

ISSN 0366-1296

Forschungsbericht 56

BUNDESANSTALT FÜR
MATERIALPRÜFUNG (BAM)
BERLIN

**Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Berlin**

in Zusammenarbeit mit

**o. Prof. Dr.-Ing. C. Langlie
Lehr- und Forschungsgebiet Baukonstruktionslehre
Gesamthochschule Wuppertal**

Stabilität von Sandwichbauteilen

von Dipl.-Ing. W. Brünner
o. Prof. Dr.-Ing. C. Langlie

Januar 1979

90 Seiten, 89 Bildern, 56 Tabellen, 31 Seiten Anlagen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1
Telex 01-83 261 bamb d

Vorwort:

Der vorliegende Bericht entstand in den Jahren 1974-1977 als gemeinsame Arbeit der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin, und Professor Dr.-Ing. Carsten Langlie, Ingenieurbüro für Bauwesen, AIV, VBI, Berlin.

Die Arbeit wurde durch das Innenministerium des Landes Nordrhein-Westfalen finanziert. Die gute Zusammenarbeit mit dieser Instanz ist besonders hervorzuheben.

Für die vielen wertvollen Hinweise und Anregungen der Betreuer des Forschungsvorhabens, Herrn Dr.-Ing. Einsfeld (Institut für Bautechnik, Berlin), Herrn Professor Dr.-Ing. Jungbluth (Lehrstuhl für Stahlbau, TH Darmstadt) und Herrn Professor Dr.-Ing. Menges (Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen), sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Die verwendeten Prüfkörper wurden dankenswerterweise von den Firmen BASF AG, Bayer AG und Hoechst AG kostenlos zur Verfügung gestellt. Als besonders anerkennenswert ist zu erwähnen, daß die Prüfkörper, bis auf zwei Ausnahmen, mit Rezeptur und Verfahrensbeschreibung geliefert wurden. Auf diese Weise ist eine Reproduktion der Prüfkörper möglich.

Berlin im Dezember 1977

W. Brünner, C. Langlie

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung/Summary	1
1. Einleitung	1
1.1 Herstellungsverfahren	1
2. Ziel des Forschungsvorhabens	2
3. Grundformeln	4
3.1 Allgemeine Betrachtungen	4
3.2 Beanspruchung bei Biegung und Schub	5
3.3 Deformation des Stützkernes senkrecht zu den Deckschichten	7
3.4 Das „Knittern“ bei einer anfänglichen Deckschichtaußermittigkeit	8
3.4.1 Vorbeulen nach „Williams“	9
3.5 Weitere Gesichtspunkte zum Thema „Knittern“	10
3.5.1 Randzoneneffekt	10
3.5.2 Nichtsinusförmiges „Knittern“	11
3.5.3 Destabilisierung durch Druckspannungen im Stützkern	12
4. Sandwichsysteme	12
4.1 Stützkern PH-LB	13
4.1.1 Übersichtstabelle	13
4.1.2 Stützkern – Rezepturen	14
4.1.3 Verfahrensbeschreibung	14
4.2 Stützkern PIR-LB	15
4.2.1 Übersichtstabelle	15
4.2.2 Stützkern – Rezepturen	15
4.2.3 Verfahrensbeschreibung	16
4.3 Stützkern PS-HS	16
4.3.1 Übersichtstabelle	16
4.3.2 Stützkern – Rezepturen	16
4.3.3 Verfahrensbeschreibung	16
4.4 Stützkern PS-LB	17
4.4.1 Übersichtstabelle	17
4.4.2 Stützkern – Rezepturen	17
4.4.3 Verfahrensbeschreibung	17
4.5 Stützkern PUR-HS	17
4.5.1/7 Übersichtstabelle	17
4.5.8 Stützkern – Rezepturen mit Verfahrensbeschreibungen	18
4.6 Stützkern UP-LB	20
4.6.1 Übersichtstabelle	20
4.6.2 Stützkern – Rezepturen	20
4.6.3 Verfahrensbeschreibung	20
5. Versuchsdurchführung	21
5.1 Entwicklung von Prüfeinrichtungen und Vorversuche	22
5.2 Probenvorbereitung	27
5.3 Zug- und Druckversuche senkrecht zur Deckschichtebene	29
5.4 Versuche zur Bestimmung des Deckschicht-E-Moduls	31
5.5 Biegeversuche	33

5.6	Aufbereitung der Versuchsergebnisse	39
5.6.1	Kernrohddichte γ_K	40
5.6.2	Deckschichtabzugsfestigkeit σ_{zBK}	40
5.6.3	Druckfestigkeit σ_{dBK}	40
5.6.4	Elastizitätsmoduln E_{zK} und E_{dK}	41
5.6.5	Druckfestigkeit der Deckschicht σ_{dBD}	41
5.6.6	Druck-Elastizitätsmodell der Deckschichten E_{dD}	42
5.6.7	Bruch-Biegemoment M_B	42
5.6.8	Bruch-Durchbiegung f_B	43
5.7	Messung der „Vorbeulen“ der Deckschichten	44
6.	Auswertung der Meßergebnisse	45
6.1	Stirnabzugversuch	45
6.1.1	E-Modul des Stützkernes \perp zu den Deckschichtebenen	53
6.1.2	Zugfestigkeit des Stützkernes \perp zu den Deckschichtebenen	54
6.2	Biegeversuch	60
6.2.1	Rechnerische Durchbiegung	67
6.2.2	Rechnerische Spannungen	68
6.2.3	Rechnerische Ermittlung des Faktors „k“ auf der Grundlage des Vorbeulens	69
6.2.4	Tabellarische Gegenüberstellung von rechnerischen und gemessenen Bruchkriterien	
	– gemessene Durchbiegung f_B	
	– rechnerische Durchbiegung f'_B	
	– Bruchspannungen im Stützkern σ_{dBK}	
	– Bruchspannungen in der Deckschicht σ_{dBD}	
	– Faktor „k“ aus dem Biegeversuch	75
7.	Faktor „k“	
	– Temperaturabhängigkeit, Faktor „k“	
	– Gültigkeitsbereich	
	– Tabellen für „k“ und „k'“	81
8.	Qualitative Betrachtungen	86
	Literatur	89
	Anlagen, Datenblätter 1 bis 31	91

Zusammenfassung

Dreischichtige ebene Sandwichelemente wurden rechnerisch und experimentell untersucht.

Das Ziel der Arbeit, wie unter Ziff. 2. definiert, bestand

- a) in der Feststellung der Haftung zwischen Deckschicht und Kern und
- b) in der Ermittlung des Faktors "k" in Gleichung (4) bei Variation von Schäumssystemen und Deckschichten.

Dieses Ziel wurde erreicht durch experimentelle Untersuchungen der Sandwichsysteme nach Ziff. 4, deren Ergebnisse in den Anlagen Bl. 1-31 wiedergegeben sind.

Grundsätzlich wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- a) Stirnabzugversuche mit Feststellung der Zugfestigkeit (σ_{zBK}) und des Zug-E-Moduls (E_{zK}) sowie stichprobenartig des Druck-E-Moduls (E_{dK})
- b) Biegeversuche ohne Schubkrafteinfluß mit ca. 20 cm breiten Proben bei den Spannweiten 50 und 75 cm. Hierbei wurden Last-Durchbiegungsdiagramme mit Feststellung der Bruchlast aufgezeichnet
- c) Kontrolle der von den Probenherstellern angegebenen Stützkernrohddichten
- d) Messung der "Vorbeulen" der Deckschichten

Außerdem wurden die mechanischen Eigenschaften der GF-UP-Deckschichten und stichprobenartig die der Stahl- und Aluminiumdeckschichten untersucht

Alle Prüfungen und Versuche (außer der Prüfung der Metalldeckschichten) erfolgten bei 20 °C, 40 °C, 60 °C und 80 °C.

Summary

In the present work smooth three-layer sandwich structural elements were experimentally and theoretically investigated.

The aim of this investigation was - as defined in paragraph 2 -

- a) to determine the adhesion between the faces and the core of the structural element and
- b) to determine the factor "k" of equation (4) for different foaming systems and different kinds of faces.

This aim was attained by experimental investigation of the sandwich systems according to paragraph 4, the test results being recorded in the annexes 1 to 31.

Principally, the following tests were carried out:

- a) Tensile tests perpendicular to the faces with determination of the tensile strength (σ_{zBK}) and the module of elasticity in tension (E_{zK}) as well as - only in random tests - determination of the module of elasticity in compression (E_{dK}).
- b) Bending tests without influence of shear strength carried out on 20 cm wide samples at spans of 50 and 75 cm. The load-deflection diagrams with indication of the ultimate load were plotted.
- c) Verification of the volumetric mass (apparent density) of the core indicated by the manufacturer of the samples.
- d) Measurement of the initial irregularities of the faces.

Furthermore the mechanical properties of the GF-UP-faces and - only in random tests - those of the steel and aluminum faces were investigated.

All tests (except those carried out on samples taken from the metal faces) were carried out at the following temperatures: 20 °C, 40 °C, 60 °C and 80 °C.

Die Durchführung und der Ablauf der Versuche sind in Ziff. 5 dargestellt.

Aus den Tabellen 9 bis 21 (Stirnabzugversuche) und den Bildern 52-70 ist die Abhängigkeit von E_{zK} , E_{dK} und σ_{zK} von der Temperatur bzw. von der Rohdichte zu ersehen.

Grundsätzlich ist festzuhalten, daß die Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften der untersuchten Hartschäume erheblich ist und bei statischen Berechnungen berücksichtigt werden muß.

Bei Temperatursteigerung von 20 °C auf 80 °C wurden folgende maximale Änderungen (%) bezogen auf den Zustand bei 20 °C gemessen:

PH-LB	ΔE_{zK}	(+16 bis -17 %)
	ΔE_{dK}	(-28 bis -37 %)
	$\Delta \sigma_{zBK}$	(-39 %)
PIR-LB	ΔE_{zK}	(-47 bis -70 %)
	ΔE_{dK}	(-59 bis -91 %)
	$\Delta \sigma_{zBK}$	(-37 bis -59 %)
PS-IIIS	ΔE_{zK}	(+82 bis -41 %)
	ΔE_{dK}	(-41 bis -46 %)
	$\Delta \sigma_{zBK}$	(-22 bis -36 %)
PS-LB	ΔE_{zK}	(-66 %)
	ΔE_{dK}	(-54 %)
	$\Delta \sigma_{zBK}$	(-45 %)
PUR-HS	ΔE_{zK}	(-7 bis -31 %)
	ΔE_{dK}	(-18 bis -32 %)
	$\Delta \sigma_{zBK}$	(-9 bis -81 %)
UP-LB	ΔE_{zK}	(-71 bis -77 %)
	ΔE_{dK}	(-66 bis -85 %)
	$\Delta \sigma_{zBK}$	(-35 %)

Diese Zahlen sollen nur Tendenzen und Größenordnungen aufzeichnen. Die angegebenen Bereiche berücksichtigen unterschiedliche Rohdichten und verschiedenartige Deckschichten.

Die "k"-Faktoren wurden rechnerisch (vgl. Ziff. 6.2.3) und experimentell (vgl. Ziff. 6.2.4) festgestellt. Die Übereinstimmung der beiden Werte ist als gut zu bezeichnen.

