beide Richtungen Nachteile in der Herstellung hat, wurden keine x-y-verdichteten Proben untersucht. Die Versuche

wurden an einer Prüfmaschine Zwick/Roell Z250 durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit wurde auf 10 mm/min festgesetzt. Die Prüfkörper waren vor der Untersuchung im Normklima gelagert. Unmittelbar nach den Versuchen wurde der Feuchtegehalt der Proben durch Trocknung und Ermittlung der Massedifferenz bestimmt [6]. Im Mittel hat sich ein Feuchtegehalt der Proben von 9,45 % (STABW = 0,32; VAR = 0,09) ergeben. Ein Rahmen aus Birkenperrholz fixierte die Verdichtung der Probekörper. Die Probenkennung beinhaltet den Zustand und die Höhe der Probe:

HOM_H20 = Zustand (homogen, verdichtet)_Höhe

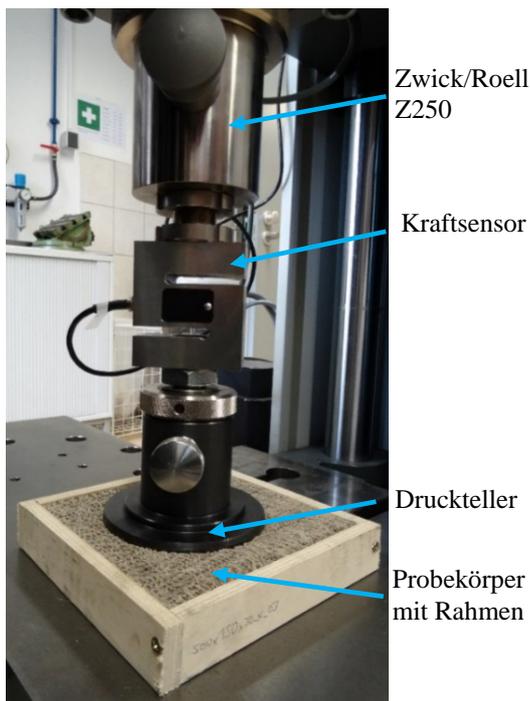


Abbildung 7. Versuchsaufbau zur Ermittlung des Kraft-Verformungsverlaufs verdichteter sinuswabenförmiger Pappwerkstoffe

5.2 KRAFT-VERFORMUNGS-KURVE UND ABLEITUNG DER DRUCKFESTIGKEIT

Abbildung 8 zeigt den charakteristischen Kurvenverlauf eines Druckversuches an einem homogenen Pappwerkstoff der Höhe 50 mm. Der Kurvenverlauf lässt sich in 3 Bereiche einteilen. Im ersten Bereich ist ein annähernd linearer Verlauf der Kurve zu sehen (vgl. Abbildung 8 grüne Strichlinie). Der Anstieg der Kurve in diesem Bereich beschreibt die Materialsteifigkeit, die in späteren Untersuchungen näher analysiert werden soll. Im zweiten Bereich wird die Kurve bis zur Maximalkraft flacher und fällt anschließend ab. Im dritten Bereich stellt sich ein annähernd konstanter Verlauf der Kurve ein. Es kommt nicht zum kompletten Versagen des Werkstoffes. Er wird mit steigender Verformung mehr zusammenge-

presst und besitzt eine gewisse Restfestigkeit in z-Richtung.

Die Druckfestigkeit berechnet sich entsprechend [7]:

$$\sigma_{Druck} = \frac{F_{max}}{A_{Druckteller}} \quad (3)$$

Da die maximal gemessene Druckkraft F_{max_a} den Wendepunkt der Kurve darstellt (vgl. Abbildung 8, Kreuz), sollte in praktischen Anwendungen ein Überschreiten des Maximalpunktes vermieden werden. Um dem vorzubeugen, wurde in der Auswertung als Maximalkraft F_{max_b} eine Kraft möglichst nah dem linearen Bereich der Kurve gewählt.

