

Biegeverhalten von Kernverbund-Systemen

DR.-ING. G. LANG, *Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) der Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany*

Kurzfassung

Die Grundlagen zur Berechnung der Spannungen und Durchbiegungen von Kernverbundwerkstoffen zeigen, dass bei nicht querkraftfreier Biegebeanspruchung im Kern Schubspannungen herrschen, die infolge der viskoelastischen Eigenschaften der am Verbund beteiligten Polymeren in Abhängigkeit von der Temperatur und der Belastungszeit das Biegeverhalten von Polyäthylen-Kernverbunden mit Aluminium-Belplankung beeinflussen. In den Kernwerkstoff eingemischte Zusatzstoffe bewirken, neben einer erhöhten Steifigkeit des Kernes selbst, ein günstigeres Biegeverhalten, wenn es mit dem Zusatzstoff gleichzeitig gelingt, die Festigkeit der Verklebung zwischen Deckschicht und Kern zu verbessern; der Einfluss der Herstellbedingungen auf die Verbundeigenschaften ist hierbei zu beachten.

Synopsis

The data for the calculation of tensions and bendings of sandwich structures show that in case of bending loads, which are not free from transverse forces, shearing stress occurs in the core, and this stress influences the bending properties of polyethylene compound cores provided with aluminum facings. This influence is due to the viscoelastic properties of the polymers participating in the compound, dependent on the temperature and the load duration. Additives mixed into the core material produce, besides increased rigidity of the core itself, a more favorable bending behavior provided it has been possible at the same time to improve the firmness of the adhesive effect between the plates and the core by means of the additive. In this case the influence of the production conditions must be taken into consideration.

AUFBAU VON KERNVERBUNDEN

Kernverbunde eignen sich besonders für Bauteile, die eine hohe Steifigkeit und Festigkeit bei geringem Gewicht aufweisen sollen. Von diesen Forderungen an Leichtbaukonstruktionen in der Luft- und Raumfahrt ausgehend, werden Kernverbunde in zunehmendem Masse im Fahrzeug-, Schiffs- und allgemeinen Maschinenbau sowie im Bauwesen angewendet. Aus der Literatur sind die unterschiedlichsten Bauprinzipien bekannt, die jedoch alle das Merkmal sandwichartig zusammengesetzter Schichten aufweisen. Im Beispiel der ebenen Platte besteht die tragende Wandung aus zwei Deckschichten, die über einen Stützkern, der für die Steifigkeit und Stabilität massgebend ist, miteinander verbunden sind. Die Werkstoffe für Deckschicht und Kern werden unter dem Gesichtspunkt möglichst niedriger Bauteilgewichte ausgewählt, d.h. die auf das jeweilige spezifische Gewicht bezogenen mechanischen Eigenschaftswerte sollen möglichst hoch sein.

Für die Deckschichten verwendet man bevorzugt Materialien hoher Festigkeit und als Kern vorwiegend Stoffe mit geringem spezifischem Gewicht. Hiermit gelingt es, mit einem hohen Verhältnis von Biegesteifigkeit zu Gewicht, das tragende Material im Hinblick auf die kritischen Belastungen für Stabilität und

Festigkeit optimal auszunutzen. Weitere Vorteile, die durch entsprechende Werkstoffkombinationen erzielt werden, sind die hohe Schall- und Wärmedämmung sowie die guten elektrischen Eigenschaften.

Im einzelnen werden für Deckschichten derzeit neben Sperrholz und Stahlblechen überwiegend Aluminiumbleche und zunehmend mit Glas-, Kohlenstoff- oder Borfasern verstärkte Duromere eingesetzt. Als Kernmaterialien eignen sich für die Kompaktbauweise (Bild 1) neben Naturstoffen wie Balsaholz oder Kork, Kunststoff-Hartschäume auf der Basis von Polyurethan, Polyvinylchlorid, Polystyrol, Polyester, Phenolharz, Polymethacrylimid u.a.

Waben, oder Kerne mit ähnlicher Struktur, können aus metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen bestehen, wobei neben Stahl bevorzugt Aluminium, phenolharzgetränktes Papier oder GFK verwendet werden. In Sonderfällen finden hochhitzebeständige Legierungen und keramische Werkstoffe Anwendung. Die Wabenkerne werden in vielfältigen Konfigurationen hergestellt; zumeist werden hexagonale Kernformen gewählt, wobei die Kerndichte zwischen 0,03 und 0,4 g/cm³ liegt. Einen Überblick der mechanischen Eigenschaften einiger handelsüblicher Kernwerkstoffe gibt Tafel I.

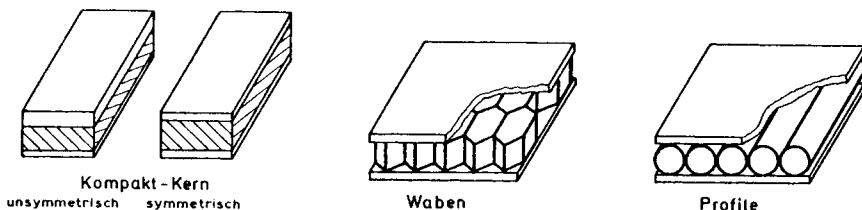


Bild 1. Bauprinzipien von Kernverbundwerkstoffen.

TAFEL I
Werkstoffkennwerte einiger Kernverbundkomponenten

Werkstoff	Dichte (kg/m ³)	Zug- festigkeit (kp/cm ²)	Druck- festigkeit (kp/cm ²)	Schubmodul (kp/mm ²)	Wärmeleit- fähigkeit (kcal/mh°C)
Deckschicht					
unleg. C-Stahl	7850	4500		8100	40
Al-Mn-Legierung	2750	1300		2700	140
GFK	1700	2040		990	0,4
Sperrholz, längs	900	700		100	0,25
Kern, kompakt					
LDPE	918	95		14,5	0,27
PUR-Schaum	40-100	3-11		0,3-1,6	0,02
PVC-Schaum	40-80	7-12		0,5-2,0	0,033
PMI-Schaum	40-70	4-14		ca. 4	—
PF-Schaum	40-100	2-6		—	0,025
Kern, Waben					
Al-Waben	80		32	44	—
GFK-Waben	80		56	17,2	—
Papier-Waben	50		20	16,5	—

HERSTELLVERFAHREN

Zur Herstellung von Kernverbundbauteilen sind verschiedene Fertigungsverfahren entwickelt worden. Häufig angewandte Fügeverfahren sind das Schweißen, Hartlöten und Kleben. Ausgehend von der in der Holztechnik seit langem bekannten Schichtbauweise, werden vorgefertigte Kerne und Deckschichten aus den verschiedensten Materialien zunehmend durch Kleben miteinander verbunden. Die Fertigungsparameter spielen beim Fügevorgang hinsichtlich der späteren Leistungsfähigkeit der Klebeverbindung eine entscheidende Rolle, da die Voraussetzungen für die Festigkeit, die Adhäsion des Klebstoffs an den Fügeteilen, die Kohäsion des Bindemittels und seine Verformbarkeit durch physikalische und chemische Vorgänge beim Herstellprozess der Klebfuge entstehen. Der Fertigungsablauf lässt sich in vier von einander unabhängige Arbeitsgänge unterteilen:

- (a) Vorbereiten der Füge Teile durch mechanische oder chemische Oberflächenvorbehandlung,
- (b) Vorbereiten der Klebstoffe (z.B. Mischen von Zweikomponenten-Klebern),
- (c) Klebstoffauftrag,
- (d) Zusammenfügen der Teile und Aushärten der Klebschicht.

Die heute auf dem Markt erhältlichen Klebstoffe ermöglichen in zahlreichen Fällen Verbindungen ausreichender Festigkeit. Als Klebstoffe werden zum grossen Teil duroplastische Kunstharze eingesetzt. Einkomponenten-Klebstoffe weisen den Vorteil auf, dass ein Mischvorgang entfällt. Sie erfordern jedoch einen relativ hohen apparativen Aufwand für Heiz- und Pressvorrichtungen. Zu diesen Bindemitteln zählen die häufig verwendeten Phenolharze oder einkomponentige Epoxidharze. Bei letzteren verläuft die Vernetzungsreaktion als Polyaddition ohne Abspaltung von Reaktionsprodukten, so dass ein Anpressdruck während der Aushärtung nicht notwendig ist, während sich bei Phenolharzen Kondensationsprodukte abspalten, die bei druckloser Fertigung zu Blasenbildung führen. Dagegen vernetzen kalthärtende Zweikomponenten-Epoxidharze auch bei Raumtemperatur, wenngleich eine erhöhte Temperatur auch hier die Aushärtung begünstigt.

Vorkonfektionierte Klebstoff-Folien ermöglichen eine einfache, kontinuierliche Fertigung. Für dieses Verfahren eignen sich auch die physikalisch härtenden, thermoplastischen Schmelzkleber, die bei erhöhter Temperatur ein viskoses Fliessen zeigen, in aufgeschmolzener Form appliziert werden und durch einfaches Abkühlen rasch erstarren.

In einem anderen Verfahren mit faserverstärkten Kunststoff-Deckschichten werden neben vorgefertigten Platten auch laminierte Deckschichten hergestellt, die anschliessend verpresst und gehärtet werden. Hiermit entfallen die Oberflächenvorbehandlung der Deckschichten und der Klebstoffauftrag. Schliesslich sei das Verfahren vorgefertigter Deckschichten mit eingeschäumtem Kern erwähnt. Bei dieser speziell für Polyurethanschäume entwickelten Methodik erfolgt die Kernherstellung sowie das Verkleben von Kern und Deckschichten in einem Arbeitsgang¹.

ALUMINIUM-POLYÄTHYLEN-KERNVERBUNDE (AL-PE-KERNVERBUNDE)

Zu den Verbundwerkstoffen mit Kompaktkern zählen die im folgenden behandelten Al-PE-Kernverbunde^{2,3}. Der Kernwerkstoff besteht aus einem handelsüblichen Hochdruck-Polyäthylen niedriger Dichte (LDPE—low-density polyethylene) mit stark verzweigten Molekülketten und als Beplankungsmaterial werden Bleche aus Al-Mn-Legierung in halbhartem Zustand nach DIN 17007 verwendet⁴, die eine Oberflächenvorbehandlung aufweisen⁵. Diese Kernverbunde besitzen neben den grundsätzlich gestellten Forderungen an diese Werkstoffe, den Vorteil der Verformbarkeit und der Anwendungsmöglichkeit verschiedener günstiger Verbindungsverfahren.

Die Schwierigkeit diese Verbundwerkstoffe herzustellen, liegt in der Verklebung des unpolaren Polyäthylens mit dem Aluminium, dessen natürliche Oxidhaut eine starke Polarität aufweist⁶. Erst mit Hilfe eines Schmelzklebers, der sowohl schwach als auch stark polare Seitengruppen enthält, gelang es auch bei kontinuierlicher Fertigung, eine relativ gute Festigkeit der Verbindung zwischen Metall und Kunststoff herzustellen. Dieser Schmelzklebstoff enthält neben dem Grundmonomeren Äthylen noch zwei Comonomere, Acrylsäure und Acrylsäureester, und stellt ein quaternäres Polymerisat dar⁷. Dabei bilden sich im Kernverbund zwischen den polaren Carboxylgruppen des Schmelzklebers und der hydratisierten Aluminiumoberfläche Wasserstoffbrückenbindungen, während die schwach polaren Seitengruppen des Esters die Adhäsion mit dem Kernwerkstoff verbessern, da die Kettenverzweigungen des Hochdruck-Polyäthylens ebenfalls eine schwache Polarität aufweisen. Die Festigkeit der Verklebung kann durch in den Kernwerkstoff eingemischte Zusatzstoffe verbessert werden⁸.