Abgerundete Werte für die "Praxis" können den Tabellen 31-42, Spalte 14, für die Temperaturen 20 °C, 40 °C, 60 °C und 80 °C entnommen werden.

The test arrangements and test procedures are described in paragraph 5.

The tables 9 to 21 (tensile tests perpendicular to the faces) and the figures 52 to 70 show the dependance of E_{zK} , E_{dK} and σ_{zK} from temperature respectively from apparent density (volumetric mass).

Above all it must be noted that the temperature dependance of the mechanical properties of the tested rigid foams is considerable and has to be taken into account in all static calculations.

When rising temperature from 20 °C to 80 °C the following maximum variations (in %) compared with the values determined at 20 °C were measured:

PH-LB	ΔE_{zK}	(+16 bis -17 %)
	ΔE_{dK}	(-28 bis -37 %)
	$\Delta \sigma_{zBK}$	(-39 %)
PIR-LB	ΔE_{zK}	(-47 bis -70 %)
	ΔE_{dK}	(-59 bis -91 %)
	$\Delta \sigma_{zBK}$	(-37 bis -59 %)
PS-IIIS	ΔE_{zK}	(+82 bis -41 %)
	ΔE_{dK}	(-41 bis -46 %)
	$\Delta \sigma_{zBK}$	(-22 bis -36 %)
PS-LB	ΔE_{zK}	(-66 %)
	ΔE_{dK}	(-54 %)
	$\Delta \sigma_{zBK}$	(-45 %)
PUR-HS	ΔE_{zK}	(-7 bis -31 %)
	ΔE_{dK}	(-18 bis -32 %)
	$\Delta \sigma_{zBK}$	(-9 bis -81 %)
UP-LB	ΔE_{zK}	(-71 bis -77 %)
	ΔE_{dK}	(-66 bis -85 %)
	$\Delta \sigma_{zBK}$	(-35 %)

These values are only supposed to show the tendencies and orders of magnitude. In the given ranges different apparent densities (volumetric masses) and different kinds of faces are taken into account.

The "k"-factors were determined by calculation (see par. 6.2.3.) as well as by experimentation (see par. 6.2.4.). The conformity of the two values received must be called to be quite well.

Values expressed in round figures for use in "practice" can be taken from the tables 31 to 42, column 14, for the temperatures of 20 °C, 40 °C, 60 °C and

Zur Übersicht wird hier "k" bei 20 °C und 80 °C wiedergegeben:

Füllbaulweise	PH-LB/GF-UP, $\gamma_{K, \text{Soll}} = 250 \text{ kg/m}^3$	$k = 0,10 - 0,02$
	" = 450 kg/m^3	$k = 0,05 - 0,02$
	PIR-LB/St, " = 250 kg/m^3	$k = 0,35 - 0,65$
	PIR-LB/Al, " = 250 kg/m^3	$k = 0,40 - 0,70$
Hüllbaulweise	PS-HS/Al, " = 30 kg/m^3	$k = 0,30 - 0,30$
	PS-HS/GF-UP, " = 30 kg/m^3	$k = 0,80 - 0,20$
	PS-LB/Al, " = 600 kg/m^3	$k = 0,20 - 0,20$
Füllbaulweise	PUR-HS/St, " = 40 kg/m^3	$k = 0,70 - 0,70$
	PUR-HS/St, " = 70 kg/m^3	$k = 0,80 - 0,80$
	PUR-HS/St, " = 100 kg/m^3	$k = 0,85 - 0,85$
	PUR-HS/Al, " = 40 kg/m^3	$k = 0,80 - 0,80$
	PUR-HS/Al, " = 70 kg/m^3	$k = 0,80 - 0,80$
	PUR-HS/Al, " = 100 kg/m^3	$k = 0,80 - 0,80$
	PUR-HS/GF-UP, " = 40 kg/m^3	$k = 0,80 - 0,40$
	PUR-HS/GF-UP, " = 70 kg/m^3	$k = 0,70 - 0,20$
	PUR-HS/GF-UP, " = 100 kg/m^3	$k = 0,60 - 0,20$
	Hüllbaulweise	PUR-HS/GF-UP, " = 40 kg/m^3
PUR-HS/GF-UP, " = 70 kg/m^3		$k = 0,40 - 0,30$
Hüllbaulweise	UP-LB/Al, " = 260 kg/m^3	$k = 0,10 - 0,20$
	UP-LB/GF-UP, " = 260 kg/m^3	$k = 0,05 - 0,10$

Bei der Verwendung der k-Faktoren nach den Tabellen 31-42, Spalte 14, muß E_{zK} bzw. E_{dD} bei der entsprechenden Temperatur (20 °C, 40 °C, 60 °C und 80 °C) in die Knitterformel eingesetzt werden.

Beispiel 1:

Die Knitterspannung für System 4.5.3.1 (PUR-HS/GF-UP, $\gamma_{K, \text{Soll}} \approx 40 \text{ kg/m}^3$) bei 60 °C soll ermittelt werden.

Werkstoffkenndaten nach Anlage Bl. 16 (60 °C):

$$E_{zK} = 8.21 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{dD} = 3761 \text{ N/mm}^2$$

nach Tabelle 36, Spalte 14:

$$k = 0,50$$

$$\begin{aligned} \sigma_{kr} &= 0,62 \cdot k \cdot (E_{dD} \cdot E_{zK}^2)^{1/3} \\ &= 0,62 \cdot 0,50 (3761 \cdot 8,21^2)^{1/3} \\ &= 19,52 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Faktor "k" nach Tabellen 31-42, Spalte 14, beschreibt somit nur den Tragfähigkeitsverlust infolge Deckschichtaußer-

80 °C. In the following synoptic table the "k" values received for temperatures of 20 °C and 80 °C are tabulated:

Füllbaulweise	PH-LB/GF-UP, $\gamma_{K, \text{Soll}} = 250 \text{ kg/m}^3$	$k = 0,10 - 0,02$
	" = 450 kg/m^3	$k = 0,05 - 0,02$
	PIR-LB/St, " = 250 kg/m^3	$k = 0,35 - 0,65$
	PIR-LB/Al, " = 250 kg/m^3	$k = 0,40 - 0,70$
Hüllbaulweise	PS-HS/Al, " = 30 kg/m^3	$k = 0,30 - 0,30$
	PS-HS/GF-UP, " = 30 kg/m^3	$k = 0,80 - 0,20$
	PS-LB/Al, " = 600 kg/m^3	$k = 0,20 - 0,20$
Füllbaulweise	PUR-HS/St, " = 40 kg/m^3	$k = 0,70 - 0,70$
	PUR-HS/St, " = 70 kg/m^3	$k = 0,80 - 0,80$
	PUR-HS/St, " = 100 kg/m^3	$k = 0,85 - 0,85$
	PUR-HS/Al, " = 40 kg/m^3	$k = 0,80 - 0,80$
	PUR-HS/Al, " = 70 kg/m^3	$k = 0,80 - 0,80$
	PUR-HS/Al, " = 100 kg/m^3	$k = 0,80 - 0,80$
	PUR-HS/GF-UP, " = 40 kg/m^3	$k = 0,80 - 0,40$
	PUR-HS/GF-UP, " = 70 kg/m^3	$k = 0,70 - 0,20$
	PUR-HS/GF-UP, " = 100 kg/m^3	$k = 0,60 - 0,20$
	Hüllbaulweise	PUR-HS/GF-UP, " = 40 kg/m^3
PUR-HS/GF-UP, " = 70 kg/m^3		$k = 0,40 - 0,30$
Hüllbaulweise	UP-LB/Al, " = 260 kg/m^3	$k = 0,10 - 0,20$
	UP-LB/GF-UP, " = 260 kg/m^3	$k = 0,05 - 0,10$

* nominal value

** ref. page 2

When using the "k"-factors according to the tables 31 to 42, column 14, the values of E_{zK} resp. E_{dD} received for the corresponding temperatures (20 °C, 40 °C, 60 °C and 80 °C) must be inserted into the formula for determination of wrinkling stress.

Example No. 1:

It is intended to determine the wrinkling stress of the system described in par. 4.5.3.1. (PUR-HS/GF-UP, $\gamma_{K, \text{Soll}} \approx 40 \text{ kg/m}^3$) at a temperature of 60 °C.

The characteristic data of the material according to the annex page 16 (60 °C) are:

$$E_{zK} = 8.21 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{dD} = 3761 \text{ N/mm}^2$$

and according to table 36, column 14:

$$k = 0,62 \cdot k \cdot (E_{dD} \cdot E_{zK}^2)^{1/3}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{kr} &= 0,62 \cdot 0,50 (3761 \cdot 8,21^2)^{1/3} \\ &= 19,52 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Thus, the factor "k" according to tables 31 to 42, column 14, describes only the loss of load bearing capacity due to ir-

mittigkeiten. - Wie zu erwarten war, ist k bei Deckschichten aus GF-UP geringer als bei metallischen Deckschichten und bei Stützkernen mit kleiner Bruchdehnung geringer als bei solchen mit größerer Bruchdehnung.

Wenn man " k " mit dem Abfall der Tragfähigkeit infolge Temperaturzunahme in einem Faktor " k' " zusammenfaßt, kann die Knitterspannung bei den Temperaturen 20 °C, 40 °C, 60 °C und 80 °C mit k' (nach den Tabellen 43-51, Spalte 3), $E_{zK} 20\text{ °C}$ und $E_{dD} 20\text{ °C}$ bestimmt werden.

Beispiel 2:

Die Knitterspannung für System 4.5.3.1 (PUR-HS/GF-UP, $\gamma_{K, \text{Soll}} \approx 40\text{ kg/m}^3$) soll ermittelt werden.

Werkstoffkenndaten nach Anlage Bl. 16 (20 °C) :

$$E_{zK} = 8,85\text{ N/mm}^2$$

$$E_{dD} = 7386\text{ N/mm}^2$$

Nach Tabelle 49, Spalte 3 (60 °C) :

$$k' = 0,40$$

$$\begin{aligned} \sigma_{kr} &= 0,62 \cdot k' (E_{dD} \cdot E_{zK})^{1/3} \\ &= 0,62 \cdot 0,40 (7386 \cdot 8,85)^{1/3} \\ &= 20,7\text{ N/mm}^2 \approx 19,52\text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Da die Tabellenwerte gerundet sind, fallen die Ergebnisse etwas unterschiedlich aus.

Der auf 20 °C bezogene Faktor k' nach den Tabellen 43-51, Spalte 3, wird zur Übersicht für 20 °C und 80 °C wiedergegeben:

Füllbauweise	PH-LB/GF-UP, $\gamma_{K, \text{Soll}} = 250\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,10 - 0,01$
	PH-LB/GF-UP, " $= 450\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,05 - 0,02$
	PIR-LB/St, " $= 250\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,35 - 0,30$
	PIR-LB/Al, " $= 250\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,40 - 0,25$
	PIR-LB/GF-UP, " $= 250\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,30 - 0,10$
Hüllbauweise	PS-HS/Al, " $= 30\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,70 - 0,50$
	PS-HS/GF-UP, " $= 30\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,70 - 0,20$
	PS-LB/Al, " $= 600\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,20 - 0,10$
Füllbauweise	PUR-HS/St, " $= 40\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,70 - 0,55$
	PUR-HS/St, " $= 70\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,80 - 0,65$
	PUR-HS/St, " $= 100\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,85 - 0,70$
	PUR-HS/Al, " $= 40\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,80 - 0,65$
	PUR-HS/Al, " $= 70\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,80 - 0,65$
	PUR-HS/Al, " $= 100\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,80 - 0,65$

regularities of the faces. - As expected, the k -value obtained for GF-UP-faces is lower than that obtained for metal faces and in the case of cores with low strain at failure it is lower than in the case of cores with a higher strain at failure.