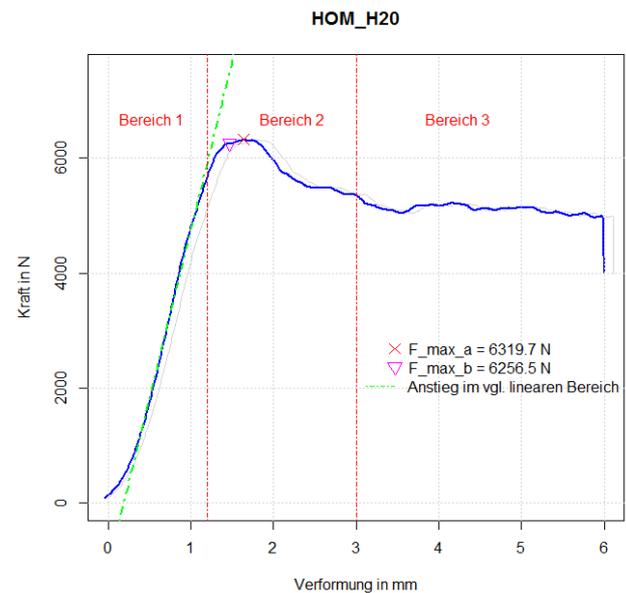


Abbildung 8. Charakteristische Kraft-Verformungs-Kurve eines Druckversuchs von sinuswabenförmigen Pappwerkstoffen

5.3 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der Druckfestigkeit von unverdichteten und verdichteten Pappwerkstoffen geordnet nach dem Zustand der Probekörper (unverdichtet, Verdichtung in x-Richtung, Verdichtung in y-Richtung) für verschiedene Höhen. Es wird zunächst sichtbar, dass grundsätzlich kein erkennbarer Einfluss der Höhe der Pappwerkstoffe auf deren Druckfestigkeit herrscht. Der Mittelwert der Druckfestigkeit unverdichteter Pappwerkstoffe lag bei $0,75 \text{ N/mm}^2$ (Standardabweichung STABW = 0,01; Varianz VAR = 0,01). Werden die in x- und y-Richtung verdichteten Proben separat analysiert, resultiert für die in x-Richtung verdichteten Pappwerkstoffe ein Mittelwert für die Druckfestigkeit von $2,71 \text{ N/mm}^2$ (STABW = 0,61; VAR = 0,21) und für die in y-Richtung verdichteten Pappwerkstoffe ein Mittelwert von $2,31 \text{ N/mm}^2$ (STABW = 0,47; VAR = 0,21). Es kann eine größere Streuung in den Kennwerten der verdichteten im Vergleich zu unverdichteten Pappwerkstoffen festgestellt

werden. Dies ist erkennbar an den größeren Boxplots im Vergleich zu den Boxplots der unverdichteten Proben. Dagegen kann pauschal keine Abhängigkeit zwischen der Streuung der Druckfestigkeit und der Höhe der Probekörper festgestellt werden. Für die verdichteten Probekörper in x-Richtung resultieren für eine Probenhöhe von 40 mm (Messgruppe X_H40) deutlich höhere Werte. Für die in y-Richtung verdichteten Probekörper resultieren für die Probenhöhe von 20 mm (Messgruppe Y_H20) die niedrigsten Werte für die Verdichtung in x- und y-Richtung. Beide Messgruppen können von den anderen Messgruppen statistisch unterschieden werden. Bisher wurde für diese Unterschiede noch keine Erklärung gefunden. Die

anderen Messgruppen der verdichteten Proben liefern statistisch gleiche Ergebnisse. Wird aus allen acht Messgruppen für die Verdichtung in x- und y-Richtung der Mittelwert gebildet, resultiert eine mittlere Druckfestigkeit von 2,51 N/mm² (STABW = 0,57; VAR = 0,32). Das Verhältnis der Druckfestigkeiten verdichteter und unverdichteter Probekörper beträgt 3,35. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, beträgt der Verdichtungsgrad der verdichteten Probekörper 3,33. Im Mittel zeigen die Versuche, dass zwischen der Druckfestigkeit und dem Verdichtungsgrad sinuswabenförmiger Pappwerkstoffe ein direkter Zusammenhang besteht, der vermutlich linear ist.