BEANSPRUCHUNG VON KERNVERBUNDEN

Durch äussere Kräfte können bei Schalenkonstruktionen parallel zur Wandebene Zug-, Druck- und Schubbelastungen und senkrecht zur Schalenebene Biegebelastungen auftreten. Druck- und Schubbeanspruchungen parallel zur Wandebene führen im Idealfall zu einem Bruch der Deckschichten. Ist die Festigkeit bzw. Steifigkeit des Kernwerkstoffs oder die Haftung zwischen Kern und Beplankung nicht ausreichend, können als Versagensursache Knicken der gesamten Wandung, Knittern (wobei zumeist beide Deckschichten in mehreren, kurzen Wellen ausknicken), Ausbeulen und Abschälen der Deckschicht vom Kern oder Aufreissen des Kerns beobachtet werden. Biegebeanspruchungen können Ablösungen zwischen Kern und Deckschicht sowie Schubbrüche im Kern selbst hervorufen.

Da sich Kernverbundwerkstoffe zumeist aus Werkstoffen mit unterschiedlichem thermischen Ausdehnungskoeffizienten zusammensetzen, sind auch innere Spannungen (Wärmespannungen) zu beachten.⁹⁻¹¹

Das Verhalten von Kernverbunden unter Querkraftbiegung kann im Biegeversuch untersucht werden. Diese wichtige Prüfung für Verbundbauteile bietet die Möglichkeit, die Biege- und Schubsteifigkeit des Verbundes sowie den Schubmodul und die Scherfestigkeit des Kernwerkstoffs zu bestimmen. Die Spannungsverteilung über dem Querschnitt eines Sandwichbalkens unterscheidet sich entsprechend der unterschiedlichen Elastizitätsmoduln von

Beplankungs- und Kernwerkstoff von der eines Biegebalkens mit homogenem Material (Bild 2).

Der in Bild 2 gezeigte Normalspannungsverlauf trifft unter folgenden Voraussetzungen zu:

(a) Das Hook'sche Gesetz gilt sowohl für den Beplankungs- als auch für den Kernwerkstoff.

(b) Die Querschnitte bleiben auch im verformten Zustand im wesentlichen eben.

(c) Die Festigkeit der Verklebung zwischen Kern und Deckschicht ist so hoch, dass die Dehnungen des Kerns und der Deckschicht an der Klebestelle einander gleichgesetzt werden können.

Die Normalspannungen werden vorwiegend von der Deckschicht aufgenommen. Diesen Normalspannungen sind Schubspannungen infolge von Querkraften überlagert, die im Fall eines Kunststoffkerns mit relativ geringem Schubmodul berücksichtigt werden müssen. Diese Schubbeanspruchung hat eine Schubverformung zur Folge, die nur beim homogenen Balken gegenüber der Verformung durch das Biegemoment vernachlässigt werden kann.

Für die Berechnung der im Biegeversuch mit Dreipunkt-Belastung ermittelbaren Kenngrößen für den Kern, die Deckschichten oder den Kernverbund legt man folgende Beziehungen zugrunde¹². Für die mittlere Normalspannung in der Deckschicht an der Balkenmitte

$$\sigma_{d,m} = \frac{F \cdot L}{2fb(h + c)} \quad (1)$$

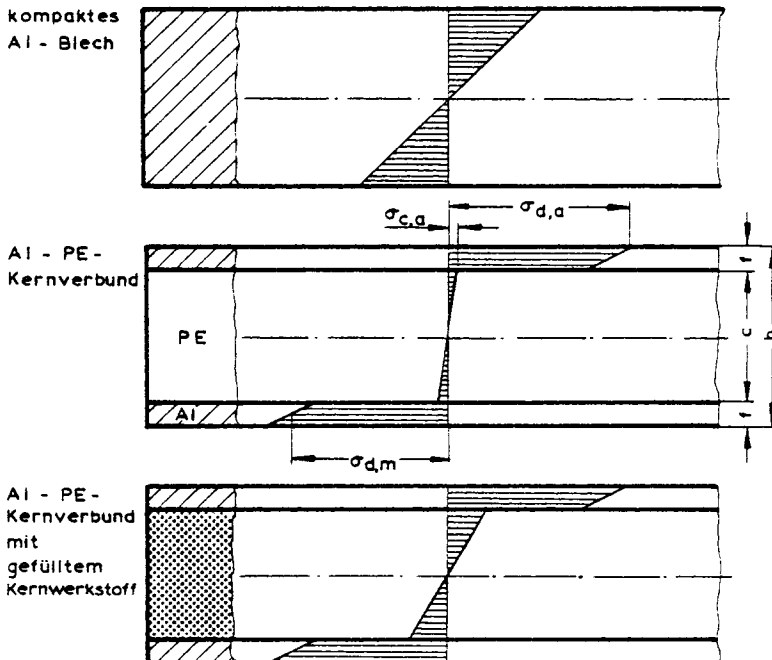


Bild 2. Schematische Darstellung der Spannungsverteilung bei elastischer Durchbiegung eines Balkens aus Al-Vollmaterial sowie als ausgebildeter Verbund mit Kompaktkern bei konstanter Last.

und für die maximale Schubspannung im Kern an der Balkenmitte

$$\tau_c = \frac{F}{b(h+c)} \quad (2)$$

Bei Kernverbunden mit Al-Bepunktung und einem duktilen Kunststoff als Kernmaterial kann die Biegesteifigkeit des Kerns ($B_c = E_c I_c$, $E_c = 22 \text{ kp/mm}^2$) wegen des kleineren Elastizitätsmoduls des Kernmaterials gegenüber der Biegesteifigkeit ($B_d = E_d I_d$, $E_d = 6900 \text{ kp/mm}^2$) der Deckschicht vernachlässigt werden, so dass mit guter Näherung B_c gegenüber B_d vernachlässigt werden kann. Damit gilt für die Biegesteifigkeit B_s des Kernverbunds

$$B_s = \frac{E_d \cdot I_d}{(1 - \mu_d^2)} = E_d \cdot b \cdot \frac{h^3 - c^3}{12(1 - \mu_d^2)} \approx E_d \frac{b \cdot f (c + f)^2}{2 (1 - \mu_d^2)} \quad (3)$$

Als Schubsteifigkeit definiert man das Verhältnis der Querkraft Q zu dem dabei auftretenden Scherwinkel γ :

$$S = Q/\gamma \quad (4)$$

Nach Plantema¹³ ergibt sich für den Scherwinkel γ_c unter der vereinfachenden Annahme ebener Querschnitte:

$$\gamma_c = \frac{c+f}{c} \gamma \quad (5)$$

Die Schubsteifigkeit S wird durch den Kernquerschnitt und den Kernschubmodul G_c bestimmt:

$$S = \alpha \cdot b \cdot c \cdot G_c \quad (6)$$

Der Faktor α berücksichtigt das Bepunktungsverhältnis f/c und kann durch Rechnung bestimmt werden. In der Literatur^{3,14-20} sind hierfür verschiedene Beziehungen angegeben. Die von Schick²¹ experimentell bestätigte und auch in der Norm ASTM C 393 verwendete Formel nach Plantema¹³ lautet:

$$\alpha = \frac{(c+f)^2}{c^2} \quad (7)$$

Für die Gesamtdurchbiegung des Kernverbundes in der Balkenmitte gilt beim Dreipunkt-Biegeversuch

$$w = w_b + w_s = \frac{F \cdot L^3}{48B_s} + \frac{F \cdot L}{4S} \quad (8)$$

wo w_b die Durchbiegung infolge reiner Biegebeanspruchung bedeutet und w_s die Durchbiegung infolge reiner Scherbeanspruchung.

Da sich der Anteil der Durchbiegung w_b durch das Biegemoment mit Gleichung (9) bei bekannter Last berechnen lässt, kann mit Hilfe der gemessenen Gesamtdurchbiegung w der Biegeanteil w_s durch die Schubwirkung der Querkraft nach Gleichung (8) bestimmt werden:

$$w_b = \frac{F \cdot L^3}{48B_s} \quad (9)$$

Somit lässt sich mit Gleichung (8) die Schubsteifigkeit S gemäss

$$S = \frac{F \cdot L}{4w_s} \quad (10)$$

und der Kernschubmodul nach folgender Gleichung bestimmen:

$$G_c = \frac{F \cdot L}{4b \cdot c(w - FL^3/48B_s)} \quad (11)$$

Die aus der Biegeverformung errechenbaren Schubmodulwerte des Kernmaterials hängen damit von der Durchbiegegeschwindigkeit \dot{w} bzw. von der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_c$ des Kernwerkstoffes ab. Um die Resultate mit anderen Versuchsergebnissen vergleichen zu können, muss die Schergeschwindigkeit bekannt sein, bzw. vor Versuchsbeginn festgelegt werden. Mit

$$F = \frac{w}{L^3/48B_s + L/4S} \quad (8a)$$

$$S = \frac{Q}{\gamma} \quad (4)$$

$$Q = \frac{F}{2} \quad (4a)$$

$$\gamma = \frac{\gamma_c \cdot c}{c + f} \quad (5)$$

$$\dot{\gamma}_c = \frac{d\gamma_c}{dt} \quad (12)$$

erhält man für das Beispiel der Dreipunkt-Belastung nach kurzer Rechnung:

$$\dot{\gamma}_c = \frac{2(c + f) \left(1 - \frac{L^2}{L^2 + 12 B_s/S}\right)}{L \cdot c} \dot{w} \quad (13)$$

Danach ist die Schergeschwindigkeit nicht nur von der Durchbiegegeschwindigkeit \dot{w} und den Probeabmessungen, sondern auch von der Schubsteifigkeit und damit vom Schubmodul des Kernwerkstoffes abhängig.

Der Einfluss der Stützweite bei Dreipunkt-Belastung ist in Bild 3 für eine Balkenbreite von $b = 20$ mm in Form der bezogenen Durchbiegung W mit der Dimension mm/kp dargestellt. Hieraus wird ersichtlich, dass sich die Schubsteifigkeit und der Schubmodul des Kernwerkstoffes sowie die Scherfestigkeit der Klebung bevorzugt im Biegeversuch bei kleinem Auflagerabstand, d.h. kleinem Biegeanteil w_b und hohem Scheranteil w_s , bestimmen lassen. Dabei müssen die Deckschichten genügend dick sein, um die durch die Belastung verursachten Spannungen und insbesondere die örtlichen Druckspannungen, die sehr hoch sind, aufnehmen zu können.

VERSUCHSMATERIAL

In den Tafeln II und III sind die für den Kernverbund verwendeten Werkstoffe zusammengestellt. Die Herstellung und die Eigenschaften der ausgewählten Polyäthylen-Kernwerkstoffe, denen Glas- und Asbestfasern sowie Glaskugeln in verschiedenen Gewichtskonzentrationen zugemischt waren, sind in Lang²² beschrieben.