If, with the loss of load bearing capacity due to temperature rise, " k " is transformed into a factor " k' " it is possible to determine the wrinkling stress at the temperatures of 20 °C, 40 °C, 60 °C and 80 °C with k' according to the tables 43 to 51, column 3, $E_{zK} 20\text{ °C}$ and $E_{dD} 20\text{ °C}$.

Example No. 2:

It is intended to determine the wrinkling load of the system described in par.

4.5.3.1. (PUR-HS/GF-UP, $\gamma_{K, \text{Soll}} \approx 40\text{ kg/m}^3$).

The characteristic data of the material according to annex page 16 (20 °C) are:

$$E_{zK} = 8,85\text{ N/mm}^2$$

$$E_{dD} = 7386\text{ N/mm}^2$$

and according to table 49, column 3 (60 °C):

$$k' = 0,40$$

$$\begin{aligned} \sigma_{kr} &= 0,62 \cdot k' (E_{dD} \cdot E_{zK})^{1/3} \\ &= 0,62 \cdot 0,40 (7386 \cdot 8,85)^{1/3} \\ &= 20,7\text{ N/mm}^2 \approx 19,52\text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Due to the fact that the values given in the tables are round figures the results show some unimportant differences.

In the following synoptic table the factor k' referred to a temperature of 20 °C according to the tables 43 to 51, column 3, is tabulated for the temperatures of 20 °C and 80 °C:

** Füllbauweise	PH-LB/GF-UP, $\gamma_{K, \text{Soll}} = 250\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,10 - 0,01$
	PH-LB/GF-UP, " $= 450\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,05 - 0,02$
	PIR-LB/St, " $= 250\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,35 - 0,30$
	PIR-LB/Al, " $= 250\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,40 - 0,25$
	PIR-LB/GF-UP, " $= 250\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,30 - 0,10$
** Hüllbauweise	PS-HS/Al, " $= 30\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,70 - 0,50$
	PS-HS/GF-UP, " $= 30\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,70 - 0,20$
	PS-LB/Al, " $= 600\text{ kg/m}^3$, $k' = 0,20 - 0,10$

	PUR-HS/GF-UP,	"	= 40 kg/m ³ , k' = 0,80 - 0,20
	PUR-HS/GF-UP,	"	= 70 kg/m ³ , k' = 0,70 - 0,15
	PUR-HS/GF-UP,	"	= 100 kg/m ³ , k' = 0,60 - 0,10
Hüll- bauw.	PUR-HS/GF-UP,	"	= 40 kg/m ³ , k' = 0,50 - 0,20
	PUR-HS/GF-UP,	"	= 70 kg/m ³ , k' = 0,50 - 0,20
Füll- bauw.	UP-LB/Al,	"	= 260 kg/m ³ , k' = 0,10 - 0,09
	UP-LB/GF-UP,	"	= 260 kg/m ³ , k' = 0,05 - 0,025

Die bei den Biegeversuchen gemessene Durchbiegung stimmt mit der rechnerischen gut überein.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen werden folgende Empfehlungen für Konstruktion und Berechnung von Sandwichelementen gegeben:

- a) Da die Zugfestigkeit der Randzone größere Streuungen unterliegt als die Zugfestigkeit des Stützkernes, sollte die Konstruktion so sein, daß der Bruch im Stirnabzugversuch im Kernbereich stattfindet.

Hinweise für die richtige Gestaltung können Ziff. 8 entnommen werden.

- b) Der Stützkern ist nur in der Lage, geringe Zugspannungen aufzunehmen. Mit Rücksicht auf das "Vorbeulen" sind grundsätzlich möglichst ebene Deckschichten zu verwenden. Wenn der Einsatz von Deckschichten, die "per Definition" nicht eben sind (z.B. GF-UP-Deckschichten, hergestellt im Hand- oder Faserspritzverfahren) unvermeidbar ist, muß die Randzone besonders sorgfältig ausgeführt werden.

Eine rechnerische Abschätzung des Vorbeulverhaltens kann wie in Ziff. 6.2.3 erfolgen (vgl. auch Ziff. 8)

- c) Viele gebräuchliche Stützkernwerkstoffe haben eine geringere Bruchdehnung als die infrage kommenden Deckschichten.

Es sollte der rechnerische Nachweis erbracht werden, daß die Sicherheit gegen "gerissene Zugzone" im Gebrauchszustand $\nu \geq 1,1$ ist.

	PUR-HS/St,	"	= 40 kg/m ³ , k' = 0,70 - 0,55
	PUR-HS/St,	"	= 70 kg/m ³ , k' = 0,80 - 0,65
	PUR-HS/St,	"	= 100 kg/m ³ , k' = 0,85 - 0,70
Füllbauweise	PUR-HS/Al,	"	= 40 kg/m ³ , k' = 0,80 - 0,65
	PUR-HS/Al,	"	= 70 kg/m ³ , k' = 0,80 - 0,65
	PUR-HS/Al,	"	= 100 kg/m ³ , k' = 0,80 - 0,65
	PUR-HS/GF-UP,	"	= 40 kg/m ³ , k' = 0,80 - 0,20
	PUR-HS/GF-UP,	"	= 70 kg/m ³ , k' = 0,70 - 0,15
	PUR-HS/GF-UP,	"	= 100 kg/m ³ , k' = 0,60 - 0,10
** Hüll- bauw.	PUR-HS/GF-UP,	"	= 40 kg/m ³ , k' = 0,50 - 0,20
	PUR-HS/GF-UP,	"	= 70 kg/m ³ , k' = 0,50 - 0,20
** Füll- bauw.	UP-LB/Al,	"	= 260 kg/m ³ , k' = 0,10 - 0,09
	UP-LB/GF-UP,	"	= 260 kg/m ³ , k' = 0,05 - 0,025

* nominal value

** ref. page 2

The deflection measured during the bending tests shows a good conformity with the calculated value.

Based on the present investigation the following recommendations can be given for the construction and calculation of sandwich structural elements:

- a) As the adhesion strength between faces and core is subject to more important dispersions than the tensile strength of the core, the sandwich structural element should be designed in a way that during the tensile test perpendicular to the faces failure will occur in the core zone.

More details as to the correct design are given in paragraph 8.

- b) The core is able to resist only to small tensile stresses. With regard to the initial irregularities it is recommended to use faces that are as smooth as possible. If it cannot be avoided to use faces that are not smooth according to their definition (i.e. GF-UP-faces manufactured by hand lay-up moulding or spray-up technics) much care must be taken when applying the faces.

The effect of initial irregularities may be calculated as described in paragraph 6.2.3. (see also par. 8).

- c) Many common core materials present a lower strain at failure than the faces in question.

It should be proved by calculation that the safety factor for "failure in

d) Die Versuche haben gezeigt, daß das Bruchbild einer Sandwichkonstruktion von der Temperatur abhängig sein kann. Bei niedrigen Temperaturen kann Werkstoffversagen und bei höheren Temperaturen Deck-schichtinstabilität maßgeblich sein. Grundsätzlich sind daher folgende Nachweise zu führen:

Festigkeits- und Stabilitätsnachweise bei der höchsten und der niedrigsten Gebrauchstemperatur.

Damit ist die Möglichkeit der "Umkehrung" des Bruchbildes berücksichtigt.

e) Bei der Konstruktion und beim Schäumen ist auf einwandfreie Entlüftung zu achten. Viele der untersuchten Proben wiesen große Luft-einschlüsse auf.

the zone of tension" is $\nu \geq 1,1$ (in the state of use).

d) The tests have shown that the characterization of failure of a sandwich construction may depend on temperature. At low temperatures the material may fail whereas at higher temperatures the instability of the faces may lead to failure. Therefore it is necessary to proceed to the analysis of the following:

Analysis of stress and stability at the highest and lowest temperature of use.

In that way the possibility of variation of the kind of failure is considered.

e) During construction and foaming a correct de-aeration must be assured. Many of the tested samples presented important air pockets.

Zeichenerklärung

In dieser Arbeit werden folgende Zeichen verwendet:

h	= Höhe des Sandwichelementes
l	= Spannweite des Sandwichelementes
l_f	= Meßlänge für die Durchbiegung
b	= Breite
t	= Dicke einer Deckschicht
c	= Dicke des Stützkernes
c'	= $c + 2 \cdot (t/2)$ "innerer Hebel"
I	= Trägheitsmoment
A	= Querschnittsfläche
ΣEI	= Biegesteifigkeit
M	= Biegemoment
M_B	= Biegemoment im Bruchzustand
F	= äußere Kraft
Q	= Querkraft
M_D	= Moment in einer Deckschicht infolge der schiefen Biegespannungsverteilung und der Schubverformung des Kernes
N_D	= Längskraft in der Deckschichtachse infolge M
N_{kr}	= kritische Längskraft in der Deckschichtachse infolge M_B
S	= Querbeanspruchung des Stützkernes infolge der Elementkrümmung und der Umlenkung von N_D
w_B	= Verformungskurve infolge Biegung
w_S	= Verformungskurve infolge Schub
R	= Krümmungsradius
f	= Durchbiegung
f_m	= gemessene Durchbiegung
f_B	= gemessene Durchbiegung im Bruchzustand
f_B'	= rechnerische Durchbiegung im Bruchzustand
a	= Länge einer halben Knitterwelle
n	= Anzahl der Halbwellen
W_o	= "Vorbeule" oder max. Amplitude
κ	= W_o/a
ω_o	= $\frac{\sigma_{kr}}{\sigma_{kr} - \sigma_{dD}}$
γ_K	= Rohdichte des Stützkernes
E_K	= E-Modul des Stützkernes \perp Deckschicht
E_{zK}	= Zug-E-Modul des Stützkernes \perp Deckschicht
E_{dK}	= Druck-E-Modul des Stützkernes \perp Deckschicht
G_K	= Schubmodul des Stützkernes

ν_K	= Querkontraktion des Stützkernes
σ_K	= Stützkernspannung
σ_{zK}	= Zugspannung des Stützkernes
σ_{dK}	= Druckspannung des Stützkernes
σ_{zBK}	= Zugfestigkeit \perp Deckschicht
σ_{dBK}	= Druckfestigkeit \perp Deckschicht
τ_K	= Schubspannung des Stützkernes
ϵ_K	= Dehnung des Stützkernes
ϵ_{zBK}	= Bruchdehnung des Stützkernes bei Zug
σ_{zB}	= Deckschichtabzugfestigkeit
ν_D	= Rohdichte der Deckschicht
E_D	= E-Modul der Deckschicht
E_{zD}	= Zug-E-Modul der Deckschicht
E_{dD}	= Druck-E-Modul der Deckschicht
ν_D	= Querkontraktion der Deckschicht
σ_D	= Deckschichtspannung
σ_{zD}	= Zugspannung der Deckschicht
σ_{dD}	= Druckspannung der Deckschicht beim Versagen des Sandwichelementes
σ_{dBD}	= Druckfestigkeit der Deckschicht
σ_{zBD}	= Zugfestigkeit der Deckschicht
σ_{kr}	= Knitterspannung der Deckschicht
ϵ_D	= Dehnung der Deckschicht
B_D	= $\frac{E_{dD} \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu_D^2)}$ Biegesteifigkeit der Deckschicht

Andere Abkürzungen:

PH	= Phenolharz
PIR	= Polyisocyanurat
PS	= Polystyrol
PUR	= Polyurethan
UP	= ungesättigtes Polyesterharz
LB	= Leichtbeton
HS	= Hartschaum
St	= Stahl
Al	= Aluminium
GF-UP	= glasfaserverstärktes ungesättigtes Polyesterharz
SAN	= Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat
AZ	= Asbestzement
Depot	= Depotverfahren (durchschäumte Randzonen)

1. Einleitung

Sandwichelemente sind Mehrschichtsysteme mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der einzelnen Schichten.