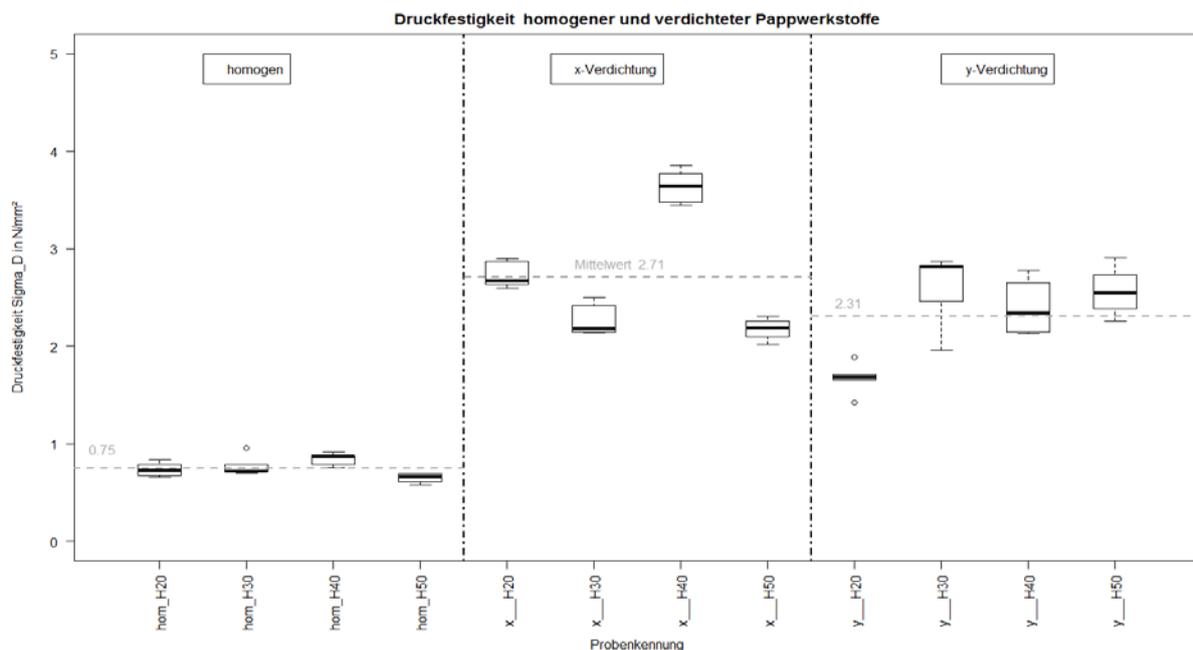


Abbildung 9. Boxplots der ermittelten Druckfestigkeit homogener und verdichteter sinuswabenförmiger Pappwerkstoffe

5.4 VERFORMUNGSVERHALTEN

Zur Untersuchung des Verformungsverhaltens wurden geprüfte Probekörper mittig aufgetrennt und mittels Mikroskopie analysiert. Abbildung 10 (unverdichtet) und Abbildung 11 (verdichtet) zeigen, dass die sinuswabenförmigen Pappwerkstoffe beginnend an der Kontaktstelle zum Druckstempel durch Knicken Versagen. Mit steigendem Verfahrensweg des Druckstempels wird der Werkstoff von oben nach unten immer stärker zusammengefaltet, was einer Verdichtung des Pappwerkstoffes in z-Richtung gleichkommt. Die unteren Bereiche des Werkstoffes sind zunächst nicht betroffen. Dadurch bleibt eine langsam sinkende Restfestigkeit erhalten, erkennbar durch den in Abbildung 8 stetig kleiner werdenden Abfall der Kurve nach Erreichung der Maximalkraft. Die minimale Restfestigkeit wird bei vollständigem Zusammenfallen des Werkstoffes erreicht. Aktuell sind die elastischen und plastischen Verformungsanteile des zusammengefalteten Pappwerkstoffes noch nicht geklärt.