Zur Herstellung der Kernverbunde im diskontinuierlichen Verfahren wurden die gereinigten, lose übereinander gelegten Schichten (Bild 4) in einer Presse 40 s unter einem Druck von $0,7$ kp/cm² bei einer Temperatur von 180°C verpresst

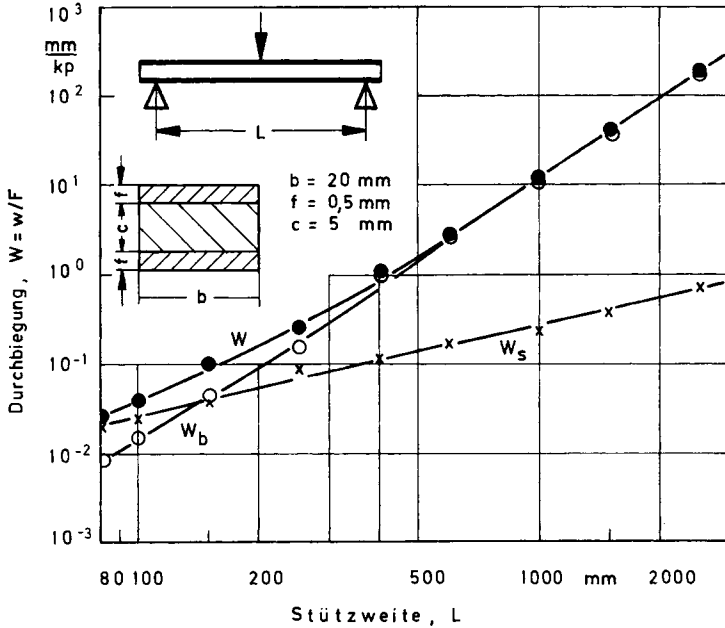


Bild 3. Rechnerisch ermittelte Biegeverformung von Verbundhalbzeug mit Al-Mn-Belplankung in Abhängigkeit von der Stützweite bei Dreipunkt-Belastung.

und in der Presse unter Druck bis auf Raumtemperatur abgekühlt. In der ersten Abkühlphase war der Pressdruck durch das seitliche Herausquellen des Kernwerkstoffs begrenzt; während des Abkühlvorganges, ca. 50 s nach Einleitung der Abkühlung, wurde der Druck auf 7,0 kp/cm² erhöht.

Die mechanischen Kennwerte des als Kernwerkstoff verwendeten LDPE werden durch die Abkühlgeschwindigkeit massgeblich bestimmt. Während der Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit auf die Dichte und damit den Kristallisationsgrad²³ bei dem vorliegenden Hochdruck-Polyäthylen, das einen Verzweigungsgrad von etwa 23 Methylgruppen pro 1000 Kohlenstoff-Atome aufwies, gegenüber linearem Poyläthylen (2 CH₃-Gruppen pro 1000 C-Atome) gemäss dem in Bild 5 dargestellten Dichteunterschied von 0,0025 g/cm³ gering erscheint, sind die mechanischen Eigenschaften stark von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig (Bild 6).

Diese Wechselwirkung ist bei der Herstellung des PE-Kernverbundes zu beachten. Der in Bild 7 dargestellte Verlauf der Temperatur über dem Plattenquerschnitt zeigt eine maximale Differenz des Temperaturgradienten ϑ von ca. 25 grad/min, so dass bei den verwendeten Kerndicken in guter Näherung ein einheitliches Festigkeitsniveau angenommen werden kann.

Die weiteren Pressparameter bei der Kernverbundherstellung — Temperatur, Zeit und Druck — werden durch die kristalline Struktur des Schmelzklebers, die Benetzung sowie den Ordnungszustand des Kernwerkstoffs bestimmt. Die

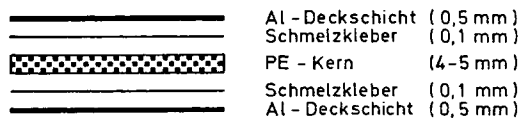


Bild 4. Schematischer Aufbau der Sandwichplatte.

TAFEL II
Eigenschaften der untersuchten Kernverbundkomponenten

Eigenschaften	Kernwerkstoff		Verbundkomponente		Deckschicht
	Hochdruck-Polyäthylen niedriger Dichte (LDPE) ^a		Schmelzkleber		
Art			Polimerisat aus Äthylen, Acrylsäure und -ester ^b		Aluminium-Mangan-Legierung, halbhart mit ca. 1,2% Mn
Abmessungen [mm] (ohne Platte)	250 × 250 × (3,5–4,2)		250 × 250 × 0,1		250 × 250 × 0,5
Schmelzindex MFI 190/2 [g/10 min]	1,2–1,7		6–8		—
Dichte [g/cm ³]	0,918–0,920		0,926–0,931		2,75
Schmelzpunkt [°C]	105–110		97–101		Liquidustemp. 654°C Solidustemp. 643°C
Elastizitätsmodul 20°C [kp/mm ²] (aus dem Biegeversuch)	12–14		7,4		6500–7000
Dy. Schubmodul, 20°C [kp/cm ²]	1500		750		—
Kugeldruckhärte H_{A60} [kp/cm ²]	160		97		—
Brinellhärte [kp/mm ²]	—		—		35–45
Wärmeleitzahl [cal/cm s grd]	7,5 × 10 ⁻⁴		—		0,4–0,5
Lin. Wärmeausdehnungskoeff. [1/grd]	200 × 10 ⁻⁶		—		24 × 10 ⁻⁶

^a Fa. BASF AG, Ludwigshafen (trade name: Lupolen 1800 H).

^b Fa. BASF AG, Ludwigshafen (trade name: Lupolen A 2910 MX).

TAFEL III
Verwendete Zusatzstoffe zur Verstärkung des Kernwerkstoffs aus LDPE

Grundwerkstoff: Hochdruck-Polyäthylen niederer Dichte (LDPE)			
Zusatzstoff	Glasfasern E-Glas	Glaskugeln A-Glas	Asbestfasern Chrysotil
Chemische Zusammensetzung [%]			
SiO ₂	54,5	72,5	39,0
Al ₂ O ₃	14,5	1,2	7,9
CaO	17,0	9,0	1,7
MgO	4,5	3,3	30,9
Na ₂ O + K ₂ O	0,5	13,8	
B ₂ O ₃	8,5		
Na ₂ O			0,1
Fe ₂ O ₃			4,2
FeO			3,1
CO ₂			0,98
Abmessungen			
mittl. Länge [mm]	0,2–0,3		1,4
Durchmesser [µm]	10	80	0,75–1,0
Haftvermittler	Silan-Basis	Silan-Basis sowie ohne Haftvermittler	Ohne Haft- vermittler
Hersteller	Fa. Vetrotex, Düsseldorf, Germany	Fa. Balloti- ni, Kirch- heimbolanden, Germany	Fa. Amiantafera di Balangero, Italy
Typ	ES-10-S	2429	P 400

gewählten Parameter stellen hinsichtlich des Festigkeitsniveaus der Verklebung im Rahmen der Fertigungsmöglichkeiten die optimalen Bedingungen dar.

Um den Füllstoffeinfluss auf die Festigkeit des Kernverbundes beurteilen zu können, wurde auf gleiche Bedingungen bei der Herstellung des Probenmaterials geachtet und die Werkstoffe sowohl für die Beplankung als auch den Schmelzkleber nicht verändert. Den derart hergestellten Verbundplatten, die ein Beplankungsverhältnis von Deckschicht zu Kern von $f/c = 0,14-0,12$ aufwiesen, wurden die Proben für den Kurzzeitversuch (entsprechend einer Stützweite von 80 mm des Biegegeräts von 20×100 mm) und den Kriechversuch (Stützweite 120 mm, 20×170 mm) entnommen.

KURZZEITVERHALTEN UNTER DREIPUNKT-BELASTUNG

Im Dreipunkt-Biegeversuch können experimentell die Schubsteifigkeit S , die Biegesteifigkeit B , der Formfaktor α sowie der Kernschubmodul bestimmt werden. Die folgenden Ergebnisse wurden aus Versuchen entsprechend der in ASTM C 393-62 gestellten Bedingungen gewonnen. Wegen der geringen Kompressibilität des Kernwerkstoffs konnte die Durchbiegung an der unteren Deckschicht des Sandwichbalkens gemessen werden und nicht, wie grundsätzlich richtig (aber auch schwieriger), in der neutralen Faser. Die Belastung erfolgte kontinuierlich mit konstanter Geschwindigkeit. Die Absinkgeschwindigkeit des Biegestempels wurde so gewählt, dass sich eine Schergeschwindigkeit von $\dot{\gamma}_c = 0,05-2 \text{ min}^{-1}$ ergab.

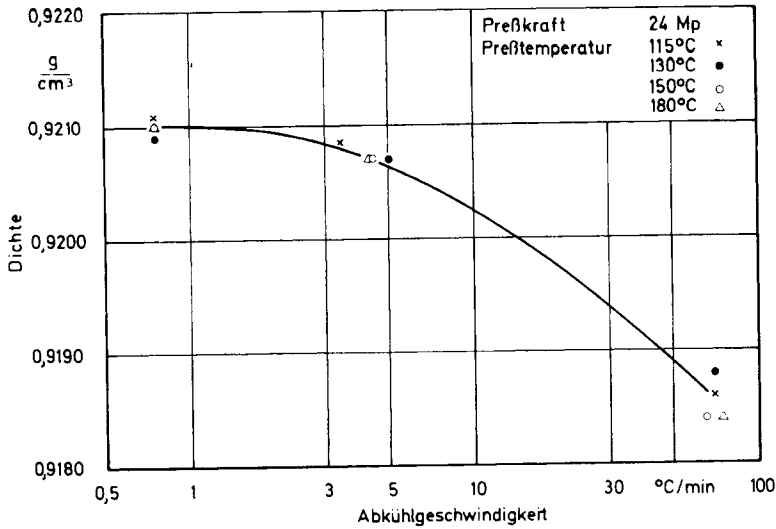


Bild 5. Dichte von LDPE in Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit und der Presstemperatur.

Der Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit auf die Kennwerte bei Raumtemperatur wird im Beispiel der Gesamtdurchbiegung w aus Bild 8 für den Al-PE-Kernverbund mit reinem Hochdruck-Polyäthylen als Kernwerkstoff ersichtlich. Zur vollständigen Charakterisierung wäre es aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften des Kernmaterials notwendig, die Versuche mit variiertem Verformungsgeschwindigkeit durchzuführen. Für eine Beurteilung des Füllstoffeinflusses auf das Biegeverhalten genügt es jedoch, den Einfluss der Zusatzstoffe bei einer Prüfgeschwindigkeit festzustellen.