In dieser Arbeit werden dreischichtige ebene Sandwichelemente bestehend aus einem "Stützkern" zwischen zwei "Deckschichten", Bild 1, untersucht. Als "Randzone" wird die Verbindungsfuge zwischen Deckschicht und Stützkern bezeichnet.

Als Stützkern werden ausschließlich Kunststoffhartschäume mit oder ohne mineralischen Füllstoffen verwendet.

Die Deckschichten sind wesentlich dünner als der Stützkern und bestehen aus Stahl (St), Aluminium (Al), glasfaserverstärktem unges. Polyesterharz (GF-UP), Asbestzement (AZ) u.a..

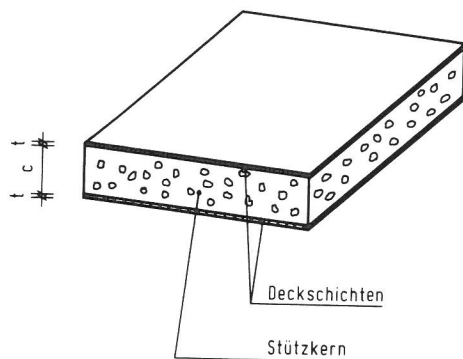


Bild 1
Aufbau eines symmetrischen Sandwichelementes

1.1 Herstellungsverfahren

Sanwichelemente können prinzipiell nach drei verschiedenen Verfahren hergestellt werden, vgl. Bild 2, [1], [2] und [3]:

a) Hüllbauweise

Bei diesem Verfahren wird der Kern vorgeschäumt. Auf den Kern wird das Deckschichtmaterial aufgeklebt (vgl. Bild 2a).

b) Füllbauweise

Bei diesem Verfahren wird der Zwischenraum zwischen den Deckschichten ausgeschäumt. Durch den Schäumvorgang wird gleichzeitig der Haftverbund zwischen Kern- und Deckschichten hergestellt. Für hochbeanspruchte Verbundkonstruktionen kommt nur "Druckverschäumung" in Stützformen in Frage, vgl. Bild 2b.

c) Depotverfahren

Dieses Verfahren könnte man unter b) einstufen. Man nutzt hier das Formgebungsvermögen des unter innerem Druck stehenden Hartschaum-Reaktionsgemisches aus. Der Schäumprozeß ist in der Aktivstufe in der Lage, einen spezifisch leichten Kern und eine glasfaserverstärkte Randzone in einem Arbeitsgang zu erzeugen. Dabei entsteht der Verbundwerkstoff Hartschaum/Glasfaser, der die Funktion der herkömmlichen GFK-Deckschichten (Polyester/Glasfaser, Epoxid/Glasfaser) übernimmt.

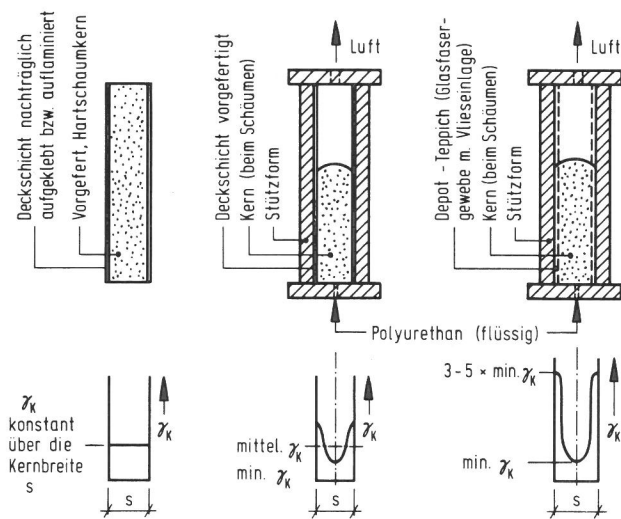


Bild 2
Herstellungsverfahren für Leichtbaukonstruktion
Als Beispiel: Stützkern aus Polyurethanhartschaum
Die Diagramme geben die prinzipielle Rohdichteverteilung über die Kernbreite an

a) Hüllbauweise b) Füllbauweise c) Depot-Verfahren

2. Ziel des Forschungsvorhabens

Für ein Sandwichelement unter reiner Biege- oder reiner Druckbeanspruchung bestehen grundsätzlich zwei Versagensmöglichkeiten:

a) Werkstoffversagen

Infolge Überschreitung der Werkstoff-Festigkeit der Deckschichten bricht das Element.

b) Knittern der gedrückten Deckschicht, Bild 3.

Deckschichten unter Druckbelastung verhalten sich im allgemeinen wie unendlich lange Platten auf elastischer Bettung [4], [6]. Das maßgebliche Bruchkriterium ist meistens das lokale Beulen, das sog. "Knittern", wobei die Deckschichten in einer Reihe kurzer sog. "Knitterwellen ausknicken.

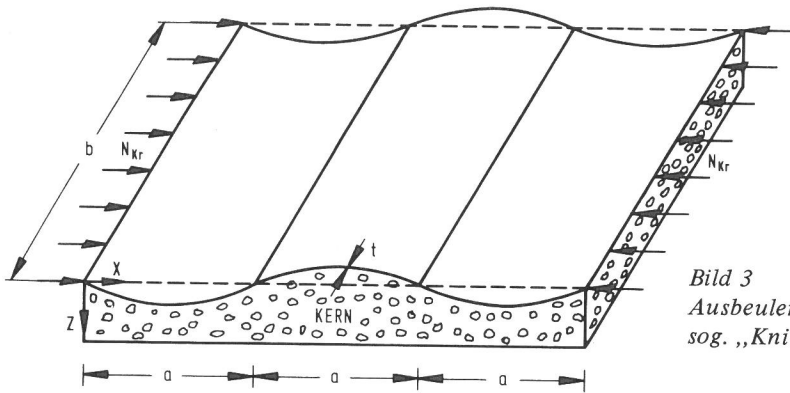


Bild 3
Ausbeulen der Deckschicht unter mittiger Längskraft N_{Kr} ,
sog. „Knittern“

Durch die in dichter Reihenfolge liegenden Knitterwellen treten in wechselnder Folge Zug- bzw. Druckkräfte auf der Kernoberfläche auf. Dabei tritt normalerweise der endgültige Bruch auf, indem die Zugfestigkeit der Verbindung zwischen Deckschicht und Stützkern überschritten wird.

Die Festigkeit dieser Zugverbindung ist somit entscheidend für die Güte der Sandwichkonstruktion.

Bei einer ebenen, unendlich langen und elastisch gestützten Deckschicht unter mittiger Längskraft beträgt die rechnerische Knitterspannung nach [3]:

$$\sigma_{kr} = 0,85 (E_{dD} \cdot E_{zK} \cdot G_K)^{1/3} \quad (1)$$

Darin bedeuten:

E_{dD} = Druck-E-Modul der Deckschicht

E_{zK} = Zug-E-Modul des Stützkernes

G_K = Schubmodul des Stützkernes

Wenn man die Beziehung

$$G_K = E_{zK} / 2,6 \quad (1) \quad (2)$$

eingführt, lautet die Knitterformel

$$\sigma_{kr} = 0,62 (E_{dD} \cdot E_{zK}^2)^{1/3} \quad (3)$$

Deckschichten und Stützkern wurden hierbei homogen und isotrop angenommen, die Ableitung der "Knitterformel" erfolgte für

$$1) G_K = \frac{E_{zK}}{2(1+\nu_K)} \quad \nu_K = 0,3$$

$$\nu_K \approx 0,3$$

und

$$\nu_D \approx 0,3$$

In Vorversuchen wurde festgestellt, daß die tatsächliche Knitterspannung, je nach Sandwichaufbau, in der Form

$$\sigma_{kr} = k \cdot 0,62 (E_{dD} \cdot E_{zK}^2)^{1/3} \quad (4)$$

ausgedrückt werden kann, wobei "k" ein Faktor der Größenordnung 0,02 - 1,20 ist.

Das Ziel der Arbeit besteht (a) in der Feststellung der Haftung zwischen Deckschicht und Kern

und

(b) in der Ermittlung des Faktors "k" der Gleichung (4) bei Variation von Schäumssystemen und Deckschichten.

Dieses Ziel wird durch die Auswertung einer großen Zahl von Stirnabzugversuchen (vgl. Ziff. 6.1) und Biegeversuchen (vgl. Ziff. 6.2) bei den Temperaturen + 20 °C, + 40 °C, + 60 °C und + 80 °C erreicht.

3. Grundformeln

3.1 Allgemeine Betrachtungen

Das Prinzip des ebenen Sandwichelementes ist grundsätzlich folgendes: Die Biegesteifigkeit des Stützkernes ist normalerweise gering gegenüber der Biegesteifigkeit der Deckschichten. Die Schubsteifigkeit des Stützkernes ist dagegen größer als die der Deckschichten. Bei einem Sandwichelement mit Querkrafteinfluß werden daher die Biegemomente überwiegend durch die Deckschichten übertragen, der Stützkern überträgt überwiegend die Schubkräfte (s. Bild 4).

|| In dieser Arbeit wird nur das Verhalten von Sandwichelementen unter querkraftfreier Biegung untersucht (s. Bild 5).