Abbildung 10. Verformungsverhalten eines unverdichteten Pappwerkstoffes hom_H20 (Mikroskopie)

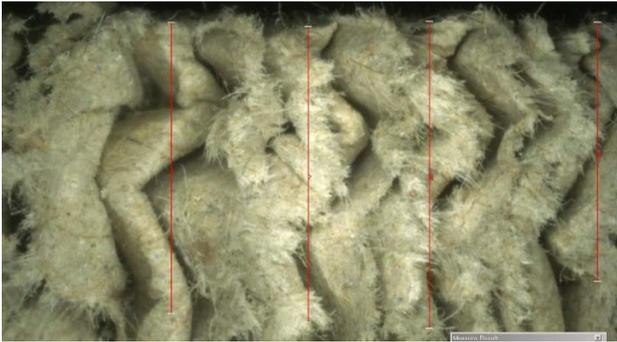


Abbildung 11. Verformungsverhalten einer verdichteten Probe der Probenreihe x_H40 (Mikroskopie)

6 SCHRAUBVERBINDUNGEN IN SANDWICHVERBUNDEN MIT UN-/ VERDICHTETEN KERNWERKSTOFFEN

6.1 VERSUCHSAUFBAU UND PROBEN

Für die Untersuchung von Schraubverbindungen in Sandwichelementen wurden jeweils 5 Proben mit unverdichtetem und in x-Richtung verdichtetem Kernelement (Höhe 30 mm) der Abmessungen 100 mm x 100 mm in einer Einspannvorrichtung positioniert. Als Deckschichten wurde 12 mm dickes Birkenesperrholz verwendet. Für die Schraubengröße wurde M6 mit der Festigkeitsklasse 8.8 gewählt. Unterlegscheiben für Holzwerkstoffe nach DIN 440 sorgten für die Krafteinleitung in den Verbund. Die Verschraubung wurde mittels eines Verschraubungsprüfstandes Bosch Rexroth Schraubsystem 350 und Ringkraftsensor PACEline CFW 20 kN der Firma HBM an der TU Chemnitz durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 12 dargestellt.

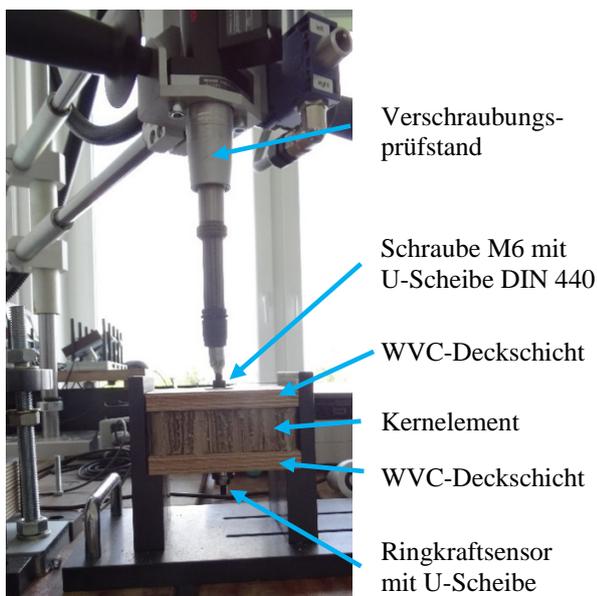


Abbildung 12. Versuchsaufbau zur Untersuchung von Schraubverbindungen in Sandwichelementen

6.2 BESTIMMUNG DER SCHRAUBENVORSPANNKRAFT UND VERFORMUNG

Das Ziel der Untersuchung war das Einbringen einer gleitfest vorgespannten Schraubverbindung in Sandwichelemente mit WVC-Deckschichten und un-/ verdichteten Schraubverbindungen. Dafür müssen die gewählten Schrauben (M6, 8.8) entsprechend [8] bei einem angenommenen Reibwert von 0,2 mit einer Vorspannkraft von 9 kN gespannt werden. Während des Spannvorgangs wurde der Verlauf der Schraubenvorspannkraft in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeichnet. Wurde die 9 kN Kraftgrenze erreicht, beendete die Prüfeinrichtung das Spannen automatisch. Wurde die Kraftgrenze nicht erreicht, obwohl bereits unzulässig starke Verformungen des Sandwiches auftraten, wurde der Versuch manuell beendet.