Aus Bild 9 geht hervor, dass der Formfaktor α mit zunehmendem Beplankungsverhältnis ansteigt. Die Schubspannungen werden von den Deckschichten

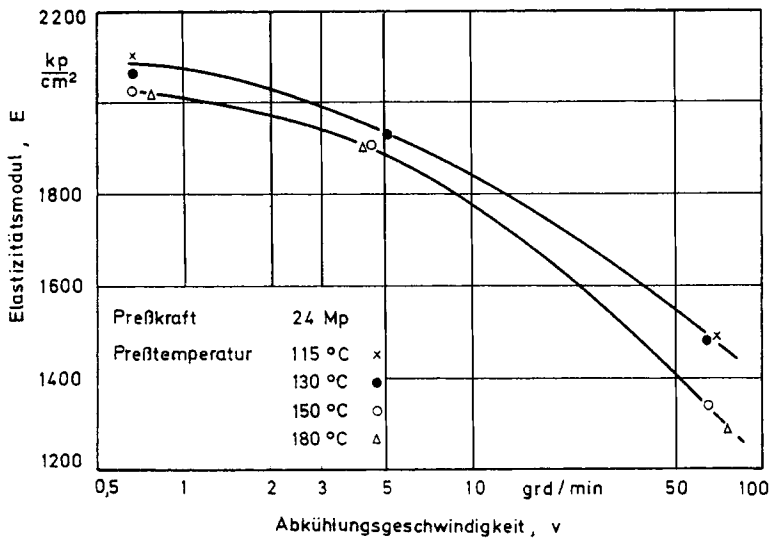


Bild 6. Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit und der Presstemperatur auf den Elastizitätsmodul von LDPE (Sekantenmodul bei 1% Dehnung im Zugversuch, $\dot{\epsilon} = 30\%/min$).

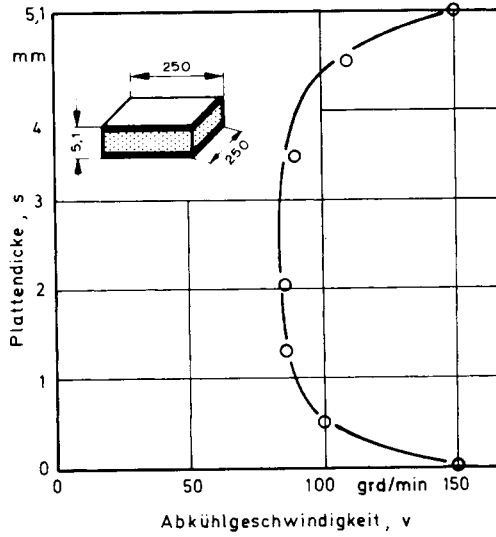


Bild 7. Verlauf der Abkühlgeschwindigkeit im Kern einer diskontinuierlich gefertigten AL-PE-Kernverbundplatte (Dicke der Deckschicht 0,5 mm).

verstärkt aufgenommen, so dass sich die Schubsteifigkeit des Verbundes erhöht. Der Vergleich mit den in der Literatur angegebenen Beziehungen zeigt für den Al-PE-Kernverbund eine sehr gute Übereinstimmung mit dem durch Gleichung (7) beschriebenen Formfaktor. Der Übersichtlichkeit wegen wurden in der Darstellung nur die Grenzkurven berücksichtigt, innerhalb deren sich die verschiedenen Formfaktoren^{3,14-20} jedoch alle befinden.

Die Abhängigkeit der maximalen Durchbiegung in Balkenmitte von der

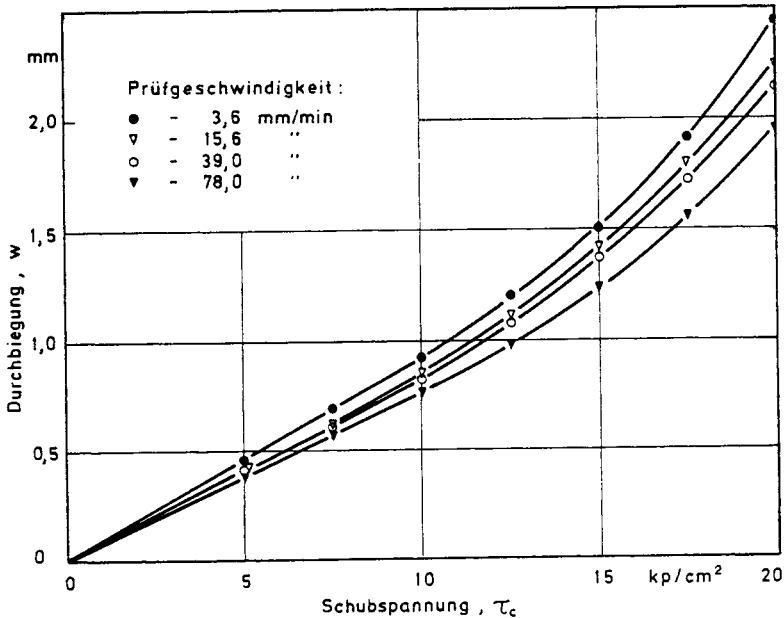


Bild 8. Durchbiegung w in Abhängigkeit von der Schubspannung τ_c bei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten für den ungefüllten Al-PE-Kernverbund im Dreipunkt-Biegeversuch.

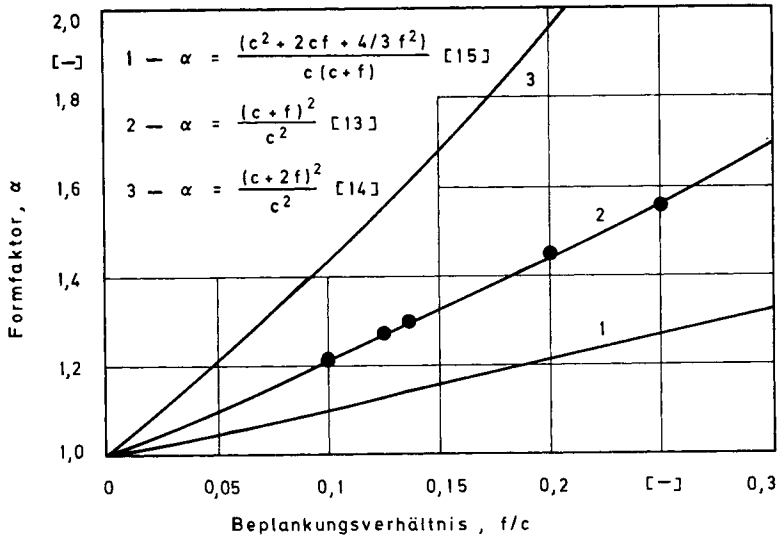


Bild 9. Bestimmung des Formfaktors α aus dem Beplankungsverhältnis f/c nach verschiedenen Autoren.

Schichtdicke und der Art der Beplankung wird in Bild 10 verdeutlicht. Gegenüber Reinaluminium als Beplankungswerkstoff können Biegeproben, die mit einer Al-Mn-Legierung beplankt sind, bis zum Beginn bleibender Verformung etwa der 5-fachen Belastung unterworfen werden. Gegenüber der aus dem isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagramm von AlMn-halbhart ermittelten Proportionalitätsgrenze, liegt die aus dem Biegeversuch für $f = 1 \text{ mm}$ festgestellte Spannung von ca. 7 kp/mm^2 deutlich darüber.

Das Biegeverhalten von Kernverbunden mit Al-Beplankung und PE-Kern-

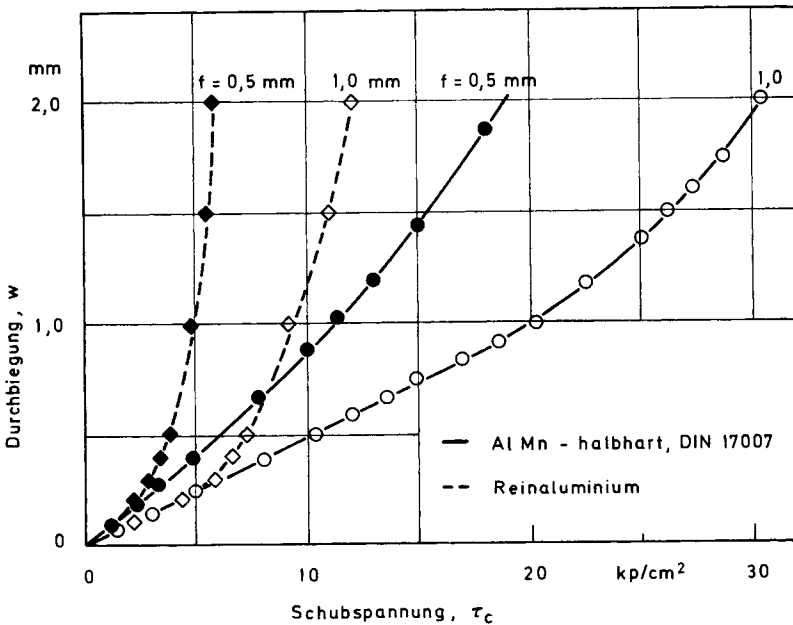


Bild 10. Biegeverformung von Kernverbundhalbzeug.

werkstoffen, die durch eingemischte Füllstoffe eine erhöhte Steifigkeit aufweisen, wird aus den folgenden Ergebnissen ersichtlich. In den Bildern 11–13 ist die Abhängigkeit der Durchbiegung von der im Kern herrschenden Schubspannung bei den Prüftemperaturen von -15°C , 23°C und 40°C für verschiedene Füllstoffkonzentrationen aufgetragen. Bild 14 zeigt in einer Zusammenstellung das Biegeverhalten der Kernverbunde mit gefüllten Kernwerkstoffen, wobei die Resultate sämtlicher Modifikationen (Asbest- und Glasfasern sowie Glaskugeln) zu jeweils einem Bereich zusammengefasst wurden.

Die Durchbiegungskurven weisen —füllstoffunabhängig— einen ähnlichen Verlauf auf. Bis zu Schubspannungen von 10 bis 15 kp/cm^2 (je nach Versuchstemperatur) ergibt sich eine lineare Zunahme der Gesamtdurchbiegung (Bild 14). Diese ist umso geringer, je höher die Füllstoffkonzentration ist (Bilder 11–13). Der Anstieg des linearen Bereichs wächst mit der Prüftemperatur; so ist die Durchbiegung bei $+40^{\circ}\text{C}$ im Bereich dieser geringen Spannung etwa doppelt so gross wie diejenige bei einer Prüftemperatur von -15°C . Mit zunehmender Temperatur verringert sich diejenige Schubspannung, ab der eine überproportionale Zunahme der Durchbiegung zu verzeichnen ist. Dies ist auf

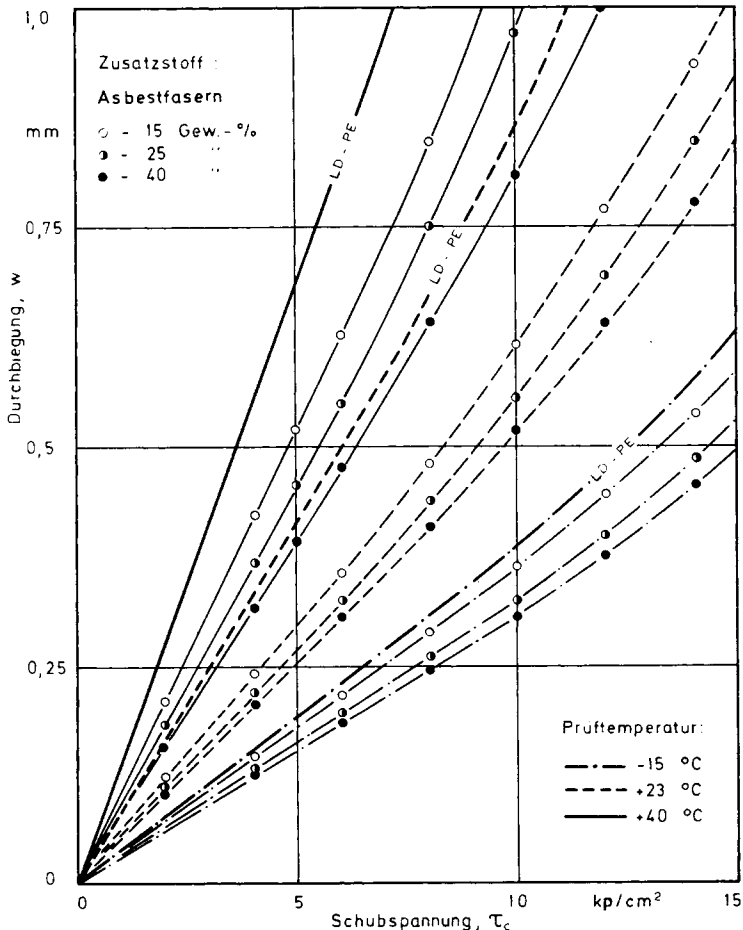


Bild 11. Biegeverformung von Al-PE-Kernverbunden mit gefülltem Kernwerkstoff in Abhängigkeit von der Prüftemperatur (Zusatzstoff Asbestfasern; Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_c = 0,01-0,03 \text{ s}^{-1}$).