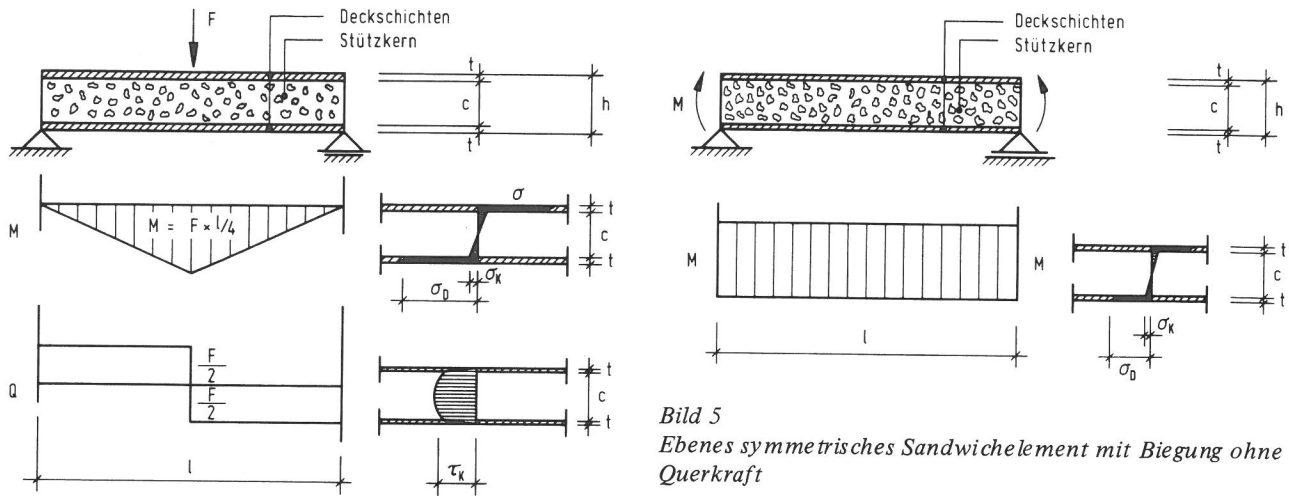


Bild 4
Ebenes symmetrisches Sandwichelement mit Biegung und Querkraft

Bild 5
Ebenes symmetrisches Sandwichelement mit Biegung ohne Querkraft

3.2 Beanspruchung bei Biegung und Schub

Wie im nachfolgenden dargestellt, ist die Steifigkeit des Stützkernes senkrecht zu den Deckschichten für die Ermittlung der Durchbiegung des Sandwichelementes ohne praktische Bedeutung, vgl. Ziff. 3.3.

Wie aus Ziff. 2 hervorgeht, spielt jedoch die Quersteifigkeit des Stützkernes bei der Ermittlung der "Knitterlast" eine entscheidende Rolle.

Die Steifigkeit des Stützkernes parallel zu den Deckschichten ist, verglichen mit der Steifigkeit der Deckschichten, normalerweise gering. In dieser Arbeit werden daher die Längsspannungen im Stützkern vernachlässigt.¹⁾

Die Deckschichten übertragen somit das Moment allein. Da die Schubsteifigkeit der Deckschichten praktisch vernachlässigbar ist, nimmt der Stützkern die Schubkraft auf.

Der grundsätzliche Unterschied zwischen einem Sandwichbalken und einem Balken in konventioneller Bauart ist, daß die Schubspannung im Stützkern des Sandwichbalkens wegen des geringen Schubmoduls des Stützkernes nicht vernachlässigt werden kann. Gegebenenfalls kann der Durch-

1) Ausnahme: Wenn der Beitrag des Stützkernes zur Gesamtbiegesteifigkeit, ΣEJ (vgl. Ziff. 6.2.1), 5 % übersteigt, wird die Steifigkeit des Stützkernes berücksichtigt.

biegungsanteil aus Schub größer als der Anteil infolge Biegung werden.

Unter der Annahme, daß $\sigma_K = 0$ folgt, daß die Schubspannung τ_K praktisch konstant über die Querschnittshöhe und somit der Gleitwinkel τ_K/G_K unabhängig von z ist.

Unter einer Last, bestehend aus Moment M und Schubkraft Q , verformt sich ein Sandwichelement gemäß Bild 6c. Bild 6a zeigt die Verformung (Krümmung der Verformungslinie = w_B'') infolge reiner Biegung - als wenn die Schubsteifigkeit des Stützkernes unendlich steif wäre, Bild 6b zeigt die Schubverformung (Krümmung der Verformungslinie = w_S'') des Kernes. Bei konstanter Schubkraft ist die Schubverformungslinie eine Gerade, also $w_S'' = 0$. Normalerweise ist die Schubkraft eine Funktion von x , also $w_S'' \neq 0$.

Nach "Plantema" [6] betragen somit das Biegemoment jeder einzelnen Deckschicht

$$M_D = \frac{1}{12} E_D \cdot t^3 (w_B'' + w_S'') \quad (5)$$

und die Längskraft

$$N_D = \frac{1}{2} \cdot E_D \cdot t (c + t) w_B'' \quad (6)$$

Das äußere Biegemoment beträgt

$$M = N_D (c + t) + 2 \cdot M_D \quad (7)$$

In Bild 7 sind die Schnittkräfte einzeln dargestellt.

Es kann gezeigt werden, daß bei "praxisgerechten" Sandwichelementen, also mit Deckschichtdicke/Stützkernstärke

$$\frac{t}{c} < \frac{1}{20}$$

und Gesamtdurchbiegung

$$f < \frac{1}{200}$$

M_D ohne Bedeutung ist und verglichen mit den ohnehin vorhandenen Deckschichtungenauigkeiten ("Vorbeulen", vgl. Ziff. 3.4) vernachlässigt werden kann.

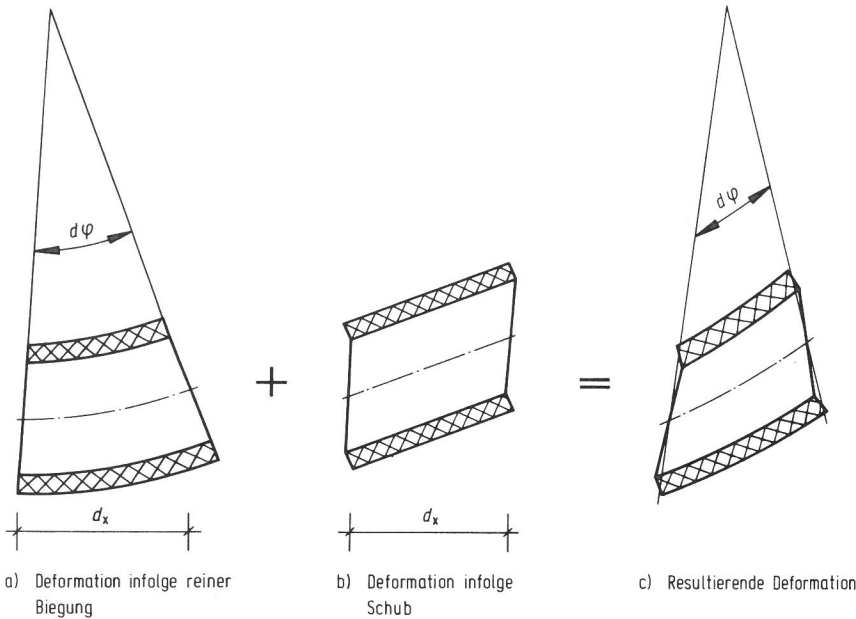


Bild 6
Deformation eines Sandwichelementes

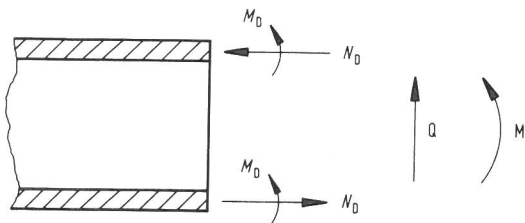


Bild 7
Schnittkräfte in einem Sandwich-Querschnitt

3.3 Deformation des Stützkernes senkrecht zu den Deckschichten

Vgl. Bild 8

Ein Sandwichelement unter Biegebeanspruchung wird deformiert mit der Krümmung

$$w'' \approx -\frac{1}{R} \quad (8)$$

R ist der Radius der Verformungskurve.

Geht man von der vereinfachten aber in den meisten Fällen zutreffenden Annahme aus, daß das Moment M von den Deckschichten allein aufgenommen wird, beträgt die Längskraft der Deckschicht

$$N_D = \frac{M}{c'} \quad (9)$$

Die Normalkraft im Stützkern infolge der Elementkrümmung beträgt

$$S = N_D \cdot w'' \quad (10)$$

Unter den angenommenen Lastverhältnissen wird der Stützkern zusammengedrückt, im Prinzip reduziert sich die Höhe des Sandwichelementes, das Biegeproblem ist m.a.W. nicht linear. Falls das Element durch Gleich- oder Einzellasten beansprucht wird, entsteht eine zusätzliche Querdeformation.

Viele Autoren sind diesem Problem nachgegangen und zu dem Schluß gekommen, daß die Querdeformierbarkeit des Stützkernes bei einer Biegebeanspruchung ohne praktische Bedeutung ist, vgl. [7] und [8]. Andere [9] und [10] haben das Problem des Gesamtbeulens von Sandwichelementen untersucht und sind zum selben Ergebnis gekommen.

In dieser Arbeit wird daher die Querverformung des Sandwichelementes unter Biegebeanspruchung vernachlässigt.

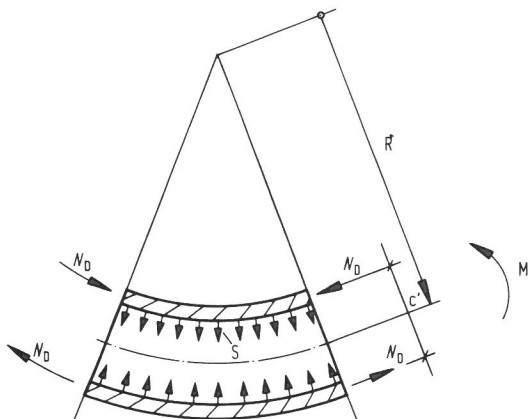


Bild 8
Zusatzbeanspruchungen im Kern bei Biegeverformung des Sandwichelementes

3.4 Das "Knittern" bei einer anfänglichen Deckschichtaußermittigkeit

- das "Vorbeulen" -

In den bisherigen Abschnitten wurde von völlig ebenen Deckschichten ausgegangen.

Die baupraktische Erfahrung lehrt uns, daß es diesen Idealzustand nicht gibt. Jedes Bauteil, sei es noch so genau gefertigt, enthält ungewollte, meist fertigungsbedingte Außermittigkeiten.

Dies bedeutet, daß grundsätzlich jede planmäßig mittig

angreifende Last mit einem Moment zunächst unbekannter Größe zu kombinieren ist.

Bei einer absolut ebenen Deckschicht unter mittiger Druckbelastung bleibt der Stützkern unbelastet bis zum Erreichen der Knitterlast. Erst mit Bildung der Knitterwellen treten die Festhaltekräfte in der Form von Zug- oder Druckbeanspruchung in der Verbindungsfuge zwischen Deckschicht und Stützkern in Aktion. In diesem Falle braucht der Stützkern nur eine Steifigkeit, jedoch keine Festigkeit aufzuweisen.

In der Praxis hat jede Deckschicht eine gewisse Vorkrümmung, die unter dem Einfluß der mittig eingeleiteten Längskraft zu einer Zug- oder Druckbelastung in der Verbindungsfuge zwischen Deckschicht und Stützkern führt. In diesem Falle braucht der Stützkern sowohl Steifigkeit als auch Festigkeit, um seine Stützkernfunktion sicherstellen zu können.

Bei Sandwichelementen mit "Vorbeulen" (und das ist die Regel) wird die Beulamplitude mit zunehmender Last zunehmen. Bruch erfolgt entweder durch zu hohe Biegebeanspruchungen der Deckschichten (M_D , N_D , vgl. Bild 7) oder infolge Überschreitung der Zugfestigkeit in der Fuge zwischen Deckschicht und Stützkern. Hierbei wird meistens nicht die theoretische Knitterspannung nach Gleichung (3) erreicht.

Das Knitterproblem bei vorgebeulten Deckschichten haben mehrere Autoren untersucht, so z. B. [11], [12], [13] und [5]. Das wichtigste Ergebnis der Untersuchung von "Williams" [5] wird hier wiedergegeben.