Das zweite Bewertungskriterium betrifft die Maßhaltigkeit in z-Richtung, d.h. die Dicke des Pappwerkstoffs darf durch die Vorspannkraft der Schraube keine unzulässig große Änderung aufweisen. Als Verformungsgrenze wurde 1 % der Probendicke festgelegt, was bei einer Dicke von 54 mm eine zulässige Verformung bis 0,54 mm bedeutet. Zur Ermittlung der Verformung wurde entsprechend Abbildung 13 die Dicke der Sandwichelemente vor und nach dem Anziehen der Schraube mittels Messschieber an 4 Punkten bestimmt und die Differenz gebildet.

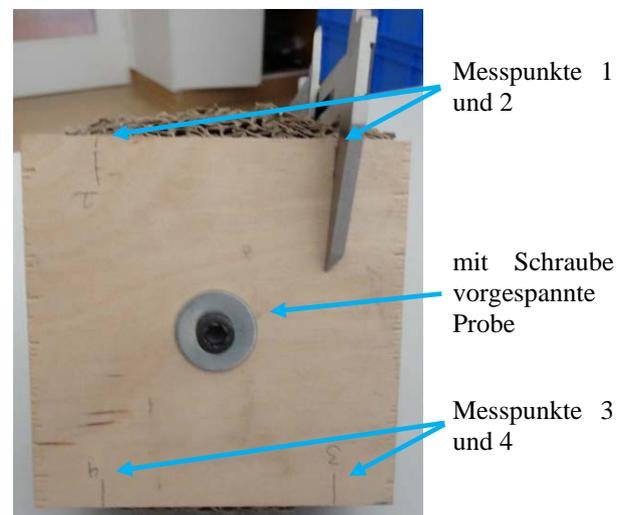


Abbildung 13. Messprinzip zur Bestimmung der Dicke der un-/ verschraubten Sandwichelemente

6.3 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

Tabelle 2 zeigt die gemessene maximale Schraubenvorspannkraft und den Wertebereich der Verformung der Sandwichelemente für unverdichtete und verdichtete Kernwerkstoffe.

	HOMOGEN		VERDICHTET (in x-Richtung)	
	Maximale Vorspannkraft in kN	Verformung in mm	Maximale Vorspannkraft in kN	Verformung in mm
Versuch 1	8,65	2,4 - 5,4	9	0,2 - 0,3
Versuch 2	8,49	1 - 1,5	9	0,2 - 0,3
Versuch 3	8,32	0,9 - 1,2	9	0,2 - 0,4
Versuch 4	9	1,9 - 4,7	9	0,2 - 0,3
Versuch 5	9,03	1 - 1,8	9	0,2 - 0,4

Tabelle 2. Ergebnisse der Messung der Schraubenvorspannkraft und Verformung der Dicke der Sandwichelemente

Während der Schraubversuche mit unverdichtetem Pappwabenkern wurde die erforderliche Vorspannkraft teilweise nicht erreicht. Die Verbindungen konnten nicht gleitfest vorgespannt werden und somit das erste Bewertungskriterium nicht immer erfüllen. An jeder Probe wurde eine unzulässig große Verformung der unverdichteten Wabenkerne festgestellt, welche in der Regel bereits vor Erreichung der maximalen Vorspannkraft eintrat. Sobald der Pappwerkstoff einzuknicken begann, versagte die Verbindung, da keine steigende Kraftaufnahme mehr möglich war. Der Wabenkern faltete sich, wie in Abbildung 14 zu sehen ist, ungleichmäßig zusammen, was zu einer deutlichen Schrägstellung der Deckschichten führte. Der homogene Pappwerkstoff besitzt demnach keine ausreichende Druckfestigkeit, um eine gleitfest vorgespannte Schraubverbindung ohne Zusatzelemente zur gleichmäßigen Lastverteilung zu generieren.