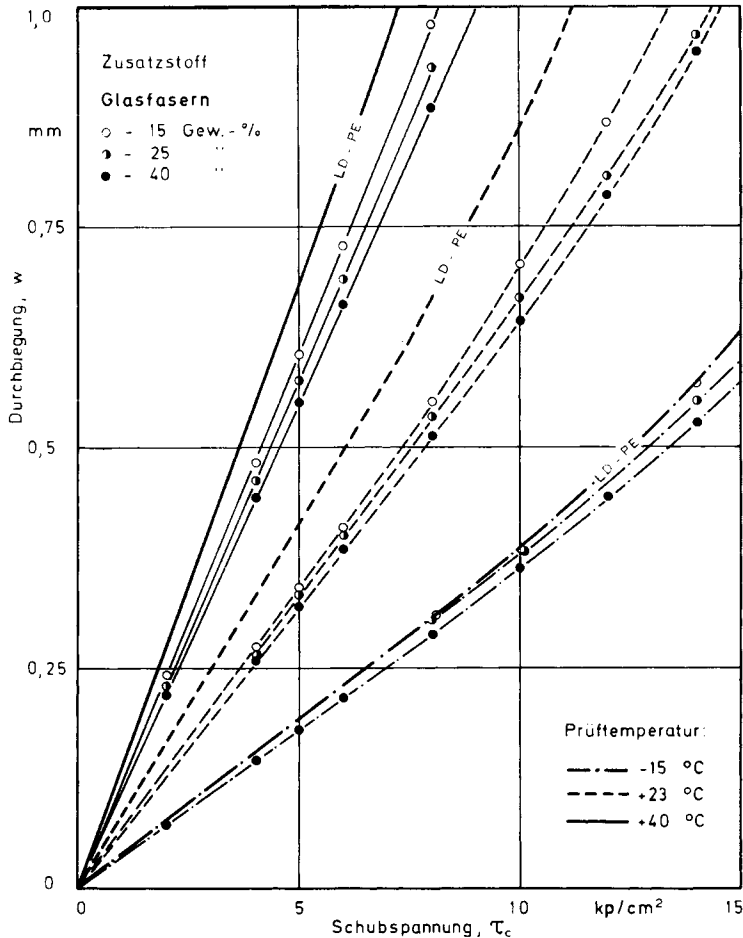


Bild 12. Biegeverformung von Al-PE-Kernverbunden mit gefülltem Kernwerkstoff in Abhängigkeit von der Prüftemperatur (Zusatzstoff Glasfasern; Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_c = 0,01-0,03 \text{ s}^{-1}$).

die plastische Verformung sowohl des Kernmaterials als auch der Deckschicht zurückzuführen. Da das Kernmaterial in seinen Festigkeitseigenschaften stark temperaturabhängig ist, ergibt sich bei $+40^\circ\text{C}$ eine plastische Verformung schon bei Schubspannungen im Bereich von 10 kp/cm^2 . Die Aluminium-Deckschicht wird hier im wesentlich grösseren Masse zur Aufnahme der Belastung herangezogen, als dies bei tieferen Temperaturen der Fall ist.

Es fällt auf, dass sich bei der Temperatur von -15°C bei einer Schubspannung von 20 kp/cm^2 eine starke Krümmung der Durchbiegungskurven ergibt (Bild 14). Berechnet man die in der Deckschicht herrschende Normalspannung bei einer Schubspannung von 20 kp/cm^2 , so erhält man einen Wert von 16 kp/cm^2 . Diese Spannung liegt bereits über der Ersatzstreckgrenze von Aluminium halbhart. Man kann also annehmen, dass bei -15°C der Fließbeginn im Kern und in der Deckschicht zusammenfällt.

Bild 15 veranschaulicht die Zunahme des Kernschubmoduls für die Zusatzstoffe bei verschiedenen Prüftemperaturen in Abhängigkeit von der Füllstoffkonzentration. (Hinsichtlich der Kennwerte des ungefüllten Kernwerkstoffs ist auf die niedrigere Verformungsgeschwindigkeit hinzuweisen.) Infolge

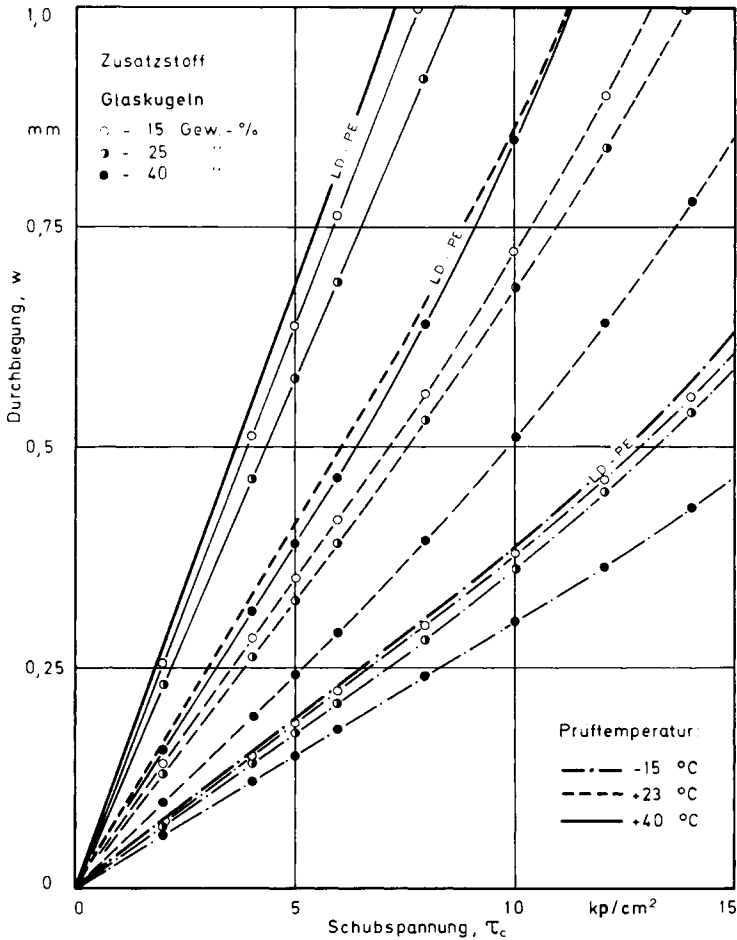


Bild 13. Biegeverformung von Al-PE-Kernverbunden mit gefülltem Kernwerkstoff in Abhängigkeit von der Prüf­temperatur (Zusatzstoff Glaskugeln, Schergewwindigkeit $\dot{\gamma}_c = 0,01-0,03 \text{ s}^{-1}$).

einer schlechten Verklebung zwischen Kern und Deckschicht⁸ werden mit dem glasfaserverstärkten Kernwerkstoff die geringsten Verbesserungen erzielt. Dagegen weist der mit Asbestfasern modifizierte Kernverbund ein günstigeres Biegeverhalten auf, obwohl die im Klettertrommelschälversuch nach ASTM D1781-60T geprüfte Verklebung wie bei den Glasfasern ebenfalls schlecht ist. Dies ist mit der Beanspruchung von $\tau = 20-30 \text{ kp/cm}^2$, wie sie bei den durchgeführten Versuchen vorlag, zu erklären. Die Verklebung wird durch die Asbestzumischung offenbar günstig beeinflusst, jedoch nur im Bereich geringerer Deformationen, so dass die Verstärkungswirkung der Faser im Kernwerkstoff zum Tragen kommt. Die eingemischten Glaskugeln führen indessen erst bei höherem Füllgrad zu einer deutlichen Festigkeitssteigerung, obwohl die Verklebung schon bei geringeren Glaskugelmkonzentrationen merklich verbessert wird.⁸ Somit bestätigt sich, dass zwei Einflussgrößen zu beachten sind, um die Festigkeit von Kernverbunden zu erhöhen: erstens die Güte der Verklebung und zweitens die Steifigkeit des Kernwerkstoffs. Als Optimierung bietet sich die Kombination von Glasfasern und Glaskugeln an, mit der man eine verbesserte Verklebung (Glaskugeln) und ein Kernmaterial mit höherem Festigkeitsniveau (Glasfasern) auch bei geringen Füllstoffkonzentrationen erhält.

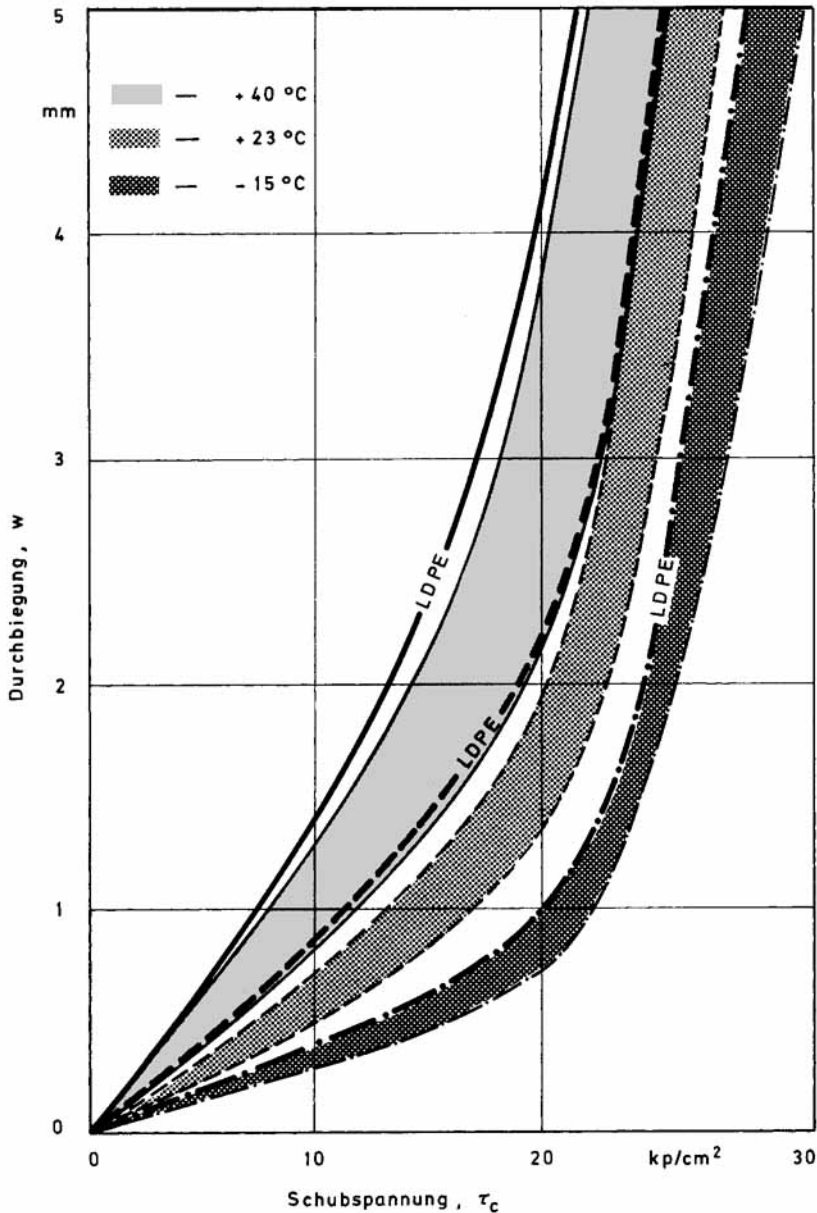


Bild 14. Einfluss von Zusatzstoffen auf die Biegeverformung von Al-PE-Kernverbunden bei verschiedenen Prüftemperaturen.