3.4.1 Vorbeulen nach "Williams"

Die Ableitung der "Knitterformel" (Gl. (2)) erfolgte unter der Annahme einer sinusförmigen Verformung der Deckschicht

$$w = W \cdot \sin \frac{n \pi x}{l} \quad (11)$$

Bis zum Erreichen der Knitterspannung ist W gleich Null.

Bei "Knittern" mit Vorbeulen wird W durch $W - W_0$ ersetzt. W_0 ist die Amplitude bei der Spannung Null. Nach Williams ist

$$\omega = \frac{W}{W_0} = \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_{kr} - \sigma_{dD}} \quad (12)$$

σ_{kr} ist die Knitterspannung einer ebenen Deckschicht entsprechend der kritischen Wellenlänge,

Weiterhin ergeben sich die Spannungen zwischen Deckschicht und Stützkern zu

$$\sigma_K = \frac{n \cdot \pi \cdot W_0}{l} \cdot (\omega - 1) \sqrt{(G_K \cdot E_{zK})} \quad (13)$$

und

$$\tau_K = \frac{n \cdot \pi \cdot W_0}{l} \cdot (\omega - 1) \cdot (G_K) \quad (14)$$

Unter der Annahme

$$\frac{W_0}{l/n} = \text{konstant}$$

sind die Spannungen direkt proportional $(\omega - 1)$. Sie sind am größten, wenn die Wellenlänge l/n die kritische ist.

Also:

$$a = l/n$$

Das maximale Biegemoment infolge Vorbeulens beträgt

$$M_D = B_D \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right) \quad (15)$$

$$= - \frac{n^2 \cdot \pi^2}{l^2} \cdot (\omega - 1) W_0 \cdot B_D \quad (16)$$

In praktisch vorkommenden Fällen ist Deckschichtversagen infolge Biegespannungen (M_D) nicht zu erwarten.

3.5 Weitere Gesichtspunkte zum Thema "Knittern"

3.5.1 "Randzoneneffekt"

Eine bekannte Erscheinung bei Sandwichelementen mit Kunststoffhartschaumkernen hergestellt in der sog. Füllbauweise, Bild 2b, ist die Zunahme der Rohdichte zu den Randzonen hin. Umfangreiche Messungen wurden von Langlie [3]

durchgeführt (vgl. Bild 9). Reutter [14] versuchte den Einfluß der Dichtesteigerung auf theoretischem Wege zu klären. Es ist zu erwarten, daß die tatsächliche Knitterspannung bei derartigen Stützkernen höher liegt als die eines Sandwichelementes mit einem homogenen Stützkern mit demselben Durchschnittsgewicht. In Versuchen wurde eine Tragfähigkeitssteigerung bis zu 16 % festgestellt [15].

Da die reproduzierbare Herstellung der Dichtesteigerung z.Z. nicht zuverlässig möglich ist, wird in dieser Arbeit nur mit dem mittleren E-Modul, gemessen über die gesamte Stützkerndicke, gearbeitet.

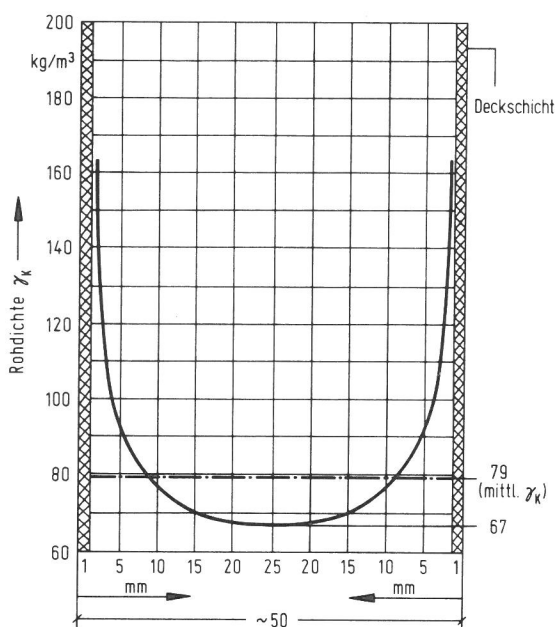


Bild 9
Rohdichteverteilung über die Stützkerndicke [3] bei Füllbauweise
Beispiel: PUR-Hartschaum

3.5.2 Nichtsinusförmiges "Knittern"

Goodier [16] und Goodier und Hsu [17] stellten fest, daß "nichtsinsusförmiges Knittern" bei weitaus niedrigeren Lasten auftreten kann als sinusförmiges Knittern. Sie zeigten, daß, wenn gedrückte Deckschichtränder nicht gegen Verschiebung gesichert werden, lokale Deformationen nahe diesen Rändern entstehen können. Die dazugehörigen kritischen Lasten können halb so groß wie die Knitterspannung gemäß Gl. (1) sein.

Es ist zu erwarten, daß diese Situation in der Praxis nicht auftreten wird, da die meisten Sandwichelemente mit konstruktiv bedingten Randabschlüssen versehen sind.

3.5.3 Destabilisierung der Deckschichten infolge Druckspannungen im Stützkern _ _ _ _ _

Der Stützeffekt des Stützkernes auf die Deckschicht ist bestimmt durch das Verhältnis zwischen Spannungen und Deformation in der Verbindungsfuge und insofern wegen der Querkontraktion auch durch die anteilige Druckspannung im Stützkern.

|| Goodier und Neou kamen zu dem Ergebnis, daß die anteilige Druckspannung im Kern keinen Einfluß auf die "Knitterspannung" hat, vgl. [18] und [19].

4. Sandwichsysteme¹⁾

Die Auswahl der Sandwichsysteme erfolgte in Zusammenarbeit mit folgenden Firmen:

BASF AG, Ludwigshafen

Bayer AG, Leverkusen

Bayer AG, Uerdingen

Hoechst AG, Hamburg

Die Systeme sind nach Meinung der Beteiligten als optimal und praxisgerecht anzusehen.

Eine Übersicht über die untersuchten Sandwichsysteme gibt die Tabelle 1

Diese Proben wurden in den Labors der Anwendungstechnischen Abteilungen der o. g. Firmen hergestellt.

1) In Abschnitt 4 sind alle Angaben über die Rohdichte γ_K Sollwerte.

System Nr.	Stützkern		Deck-schicht	Herstellungs-verfahren	Her-steller
	Bezeich-nung	$\gamma_{K,Soll}$ (kg/m ³)			
4.1	PH-LB	250,450	~ 1 mm GF-UP	Füllbauweise	Hoechst AG
4.2	PIR-LB	250	~ 0,7 mm St	Füllbauweise	Bayer AG
	"	250	~ 1 mm Al	"	"
	"	250	~ 2 mm GF-UP	"	"
	"	250	~ 6 mm AZ	"	"
4.3	PS-HS	30	~ 1 mm Al	Hüllbauweise	BASF AG
	"	30	~ 2 mm GF-UP	"	"
4.4	PS-LB	600	~ 1 mm Al	Hüllbauweise	
4.5	PUR-HS	40,70,100	~ 0,7 mm	Füllbauweise	Bayer AG
	"	40,70,100	~ 1 mm Al	"	"
	"	40,70,100	~ 2 mm GF-UP	"	"
	"	40,70,100	~ 6 mm AZ	"	"
	"	40,80	~ 2,5 mm SAN	"	BASF AG
	"	40,70	~ 2 mm GF-UP	Hüllbauweise	Bayer AG
	"	100	GG163 VD2007	Depot	"
	"	100	GG400 VD2007	Depot	"
4.6	UP-LB	260	~ 0,8 mm Al	Füllbauweise	Bayer AG
	"	260	~ 1,5 mm GF-UP	"	"
	"	260	~ 5 mm AZ	"	"
	"	260	450g/m ² Glas-fasermatte angeschäumt	Depot	"

Tabelle 1
Gesamtübersicht der Sandwichsysteme

4.1 Stützkern PH - LB

4.1.1 Übersichtstabelle

1	2	3	4	5	6	7	8
System	Gesamt-dicke mm	Stützkern, PH - LB			Deckschichten ¹⁾		
		$\gamma_{K,Soll}$ (kg/m ³)	Re-zeptur	Schäum-ver-fahren	Werk-stoff	Ober-fläche	Dicke t _{soll} (mm)
4.1.1.1	150	250	PH 1	"Füll-bau-weise"	GF-UP Alpolit UP 303 100 GT MEKP (50%-ig) 2 " Co-Lösung (1%-ig) 0,3 GT 450 g/m ² Glasseidenmatte	Schaum-seite vor dem Aus-härten, also noch im "nas-sen" Zu-stand, me-chanisch auf-ge-rahrt	1,0
4.1.1.2	150	450	PH 2	"			

Tabelle 2
Übersicht der Sandwichsysteme mit
PH-LB-Stützkern

Fertigungsraumtemperatur: 20 - 23 °C

Herstellung : Hoechst AG, Hamburg

1) Feinschicht:

Alpolit UP 325	100 Gew.Tle
MEKP (50%-ig)	2 "
Co-Lösung (1%-ig)	1 "

4.1.2 Stützkern - Rezepturen

4.1.2.1 Rezeptur PH 1

Phenolharzschaum, gefüllt mit Siliperl

Die angestrebte Trockendichte liegt bei 230-250 kg/m³
Der Schaumkern besteht aus:

Siliperl (Körnung 10-30 mm)	ca.	130 l
Phenodur SPR 919		17 kg
n Pentan		650 ml
Phenol-4-Sulfonsäure		1 kg

4.1.2.2 Rezeptur PH 2

Phenolharzschaum, gefüllt mit Blähton

Die angestrebte Trockendichte liegt bei 430-450 kg/m³

Blähton (Körnung 10-20 mm)	ca.	130 l
Phenodur SPR 919		17 kg
n Pentan		600 ml
Phenol-4-Sulfonsäure		1 kg

4.1.3 Verfahrensbeschreibung

Die Prüfkörper wurden in einer Stahlblechform bei 60 °C aufgeschäumt und ausgehärtet.

Die Beheizung der Form auf die o. g. Temperatur wurde durch in die oberen und unteren Deckplatten eingebaute elektrische Flächenheizleiter (Heizfolien) vorgenommen. Die Anlage besitzt eine Schutzstromschalter-Einrichtung, um eventuelle Kurzschlüsse auszuschließen.

Die Fertigung der Platten wurde nach dem folgenden Arbeitsgang durchgeführt:

- 1) Aufheizung der leeren Form auf 60 °C
- 2) Einlegen der unteren GFK-Deckschicht in die geöffnete Stützform
- 3) Einfüllen des Füllstoffes; ca. 90 % des gesamten, auszuschäumenden Volumens wird mit dem perlförmigen Füllstoff befüllt.
- 4) Zusammenrühren des Reaktionsharzgemisches in der folgenden Reihenfolge:
 - a) Phenodur SPR 919
 - b) n Pentan (Treibmittel)
 - c) Phenol-4-Sulfonsäure (Härter)
- 5) Eingießen des Reaktionsharzgemisches in die Form
- 6) Auflegen der oberen GFK-Deckschicht
- 7) Schließung der Form durch Auflage und Befestigung der oberen Deckplatte
- 8) Das Entformen erfolgte nach 120 Minuten. Hierfür wurden die mit Keilen befestigten beiden Deckplatten entfernt und der aus zwei Hälften bestehende Rahmen auseinandergezogen.