Abbildung 14. Verformtes Sandwichelement mit homogenem Kern durch das Anziehen der Schraubverbindung

Die verdichteten Wabenkerne zeigten aufgrund der gesteigerten Druckfestigkeit und -steifigkeit ein deutlich besseres Materialverhalten. Bei jeder Probe wurde die angestrebte Vorspannkraft erreicht. Dabei konnte bereits während und nach den Versuchen optisch bei keiner Probe Verformungen festgestellt werden, wie in Abbildung 15 zu sehen ist. Die Messung der Dicke der Sandwichelemente ergab eine Verformung zwischen 0,2 – 0,4 mm mit vorgespannter Schraube gegenüber dem ungespannten Zustand, d.h. auch die Verformungsgrenze wurde eingehalten. Die Verdichtung des Wabenkerns und somit die Erhöhung der Druckfestigkeit hat dazu geführt, dass gleitfest vorgespannte Schraubverbindungen der Festigkeitsklasse 8.8 in Sandwichelementen aus Holz- und Pappwerkstoffen eingebracht werden können. Schrauben mit einer geringeren Festigkeitsklasse als 8.8 benötigen eine geringere Vorspannkraft und können ebenfalls vorgespannt werden. Es muss noch untersucht werden, ob Schrauben mit höherer Festigkeitsklasse in Sandwichelementen aus Holz- und Pappwerkstoffen eingebracht werden können.



Abbildung 15. Sandwichelement mit in x-Richtung verdichtetem Kern und vorgespannter Schraubverbindung (9 kN)

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einsatz verdichteter sinuswabenförmiger Pappwerkstoffe als Kernelement in Sandwichstrukturen gleitfest vorgespannte Schraubverbindungen bis zu einer Festigkeitsklasse von 8.8 zulässt. Es hat sich gezeigt, dass eine Verdichtung der sinuswabenförmigen Pappwerkstoffe in x-Richtung die homogensten Strukturen erzeugt und somit die Vorzugsvariante für die Verstärkung von Fugestellen darstellt. Dagegen war die Verdichtung in y-Richtung am einfachsten durchführbar. Je nach Anwendungsfall kann eine der beiden Varianten gewählt werden. Eine Verdichtung in beide Richtungen hat sich aufgrund der schwierigen Durchführbarkeit und der Inhomogenität als nicht vorteilhaft herausgestellt.

In Druckversuchen konnte eine Erhöhung der Druckfestigkeit verdichteter Pappwerkstoffe gegenüber unverdichteten Pappwerkstoffen um den Faktor des Verdichtungsgrades festgestellt werden. Schraubversuche an Sandwichelementen haben belegt, dass verdichtete Kernwerkstoffe ein reduziertes Verformungsverhalten zeigten.

LITERATUR

- [1] Anwendungen von Sandwichplatten mit sinuswabenförmigen Pappwerkstoffen; SWAP Sachsen GmbH; unter: <http://www.swap-sachsen.de/> Stand: 12.08.2016
- [2] Dissertation: „Entwicklung einer mechanischen Verbindungstechnik für Sandwichwerkstoffe“; Kempf, Alexander; Seite 16; 02.12.2004
- [3] Leichtbau mit Sinuswaben: Chancen für Handwerker und Industrie (1); Türschmann, Dr. Volker; Artikel aus: HK Holz- und Kunststoffverarbeitung; ISSN: 0947-6237
- [4] Roloff/ Matek Maschinenelemente; Muhs, Dieter et. al.; Vieweg Verlag; ISBN: 978-3-8348-0262-0
- [5] Wellpappe-Wissen: Zweiwellige Wellpappe; VDW – die Wellpappenindustrie; unter: <http://www.wellpappe-wissen.de/wissen/wellpappe/bauprinzip/zweiwellige-wellpappe.html>; Stand: 12.08.2016
- [6] DIN EN 322: Holzwerkstoffe Bestimmung des Feuchtegehaltes; Europäische Norm; August 1993
- [7] DIN 53291: Druckversuch senkrecht zur Deckschichtebene; Deutsche Norm; Februar 1982
- [8] VDI 2230, Part 1: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen, Zylindrische Einschraubenverbindungen; Seite 109; VDI-Richtlinie; Dezember 2014

Dipl.-Ing. Patrick Kluge, Technische Universität Chemnitz, Institut Fördertechnik und Kunststoffe, Professur Fördertechnik, Arbeitsgruppe Anwendung erneuerbarer Werkstoffe. Tätigkeiten:

- Konstruktion mit Holzwerkstoffen
- Berechnung tragender Holzstrukturen
- Untersuchungen an Sandwichelementen aus erneuerbaren Werkstoffen