Es sei erwähnt, dass bei den gewählten Prüftemperaturen von -15°C und $+23^{\circ}\text{C}$ bis $\tau = 30 \text{ kp/cm}^2$ und bei $+40^{\circ}\text{C}$ bis $\tau = 25 \text{ kp/cm}^2$ keine Delamination zwischen Kern und Deckschicht beobachtet wurde.

Biegeversuche unter Vierpunkt-Belastung sind durch ein der Theorie nach konstantes Biegemoment, d.h. eine reine Biegebeanspruchung zwischen den Auflagern gekennzeichnet. Durchgeführte Untersuchungen zeigten jedoch die Grenzen dieser Versuchsanordnung für die vorliegenden Kernverbunde, da die gemessenen Durchbiegungen erhebliche Streuungen aufwiesen. Die aus den Versuchen ermittelten Kennwerte zeigen weiterhin ein allgemein niedrigeres

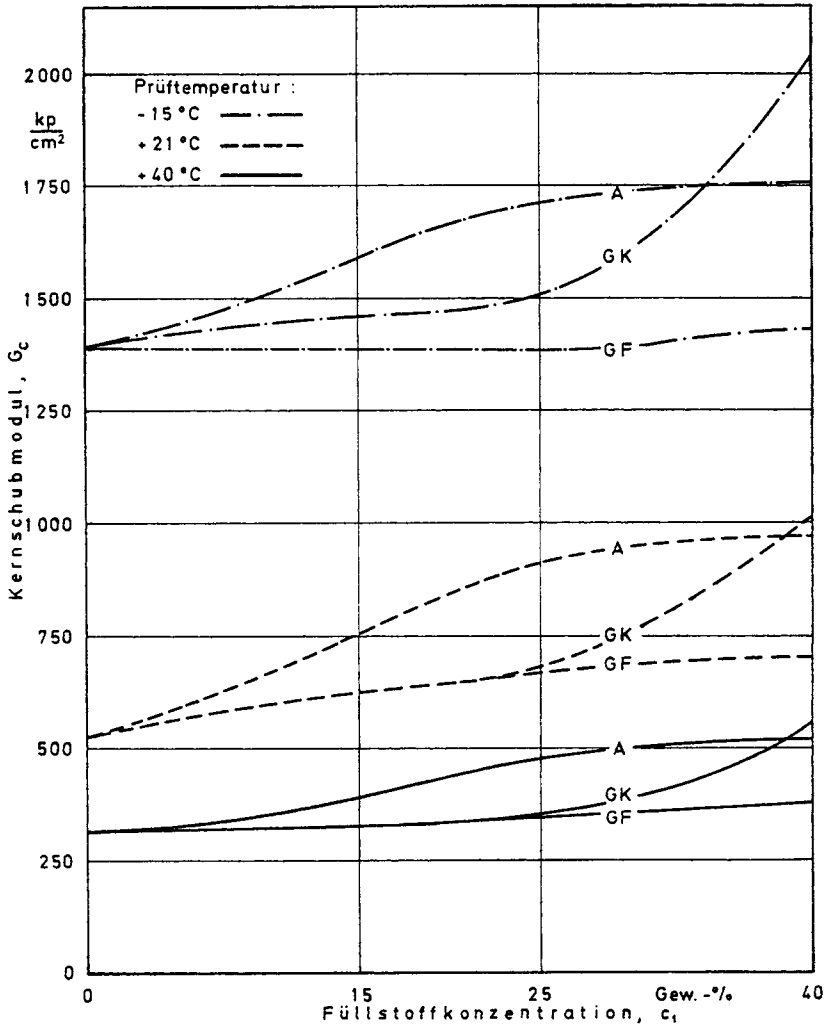


Bild 15. Schubmodul des Kernwerkstoffs, einschliesslich Schmelzkleber, in Abhängigkeit von der Konzentration der Zusatzstoffe bei verschiedenen Prüftemperaturen ($\tau_c = 8 \text{ kp/cm}^2$, $\dot{\gamma}_c = 0,01-0,03 \text{ s}^{-1}$).

Festigkeitsniveau. Hierzu ist zu vermerken, dass in den überkragenden Balkenenden Querkräfte und damit Scherdeformationen auftreten, die (im Gegensatz zur theoretischen Betrachtung) von den Auflagerpunkten zur Balkenmitte hin nicht sprunghaft auf Null abnehmen. Eine Ergänzung der Biegetheorie in dieser Hinsicht findet sich bei Norris et al.²⁴

BIEGEKRIECHVERSUCH UNTER DREIPUNKT-BELASTUNG

Das Verhalten der Kernverbunde bei langandauernder Beanspruchung wurde in Biegekriechversuchen untersucht. Im Gegensatz zu Metallen, neigen die polymeren Kernwerkstoffe wegen ihres viskoelastischen Verhaltens schon bei Raumtemperatur und z.T. geringer Belastung zum Kriechen. Das Kriechverhalten lässt sich durch Kriechkurven beschreiben, in denen die zeitliche Zunahme der Deformation unter konstanter Spannung (Retardation) und gleichbleibender Temperatur wiedergegeben wird.

Kann die Kriechfunktion $w = f(t)$ im doppeltlogarithmischen Masstab als Gerade wiedergegeben werden, liegt eine Gesetzmässigkeit der Form

$$\log w = m \cdot \log t + \log C \quad (14)$$

vor. Durch Umformung erhält man daraus:

$$w = C \cdot t^m \quad (15)$$

Führt man die dimensionslose Zeit t/t_1 ein, ergibt sich für $t = 1$ h die Konstante C als die Durchbiegung nach einer Stunde:

$$w_1 = C \cdot 1^m = C \quad (16)$$

Gleichung (15) lässt sich dabei in der Form

$$w = w_1 \left(\frac{t}{t_1} \right)^m \quad (17)$$

schreiben, wobei w die zeitabhängige Durchbiegung ist, w_1 die Durchbiegung nach 1 h, t die Zeit [h] und m die Steigung der Kriechfunktion in doppeltlogarithmischer Darstellung.

Der zeitabhängige Kriechschubmodul wird entsprechend dem Modul der elastischen Verformung nach Gleichung (11) berechnet.

Zusätzlich beeinflussen Spannung und Temperatur den Kriechmodul. Da Spannung und Dehnung nicht proportional sind, ist der Kriechmodul bei höherer Spannung grösser, als dies bei niedriger Spannung der Fall ist. Die Querkraft bewirkt eine Schubspannung τ_c im Kern des Sandwichbalkens, die als Folge des viskoelastischen Verhaltens des Kernwerkstoffs eine zeitabhängige Scherung γ_c des Kernes initiiert. Die auftretenden Normalspannungen σ_d in der Deckschicht können ebenfalls eine zeitliche Zunahme der Dehnung bzw. Stauchung bewirken, die eine Zunahme der Durchbiegung w zur Folge haben.

Das Biegekriechverhalten unter Dreipunkt-Belastung wurde mit einer Versuchseinrichtung nach den Normvorschriften ASTM C 480-62 und ASTM C 393-62 (Bild 16) bei Temperaturen von -15°C , 23°C und 40°C untersucht. Die Versuchsstände wiesen eine Stützweite von 120 mm auf.

In den Bildern 17–19 sind die Kriechkurven der Kernverbunde mit ungefülltem und gefülltem Kernwerkstoff für eine Kernschubspannung von $\tau_c = 8$ kp/cm² bei verschiedenen Prüftemperaturen aufgetragen. Es zeigt sich, dass für den Kernverbund die Kriechfunktionen in doppelt logarithmischer Auftragung, zumindest im untersuchten Temperaturbereich, gut durch Gerade wiedergegeben werden können. Während sich mit zunehmendem Füllstoffanteil die Durchbiegung insgesamt verringert, ändert sich die Steigung der Geraden

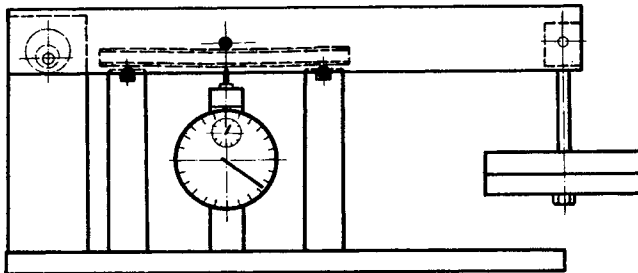


Bild 16. Versuchsaufbau des Dreipunkt-Biegekriechversuchs nach ASTM C 480-62.