Um eine Haftung des Schaumstoffes an der Form zu vermeiden, wurde diese nach jedem Entformvorgang mit dem Trennmittel Mold Wiz RT 2 A der Firma E. und P. Würtz in 6531 Sponsheim behandelt.

4.2 Stützkern PIR - LB

4.2.1 Übersichtstabelle

1	2	3	4	5	6	7	8
System	Gesamt- dicke mm	Stützkern, PIR - LB			Deckschichten		
		$\gamma_{K, Soll}$ (kg/m ³)	Re- zep- tur	Schäum- ver- fahren	Werk- stoff	Ober- fläche	Dicke t_{soll} (mm)
4.2.1.1	50	250	PIR	"Füllbauweise"	St 37 (kaltge- walzt)	wie Ziff. 4.5.1	0,7
4.2.1.2	50	250	PIR		AlMgSi 0,5 F22	wie Ziff. 4.5.2	1,0
4.2.1.3	50	250	PIR		GF-UP Leguval W16 (Sun- getemp. Glas 2x 450g/m ²)	wie Ziff. 4.5.3	2,0
4.2.1.4	50	250	PIR		AZ	wie Ziff. 4.5.4	6,0

Tabelle 3
Übersicht der Sandwichsysteme mit
PIR-LB-Stützkern

Fertigungsraumtemperatur : 20 - 23 °C

Herstellung : Bayer AG, Leverkusen

4.2.2 Stützkern - Rezeptur

Sie besteht aus:

33 Gew.Tln. Polyol-Gemisch
2,5 " " Aktivator-Gemisch
15 " " R 11

= 50,5 Gew.Tle. vorgemischtes Material, welches mit
einem Gemisch aus

100 Gew.Tln. Desmodur Versuchsprodukt DD 1646 und
10 " " R 11

= 110 Gew.Tle. verschäumt wurde.

Auf der HK 245 ergaben sich die Reaktionszeiten zu:

Startzeit: 15 sec
Abbindezeit: 77 sec
Steigzeit: 118 sec
Klebfreizeit: 120 sec

Rohdichte, frei: 25 kg/m³
Rohdichte, eingefüllt: 80 kg/m³

4.2.3 Verfahrensbeschreibung

In eine Form wurden zunächst die untere Deckschicht und der Rahmen eingelegt. Dann wurde Blähglasgranulat eingeschüttet, die obere Deckschicht aufgelegt und die Form geschlossen.

Das Reaktionsgemisch wurde durch ein mittig liegendes, gelochtes PVC-Rohr eingetragen. Die Formtemperatur betrug 40-45 °C.

Es entstand ein Sandwich-Körper mit einem Kern aus Blähglas, das mit Schaumstoff auf Basis Polyisocyanurat (PIR) gebunden ist.

4.3 Stützkern PS - HS

4.3.1 Übersichtstabelle

1	2	3	4	5	6	7	8
System	Gesamtdicke mm	Stützkern, PS - HS			Deckschichten		
		$\gamma_{K,Soll}$ (kg/m ³)	Rezeptur	Schaumverfahren	Werkstoff	Oberfläche	Dicke t_{soll} (mm)
4.3.1.1 PS-HS 1	50	30	-	"Hüllbauweise"	AlMgSi 0,5 F22	metallisch blank entfettet	1,0
4.3.1.2 PS-HS 2	50	30	-	"Hüllbauweise"	GF-UP	trocken, staub- u. fettfrei	2,0

Tabelle 4
Übersicht der Sandwichsysteme mit
PS-HS-Stützkern

Fertigungsraumtemperatur : 20 - 23 °C
Herstellung : BASF AG, Ludwigshafen

4.3.2 Stützkern - Rezepturen

Gemäß Merkblatt der BASF AG

4.3.3 Verfahrensbeschreibung

Nach Angabe des Herstellers der Prüfkörper - BASF AG, 6700 Ludwigshafen - wurden Deckschicht und Kern mit einem "handelsüblichen" PUR-Kleber, der mit einem Zahnpachtel auf die trockene, staub- und fettfreie Oberfläche der Deckschichten aufgebracht wurde, verbunden.

Die Verklebung erfolgte bei Raumtemperatur und ohne Druck. Die Prüfmuster wurden nach der Verklebung lediglich gestapelt.

4.4 Stützkern PS-LB

4.4.1 Übersichtstabelle

1	2	3	4	5	6	7	8
System	Gesamtdicke (mm)	Stützkern, PS - LB			Deckschichten		
		$\gamma_{K, \text{Soll}}$ (kg/m ³)	Rezeptur	Schäumverfahren	Werkstoff	Oberfläche	Dicke t _{Soll} (mm)
4.4.1.1	80	600	-	"Hüllbauweise"	Al	keine Angabe	1,0

Tabelle 5
Übersicht der Sandwichsysteme mit PS-LB-Stützkern

Fertigungstemperatur: --

Herstellung : BASF AG, Ludwigshafen

4.4.2 Stützkern - Rezepturen

Keine Angabe

4.4.3 Verfahrensbeschreibung

Keine Angabe, vermutlich Hüllbauweise

4.5 Stützkern - PUR-HS

	1	2	3		4	5	6		7	8										
			γ_K (kg/m ³)	Rezeptur			Stützkern PUR - HS	Deckschichten												
	System	Gesamtdicke (mm)					Werkstoff	Oberfläche		Dicke t _{Soll}										
4.5.1	4.5.1.1	50	40	PUR 1	"Füllbauweise" diskontinuierlich (one shot)	St 37 kaltgewalzt	metallisch blank, entfettet. Schaumseitig EC 1357 (3 M-Company)		0,7											
	4.5.1.2		70	PUR 3																
	4.5.1.3		100	PUR 3																
4.5.2	4.3.2.1	50	40	PUR 1						AlMgSi 0,5 F 22	metallisch blank, entfettet. Schaumseitig EC 1357 (3 M-Company)		1,0							
	4.5.2.2		70	PUR 3																
	4.5.2.3		100	PUR 3																
4.5.3	4.5.3.1	50	40	PUR 1										GF-UP, Leguval W 16 [®] Glas: 2x450g/m ²	schaumseitig aufgeraut		2,0			
	4.5.3.2		70	PUR 3																
	4.5.3.3		100	PUR 3																
4.5.4	4.5.4.1	50	40	PUR 1														AZ	schaumseitig entstaubt	
	4.5.4.2		70	PUR 3																
	4.5.4.3		100	PUR 3																
4.5.5	4.5.5.1	50	40	ohne Angabe	SAN, Luran S [®]	gesäubert, Haftvermittler		2,5												
	4.5.5.2		80																	
4.5.6	4.5.6.1	50	40	PUR 4					"Hüllbauweise"	wie Ziff.4.5.3		2,0								
	4.5.6.2		70	PUR 5																
4.5.7	4.5.7.1	50	100	PUR 2									"Depotverfahren"	GG 163 VD2007						
	4.5.7.2		100	PUR 2																

Fertigungsraumtemperatur: 20 - 23 °C

1) Herstellung : Bayer AG, Leverkusen

2) Herstellung : BASF, Ludwigshafen

Tabelle 6

Übersicht der Sandwichsysteme mit PUR-HS-Stützkern

4.5.8 Stützkern - Rezepturen

Rezeptur PUR 1

Sie besteht aus:

100	Gew.Tln.	Polyol-Gemisch (FWFA/O)
35	" "	R 11
1,6	" "	Aktivator (Desmorapid PP)

= 136,5 Gew.Tle. vorgemischtes Material, welches mit
110 Gew.Tln. 44 V 20 (Desmodur 44 V 20) verschäumt
wurde.

Es ergeben sich mit der Hochdruck-Verdüngsmaschine Typ
HK 245 der Fa. Hennecke folgende Reaktionszeiten:

Startzeit:	14 sec
Abbindezeit:	125 sec
Steigzeit:	170 sec
Klebfreizeit:	170 sec
Rohdichte, frei:	25 kg/m ³
Rohdichte, eingefüllt:	40 kg/m ³
Deckschichttemperatur:	40 - 45 °C

Rezeptur PUR 2

100	Gew.Tle.	Polyol-Gemisch (FWFA/O)
30	" "	R 11
1,6	" "	Aktivator (Desmorapid PP)

= 131,6 Gew.Tle. vorgemischtes Material, welches mit
110 Gew.Tln. 44 V 20 (Desmodur 44 V20) verschäumt
wurde.

Auf der HK 165 ergeben sich die Reaktionszeiten zu:

Startzeit:	14 sec
Abbindezeit:	114 sec
Steigzeit:	155 sec
Klebfreizeit:	160 sec
Rohdichte, frei	29 kg/m ³
Rohdichte, eingefüllt:	100 kg/m ³
Deckschichttemperatur:	40 - 45 °C

Rezeptur PUR 3

100	Gew.Tle.	Polyol-Gemisch (Desmophen FWFA/O)
20	" "	R 11
1,6	" "	Aktivator (Desmorapid PP)

= 121,6 Gew.Tle. vorgemischtes Material, welches mit
110 Gew.Tln. 44 V 20 (Desmodur 44 V 20) verschäumt
wurde.

Auf der HK 245 ergaben sich die Reaktionszeiten zu

Startzeit:	13 sec
Abbindezeit:	92 sec

Steigzeit: 120 sec
Klebfreizeit: 140 sec
Rohdichte, frei: 36 kg/m³
Rohdichte, eingefüllt: 70 kg/m³ bzw. 100 kg/m³
Deckschichttemperatur: 40 - 45 °C

Rezeptur PUR 4

100	Gew.Tle.	Polyol-Gemisch (Desmophen FWFA/O)
20	" "	R 11
0,8	" "	Aktivator (Desmorapid PP)

= 120,8 Gew.Tle. vorgemischtes Material. 6,3 kg dieses Materials wurden mit 5,5 kg Desmodur 44 V 40 $\hat{=}$ 105 Gew.Tln. mit einem Rührer 30 sec lang vermischt und dann in einer Blockform zu einem Block von 1,05 x 1,05 m² Grundfläche verschäumt. Aus diesem Block wurden Platten geschnitten.

Die Reaktionszeiten waren wie folgt:

Startzeit: 70 sec
Abbindezeit: 250 sec

Die Rohdichte des frei aufgeschäumten Blockes betrug 41 kg/m³. Auf zwei Holzplatten wurde zunächst Trennmittel, dann Gelcoat und schließlich 2 Lagen Glasmatte à 450g/m² mit ungesättigtem Polyesterharz (Leguval W 16) aufgebracht.

Zwischen die noch nassen Schichten wurde die Schaumstoffplatte eingelegt und mit Hilfe von Schraubzwingen verpreßt.

Rezeptur PUR 5

100	Gew.Tle.	Polyol-Gemisch (Desmophen FWFA/O)
6	" "	R 11
0,7	" "	Aktivator (Desmorapid PP)

= 106,7 Gew.Tle. vorgemischtes Material. 7,6 kg dieses Materials wurden mit 7,4 kg Desmodur 44 V 20 $\hat{=}$ 105 Gew.Tln. mit einem Rührer 40 sec lang vermischt und dann in einer Blockform von 1,05 x 1,05 m² Grundfläche verschäumt. Aus diesem Block wurden Platten geschnitten.