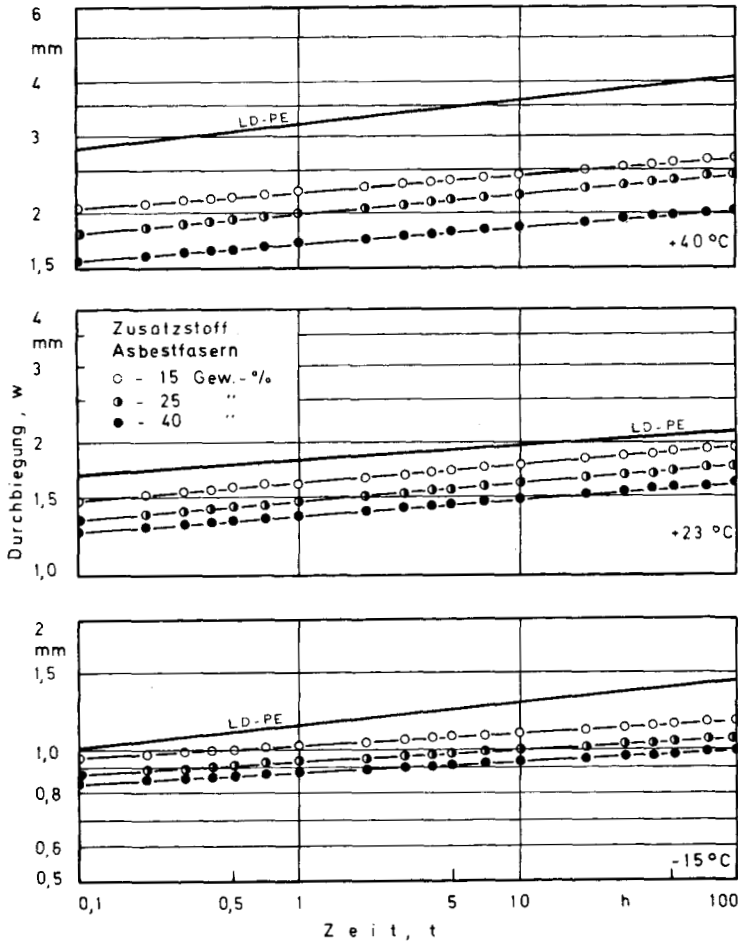


Bild 17. Kriechkurven $w = f(t)$ von mit Asbestfasern gefüllten Kernverbunden bei verschiedenen Prüftemperaturen ($\tau_c = 8 \text{ kp/cm}^2$).

nicht wesentlich. Der Kriechexponent m wird somit durch die Zumischungen wenig beeinflusst; bei Beurteilung der Kriechneigung ist jedoch der logarithmische Massstab zu berücksichtigen. Aus den Darstellungen wird weiter ersichtlich, dass die Zunahme der Kriechverformung bei der Prüftemperatur von -15°C ihren kleinsten Wert annimmt. In diesem Temperaturbereich weist die Verklebung zwischen Kern und Deckschicht die höchste Festigkeit auf, deren Ursache im Relaxationsverhalten des Schmelzklebers zu suchen ist. Diese Beobachtungen stimmen allgemein mit den Resultaten des Blockscherversuchs nach ASTM C 273-61 überein. Bei diesem Versuch unterliegen die Messergebnisse allerdings z.T. einer grösseren Streuung, die bis zu 30% betragen kann. Daher wird auf eine Darstellung in diesem Rahmen verzichtet.

Wie im Kurzzeit-Biegeversuch ergeben die Asbestzumischungen deutliche Festigkeitssteigerungen, die von den Glaskugeln bei 40 Gewichtsprozent noch übertroffen werden, während die Glasfaserverstärkung des Kernmaterials auch im Kriechversuch nur unvollständig ausgenützt werden kann.

Im Hinblick auf die Festigkeitsrechnung von Bauteilen ist es vorteilhaft, den Kriechschubmodul G_c zu bestimmen. Die Ergebnisse sind hierzu in Bild 20 im Beispiel der Asbestfaserverstärkung aufgetragen.

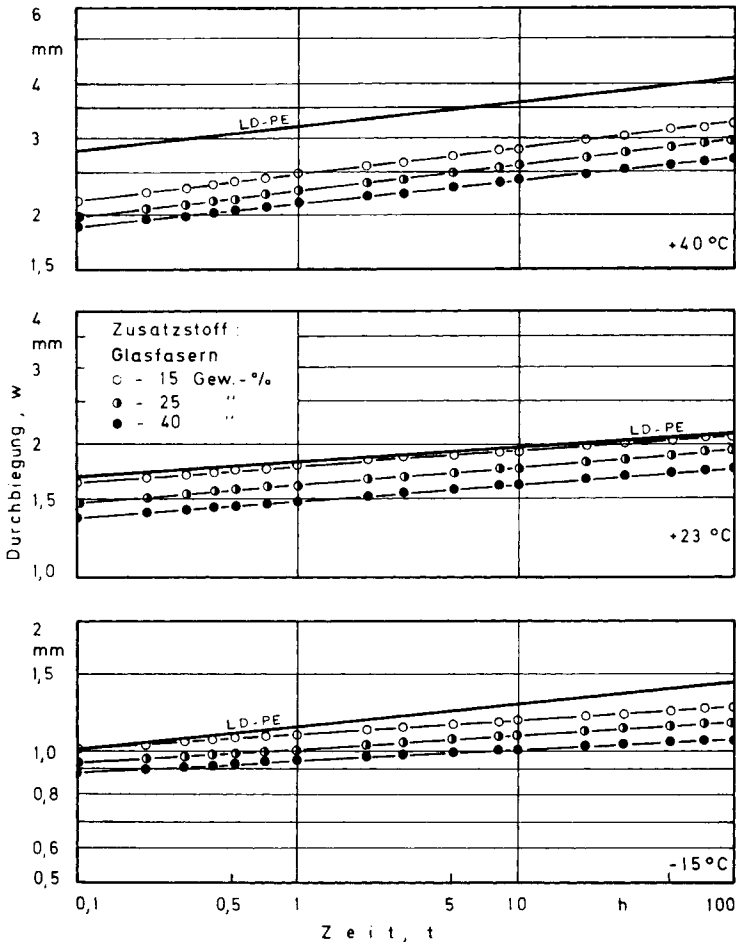


Bild 18. Kriechkurven $w = f(t)$ mit mit Glasfasern gefüllten Kernverbunden bei verschiedenen Prüftemperaturen ($\tau_c = 8 \text{ kp/cm}^2$).

Der Biegekriechversuch ermöglicht ausserdem eine Bestimmung der zeitabhängigen Scherfestigkeit. Während bei einer Prüftemperatur von 60°C und einer Belastung von $\tau_c = 8 \text{ kp/cm}^2$ noch keine Delamination zwischen Kern und Deckschicht auftrat, zeigten sich bei 80°C und gleicher Kernschubspannung, unabhängig vom Füllstoffzusatz, die Grenzen des Kernverbunds nach einer Prüfzeit von etwa 5 Minuten, indem die Deckschicht delaminierte. In Anwendungsfällen mit grösseren Stützweiten liegen die Schubspannungen unter 2 kp/cm^2 , so dass die Verklebung zumindest bei kurzzeitiger Biegebeanspruchung bis nahe an die Schmelztemperatur des Klebstoffs belastet werden kann.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Biegeverhalten von Polyäthylen-Kernverbundwerkstoffen mit umformbarer Aluminiumbeplankung wurde unter Berücksichtigung der Herstellungsbedingungen untersucht. Mit dem Biegeversuch können die Biege- und Schubsteifigkeit des Kernverbunds sowie der Schubmodul des Kernwerkstoffs ermittelt werden. Weiterhin lassen sich Aufschlüsse über die Scherfestigkeit der Verklebung zwischen Kern und Deckschicht gewinnen.

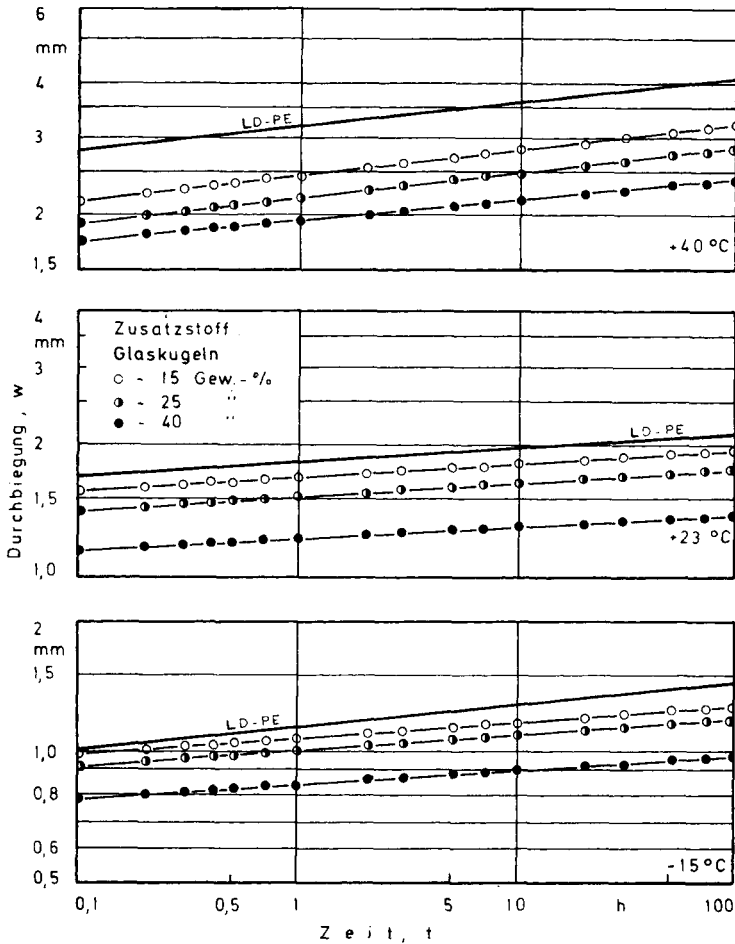


Bild 19. Kriechkurven $w = f(t)$ von mit Glaskugeln gefüllten Kernverbunden bei verschiedenen Prüftemperaturen ($\tau_c = 8 \text{ kp/cm}^2$).

Bei nicht querkraftfreier Biegebeanspruchung bewirkt die Scherung des Kerns eine erhöhte Durchbiegung. Durch eingemischte Füllstoffe in den Kernwerkstoff lässt sich die Durchbiegung reduzieren. Insbesondere dann, wenn es neben dem verstärkenden Einfluss auf den Kernwerkstoff selbst gelingt, hinsichtlich der Verklebung mit dem Füllstoff eine Wechselwirkung mit den am Verbund beteiligten Komponenten zu erreichen. Die Resultate aus dem Kurzzeitbiegeversuch bestätigen dies im Beispiel von alkalischen Glaskugeln und Glasfasern aus E-Glas. Während der erstgenannte Zusatzstoff die Festigkeit der Verklebung bereits bei geringen Anteilen erheblich verbessert⁸, wirkt sich der verstärkende Einfluss im Kernverbund erst bei höherer Füllstoffkonzentration von 40 Gewichtsprozent bei entsprechender Steifigkeit des Kernwerkstoffs aus. Dagegen werden mit den Fasern aus E-Glas, trotz der gegenüber den Glaskugeln erheblich höheren Verstärkungswirkung im Kernwerkstoff (bei jeweils 15 Gewichtsprozent, $E_{PE-GF}/E_{PE-GK} = 2,5:1$), im Al-PE-Kernverbund kaum verbesserte Festigkeitseigenschaften erzielt, da sich die Glasfaserverstärkung des Kernmaterials als solche aufgrund der schlechten Verklebung nicht auswirkt. Hier bieten sich als Optimierung alkalische Glasfasern oder besser die Kombi-

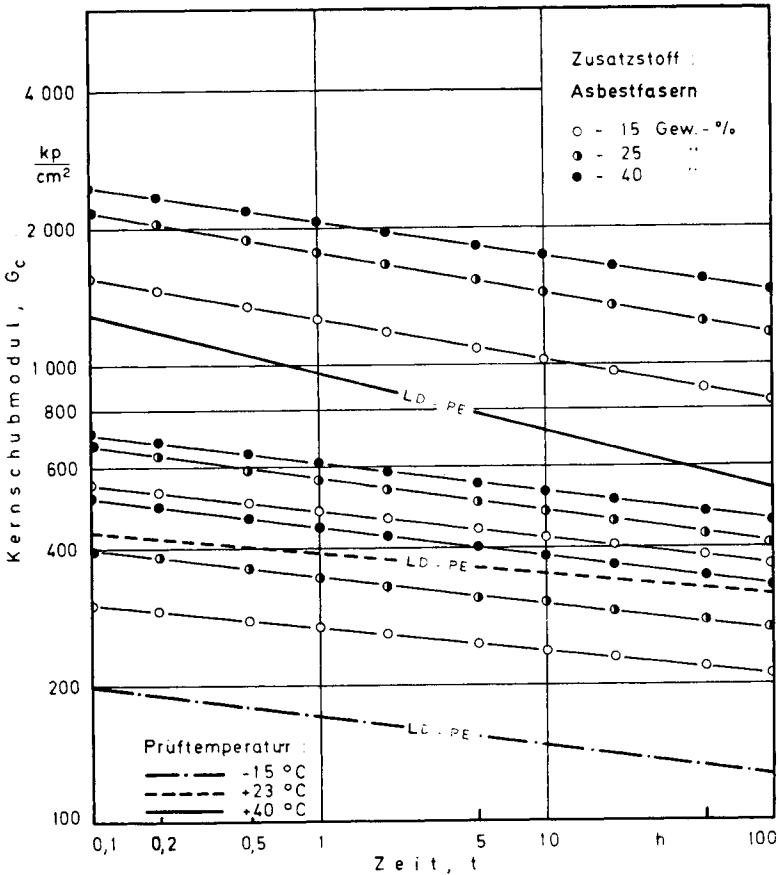


Bild 20. Biegekriechmodul des mit Asbestfasern gefüllten Kernwerkstoffs in Abhängigkeit von Belastungszeit und Temperatur ($\tau_c = 8 \text{ kp/cm}^2$).

nation von Zusatzstoffen (Glasfasern und -kugeln) an, da letztere die Spannungsverteilung im gefüllten Kernverbund erheblich begünstigt.

Bei Asbestzumischungen bis zu 25 Gewichtsprozent ist gegenüber den anderen verwendeten Zusatzstoffen das beste Biegeverhalten festzustellen, da durch die Asbestfasern sowohl der Kern verstärkt und auch die Verklebung positiv beeinflusst wird. So verringert sich die Durchbiegung bei einer Temperatur von $+40^\circ\text{C}$, einer Schubspannung von $\tau_c = 5 \text{ kp/cm}^2$ und einer Stützweite von 80 mm mit einem Anteil von 15 Gewichtsprozent zugemischten Asbestfasern um ca. 25% und bei 40 Gewichtsprozent nahezu um die Hälfte gegenüber dem Kernverbund mit ungefülltem Polyäthylen. Bei Raumtemperatur wird mit 40 Gewichtsprozent Asbestfasern bei o.g. Bedingungen dieselbe Durchbiegung wie mit einer von 0,5 auf 1,0 mm erhöhten Deckschichtdicke bei ungefülltem PE-Kern erzielt.

Die Biegekriechversuche zeigen die teilweise wesentlich reduzierte Durchbiegung durch Füllstoffzumischungen, jedoch wird der Kriechexponent selbst wenig beeinflusst.

Bei der Dimensionierung von Sandwichbalken im Hinblick auf Biegebeanspruchungen ist zu beachten, dass der Scheranteil der Biegung mit grösser werdender Stützweite mit guter Genauigkeit vernachlässigt werden kann. Die grössten Spannungen treten in der Deckschicht auf, so dass ein Versagen des

Kerns oder Verklebung auch bei höherer Temperatur im normalen Anwendungsfall mit Schuspannungen bis zu 2 kp/cm^2 kaum zu erwarten ist. Dies wurde durch Biegekriechversuche bei Temperaturen von $+90^\circ\text{C}$ bestätigt. Treten im praktischen Anwendungsfall örtliche Spannungskonzentrationen bei der Befestigung von Platten durch entsprechende Befestigungselemente auf, ist diese Einsatztemperatur indessen zu reduzieren.

SUMMARY

The bending properties of sandwich material with polyethylene compound core and cold deformable aluminum facings has been examined with regard to the production conditions. By means of the bending test, the flexural and shear stiffness of sandwich beams and the shear modulus of the core material can be ascertained. Furthermore, information concerning the shearing resistance of the adhesive effect between the core and the facing can be obtained.

In the case of a flexural load, which is not free from transverse forces, the shearing action of the core results in increasing bending. This bending can be reduced by mixing reinforcing materials into the core. This is especially the case if, with regard to the adhesive effect with the reinforcing material, it has been possible to obtain an alternating action with the components participating in the compound apart from the strengthening influence on the core material itself. This is confirmed by the results obtained from the short-time bending test in the case of the example of alkaline glass balls (A-glass) and glass fibers made of glass that is relatively soda free (E-glass). Whereas the first-mentioned additive considerably improves the strength of the adhesive effect even when small portions are used, the strengthening influence in the compound core becomes effective only at a higher filler concentration of 40 percent in weight in the case of adequate rigidity of the core material. On the other hand, by means of the E-glass fibers, strength properties in the aluminum-polyethylene (Al-PE) sandwich structure can be obtained which are hardly improved, and this in spite of the strengthening effect in the core material which is considerably higher as compared with the glass balls (with 15 percent in weight in each case, $E_{\text{LDPE with glass fibres}}/E_{\text{LDPE with glass balls}} = 2,5:1$).

This results from the fact that the glass fiber reinforcement of the core material as such does not take effect due to the bad adhesive effect to the hot melt. In this case alkaline glass fibres or, even better, the combination of additives (glass fibers and glass balls) is suitable for optimization as the latter considerably favors the stress distribution in the filled compound core. In the case of the use of chrysotile asbestos admixtures up to 25 percent in weight, as against the use of other additives, the best bending behavior has been observed. The reason for this is that by means of the asbestos fibers the core is strengthened and the adhesive effect is favorably influenced as well. Thus at a temperature of $+40^\circ\text{C}$, a shearing stress of $\tau_c = 5 \text{ kp/cm}^2$ and a span of 80 mm, with a portion of 15 percent in weight of added asbestos fibers, bending is reduced by approximately 25 percent, and almost by half in the case of 40 percent in weight as compared to the compound core with unfilled polyethylene. Under the above-mentioned conditions as well as at room temperature and with 40 percent in weight of asbestos fibers, the same bending effect is obtained as with a thickness of the facings which has been increased from 0,5 to 1,0 mm in the case of an unfilled low-density polyethylene core (LDPE core).

The bending creep tests exhibit a bending effect which is in part considerably reduced by means of filler additives; however, the creep exponent itself is influenced only to a small degree.

When dimensioning sandwich beams, it must be taken into consideration with regard to bending strains that the shearing portion of bending can be neglected with increasing span; however, at the same time high accuracy is being obtained. The highest tensions occur in the facing so that in the normal case of application with shear stress up to 2 kp/cm^2 , failure of the core or the adhesive effect is hardly to be expected even at higher temperatures. This has been confirmed by means of bending creep tests at temperatures of $+90^\circ\text{C}$. If, however, in the practical case of application local concentrations of tension occur when panels are fastened by means of adequate fixing elements, this temperature should be reduced.

Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Wintergerst danke ich für die grosszügige Förderung dieser Arbeit. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft gilt mein aufrichtiger Dank für die Bereitstellung der finanziellen Mittel. Schliesslich danke ich den Herren Dipl.-Ing. K. Vick, U.F. Coehne, R. Braunwarth and P. Werner für die Mitarbeit bei den Untersuchungen.

FORMELZEICHEN, LIST OF SYMBOLS

- b* Probenbreite, breadth of specimen (mm)
- c* Kerndicke, thickness of core (mm)
- c*₁ Füllstoffkonzentration, filler concentration (%)
- f* Deckschichtdicke, thickness of facing (mm)
- h* Gesamtdicke der Probe ($h = c + 2f$), thickness of the sandwich beam (mm)
- m* Exponent im Kriechgesetz, creep exponent
- t* Zeit, time (h)
- t*₁ Zeitkonstante, time constant (h)
- w* Durchbiegung, deflection (mm)
- \dot{w} Durchbiegungsgeschwindigkeit, flexural rate (mm/s)
- w*_b Durchbiegung infolge Biegebeanspruchung, deflection because of flexural stress (mm)
- w*_s Durchbiegung infolge Scherbeanspruchung, deflection because of shear stress (mm)
- B* Biegesteifigkeit, flexural stiffness (kp/cm^2)
- C* Konstante, constant
- E* Elastizitätsmodul, flexural modulus of elasticity (kp/cm^2)
- F* Prüfkraft, load (kp)
- G*_c Schubmodul, shear modulus (kp/cm^2)
- I* Trägheitsmoment, moment of inertia of cross section (mm^4)
- L* Stützweite, length of the span (mm)
- Q* Querkraft, transverse force (kp)
- S* Schubsteifigkeit, shear stiffness (kp)
- W* bezogene Durchbiegung, relative deflection (mm/kp)
- α Formfaktor, factor for sectional area of specimen
- γ Scherwinkel, angle of shear
- $\dot{\gamma}$ Schergeschwindigkeit, rate of shearing (1/s)
- $\dot{\vartheta}$ Abkühlgeschwindigkeit, cooling rate (grd/min)
- $\dot{\epsilon}$ Dehngeschwindigkeit, rate of elongation (%/min)

- μ Poisson'sche Zahl, Poisson's ratio
 σ Normalspannung, flexural stress (kp/cm²)
 τ Schubspannung, shear stress (kp/cm²)

Indices

- c* Kern, core
d Deckschicht, facing

SCHRIFTTUM

1. O. Jungbluth, *Plastica*, **12**, 606 (1970).
2. D. Altenpohl, *Aluminum*, **42**, 63 (1966).
3. D. Altenpohl und St. Acel, *Aluminium*, **44**, 71 (1968).
4. D. Altenpohl, *Aluminium und Al-Legierungen*, Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg/New York, 1965.
5. DAS 1 241 682 (Rheinische Blattmetall AG, 1967).
6. H. Schonhorn, *J. Polym. Sci.*, **1A**, 2343 (1963).
7. A. Hofmann, *Kunststoffe*, **59**, 85 (1969).
8. G. Lang, *Adhäsion*, **18**, 372 (1974).
9. H. J. Oel, *VDI-Zeitschrift*, **108**, 1727 (1966).
10. A. G. H. Dietz, *Engineering Laminates*, Wiley, New York, 1949.
11. V. Kovarik, *Acta Technica CSAV*, **12**, 1095 (1967).
12. R. Taprogge, *Konstruieren mit Kunststoffen*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1971.
13. F. J. Plantema, *Sandwich Construction*, Wiley, New York, 1966.
14. H. R. Jacobi, *Kunststoffe*, **39**, 315 (1949).
15. N. N., *Gummi Asbest Kunststoffe*, **22**, 136 (1969).
16. H. Algra und L. Taal, *Plastica*, **17**, 429 (1964).
17. J. Bernert, G. Hintersdorf und A. Wende, *Kunststoffe*, **56**, 852 (1966).
18. S. S. Oleesky und J. C. Mohr, *Handbook of Reinforced Plastics*, Reinhold, New York, 1964.
19. B. R. Noton, *Aluminium*, **34**, 446 (1958).
20. S. Kelsey, R. A. Gellatly und B. W. Clark, *Aircraft Eng.*, **30**, 294 (1958).
21. R. Schick, Dissertation, Universität Stuttgart, 1971.
22. G. Lang, *J. Appl. Polym. Sci.*, **18**, 2287 (1974).
23. H. Hendus und G. Schnell, *Kunststoffe*, **51**, 69 (1961).
24. C. B. Norris, W. S. Erickson und W. J. Kommers, Forest Products Laboratory Rep. 1505-A (1962).

Received February 17, 1977

Revised June 13, 1977