Die Reaktionszeiten waren wie folgt:

Startzeit: 90 sec
Abbindezeit: 290 sec

Die Rohdichte des frei aufgeschäumten Blocks betrug 73 kg/m³. Die Herstellung der Muster erfolgte wie bei Rezeptur 4.

4.6 Stützkern UP - LB

4.6.1 Übersichtstabelle

1	2	3	4	5	6	7	8
System	Gesamtdicke mm	Stützkern, UP - LB			Deckschichten		
		γ_K, Soll (kg/m^3)	Rezeptur	Schäumverfahren	Werkstoff	Oberfläche	Dicke t_{soll} (mm)
4.6.1.1	150	260	UP	"Füllbauweise"	AlMgSi 0,5 F22	metallisch blank, entfettet Randzonenarmierung: Glasseidenmatte 225 g/m^2 angeklebt	0,8
4.6.1.2	150	260	UP	"Füllbauweise"	GF-UP mit 450 g/m^2 Glasseidenmatte	Randzonenarmierung: Glasseidenmatte 225 g/m^2 vor dem Aushärten des Laminats ange- rollt	1,5
4.6.1.3	150	260	UP	"Füllbauweise"	AZ	entstaubt, Randzonenarmierung: Glasseidenmatte 225 g/m^2 angeklebt	5,0
4.6.1.4	150	260	UP	"Depot"	450 g/m^2 Glasseidenmatte		

Tabelle 7
Übersicht der Sandwichsysteme mit
UP-LB-Stützkern

Fertigungsraumtemperatur: 20 - 23 °C
Herstellung : Bayer AG, Uerdingen

4.6.2 Stützkern - Rezeptur

Bindemittel bestehend aus:

100 Gew.Tle. Leguval SF 31
7,5 " Treibmittel L E
15 " Baymidur 88 v.h.
1,5 " Wasser
2-3 " Bp-Pulver (50%-ig)
8 " Antimontrioxyd

mit rechnerischer Rohdichte $\approx 100 \text{ kg/m}^3$

Füllstoff bestehend aus Siliperl (Blähglas) der Körnung
10 - 30 mm und Schüttgewicht 130 - 140 kg/m^3 .

Hersteller: Deutsche Isolierstoff GmbH, Dortmund

4.6.3 Verfahrensbeschreibung

In Holzformen mit den Abmessungen $l \times b \times h = 130 \times 100 \times 15 \text{ cm}^3$ wurden vorgefertigte Deckschichten aus Al, GF-UP oder AZ bzw. Glasfasermatten (450 g/m^2) auf den Forminnenseiten fixiert.

Die Form wurde auf die Längsseite senkrecht aufgestellt und mit Blähglas gefüllt. Das Blähglas wurde durch Klopfen der Formseiten leicht eingerüttelt. Anschließend Übergießen der Harzmischung und Schließen der Form.

5. Versuchsdurchführung

Nachdem zunächst ein provisorischer Plan für die Durchführung des Forschungsvorhabens aufgestellt worden war, wurde dieser an Rohstoffhersteller und Verarbeiter von Schaumkunststoffen mit der Bitte um Stellungnahme verschickt. Es kam daraufhin zu Kontaktgesprächen mit den "Anwendungstechnischen Abteilungen" verschiedener Großfirmen, in deren Verlauf die Bearbeiter des Vorhabens zahlreiche Informationen über Möglichkeiten und Anwendungsgrenzen einzelner Schaumsysteme und wichtige Hinweise bezüglich einer praxisgerechten Versuchsplanung erhielten.

Die Auswahl der unter 4. vorgestellten Sandwichsysteme hat sich aufgrund ausführlicher Gespräche mit Vertretern der Anwendungstechnischen Abteilungen der Chemischen Großindustrie, d. h. also mit den Herstellern der Ausgangsprodukte für die Schaumkunststoffe der Kernmaterialien, herauskristallisiert. Von der Vielzahl der Möglichkeiten wurden diese Kombinationen von Kern- und Deckschichtmaterialien als z. Z. optimal, praxisbezogen und auch realisierbar angesehen.

Sämtliche bei den Versuchen verwendeten Proben wurden dann auch nach den in 4. angegebenen Herstellungsverfahren und Rezepturen unter Laborbedingungen von den betreffenden Großfirmen selbst gefertigt. Die Prüfungen wurden in der Fachgruppe 2.2 - Tragfähigkeit der Baukonstruktionen - der Bundesanstalt für Materialprüfung in Berlin durchgeführt.

Hauptpunkte des umfangreichen Versuchsprogramms waren die Ermittlung der Haftfestigkeit zwischen Deckschicht und Kern und die Bestimmung der praktisch erreichbaren Knitterspannung in druckbeanspruchten Deckschichten bei den einzelnen Sandwichsystemen für Umgebungstemperaturen bis zu maximal 80 °C. Parallel dazu waren jeweils eine ganze Reihe weiterer für die Auswertung dieser Versuche wichtiger Daten und Kennwerte festzustellen. Im einzelnen waren das:

Abmessungen der Proben,
Deckschicht- und Kerndicken,
Rohdichte des Kunststoffschäumkerns,
Elastizitätsmodul des Kunststoffschäumkerns,
Zug- und Druckfestigkeit des Kunststoffschäumkerns,
Elastizitätsmodul der Deckschicht und
Druckfestigkeit der Deckschicht.

Wegen der Temperaturabhängigkeit der Festigkeiten und E-Moduln bei Kunststoffen mußten diese Werte ebenfalls für verschiedene Umgebungstemperaturen ermittelt werden.

Mit den Hauptversuchen des Versuchsprogramms konnte erst gegen Ende des Jahres 1974 begonnen werden, da sich die Prüfkörperherstellung verzögert hatte. Dadurch ergab sich aber die günstige Gelegenheit, durch eine Reihe von Vorversuchen die neu entwickelten Prüfeinrichtungen ausführlich zu testen und zu verbessern und eine Menge Erfahrungen auf experimentellem Gebiet zu sammeln, was sich auf die Durchführung der Hauptversuche wiederum sehr günstig auswirkte.

Für einzelne der unter 4. aufgeführten Sandwichsysteme sind nicht alle vorgesehenen Versuche durchgeführt worden, da es sich gezeigt hatte, daß bei diesen das Deckschichtknittern als Bemessungskriterium nicht infrage kommt. Es handelt sich dabei um die Proben mit Asbestzement-Deckschichten, bei denen stets die gezogene Deckschicht brach und um Proben mit SAN (Luran)-Deckschichten bzw. um PUR-Depot-Proben, die wegen der geringen Deckschichtsteifigkeiten weit über ein sinnvolles Maß verformt werden konnten, ohne jemals Knittererscheinungen zu zeigen.

Im folgenden werden die Versucheinrichtungen und die durchgeführten Untersuchungen eingehend beschrieben.

5.1 Entwicklung von Prüfeinrichtungen und Vorversuche

Laut Versuchsprogramm waren Sandwichproben von unterschiedlicher Dicke ($d = 50 \text{ mm}$ bis 150 mm) zu prüfen. Da der Einfluß der Probengröße auf die Versuchsergebnisse nicht bekannt war, sollten bei den Deckschichtabzugsversuchen gleichartige Proben unterschiedlicher Größe unter-

sucht werden. Es wurde daher zunächst eine Vorrichtung zum Abziehen der Sandwichdeckschichten in Anlehnung an DIN 53 292 (Zugversuch senkrecht zur Deckschichtebene) entwickelt, die es ermöglicht, ohne großen Aufwand Probekörper unterschiedlicher Querschnittsfläche zu prüfen (siehe Bild 10 und 11). Die Stahlplattenpaare zwischen die die Proben eingeklebt werden, sind bei dieser Vorrichtung nicht auf eine bestimmte Größe festgelegt und können leicht ausgewechselt werden. Erforderlichenfalls könnten auch von der Quadratform abweichende Stahlplatten (z. B. rechteckförmige oder runde) zur Anwendung kommen.

Bei den im Programm vorgesehenen Biegeversuchen sollte das Versagen der Proben möglichst durch Knittern der druckbeanspruchten Deckschichten erfolgen. Dabei sollte der störende Einfluß von Querkraft-Lasteinleitungsstellen durch das Einprägen einer querkraftfreien Biegung in die Sandwichproben ausgeschaltet werden. Aus diesem Grunde wurde im Anschluß an die Abzugvorrichtung eine Biegeapparatur entwickelt, die die Einleitung einer derartigen Belastung mittels Fixierung der Deckschichten im Endbereich der Proben ermöglicht (siehe Bild 12). Die Deckschichtenden werden in eine Vorrichtung eingeklebt, so daß eine durch Stahlprofile verlängerte Probe entsteht. Damit wird dann ein 4-Punkt-Biegeversuch in der Weise durchgeführt, daß die Lasteinleitungsstellen und die Auflagerpunkte in die Bereiche der Stahlprofile fallen. Abgesehen vom Eigengewichtsanteil liegt die Sandwichprobe ganz im Bereich querkraftfreier Biegung. Die Einspannteile der Biegevorrichtung wurden in zwei Größen, für Probendicken bis 10 cm und für Dicken bis ca. 16 cm, hergestellt. Der gesamte Biegeprüfstand ist auf Bild 13 zu sehen. Im Bedarfsfalle können auch einsinnig gekrümmte Sandwichproben in der Anlage geprüft werden.

Beide Neuentwicklungen wurden ausgiebig getestet und mehrfach verbessert. Später wurden für den Biegeprüfstand noch Temperierboxen gebaut, die Biegeprüfungen bei Temperaturen bis zu 80 °C erlauben.

Auf weitere vorbereitende Arbeiten, die hauptsächlich in der Zeitspanne bis zum Eintreffen der ersten Prüfkörper durchgeführt wurden, soll, obgleich sie teilweise recht aufwendig waren, nicht näher eingegangen werden. Es handelt sich dabei im wesentlichen um Kleberauswahlversuche, Versuche zur Klebetechnik, zur Säuberung der Klebeflächen, zur Meßtechnik und zum Zuschnitt der Proben.

Eine Serie von Vorversuchen mit Zugproben unterschiedlicher Abmessungen aus handelsüblichem PUR-Hartschaum, die ebenfalls in der Zeit vor dem Eintreffen der eigentlichen Prüfkörper durchgeführt wurde, sollte hauptsächlich zur Erprobung der Versuchstechnik dienen und evtl. Aufschluß über die Abhängigkeit der Hartschaumzugfestigkeit von der Probengeometrie geben. Dabei wurde der Kunststoffschäum unmittelbar zwischen die Stahlplatten der Zugvorrichtung (Bild 17) geklebt. Auf die Ergebnisse dieser Vorversuche soll hier ebenfalls nicht näher eingegangen werden, zumal die Rohdichten der Einzelproben verhältnismäßig stark schwankten und die Auswertung somit nicht ganz unproblematisch war. Es soll hier nur mitgeteilt werden, daß in

dem untersuchten Bereich (Probenhöhe $h = 2,5$ bis 10 cm, Grundfläche $F = 4 \times 4$ bis $12,5 \times 12,5$ cm²) recht deutlich eine Abhängigkeit der Bruchlast von der Probenhöhe zu erkennen ist. Die Größe der Grundfläche scheint dagegen die Bruchlast wesentlich geringer zu beeinflussen (Bild 18). Diese Beobachtung wurde bei den späteren Hauptversuchen (vgl. 5.3) ebenfalls gemacht.

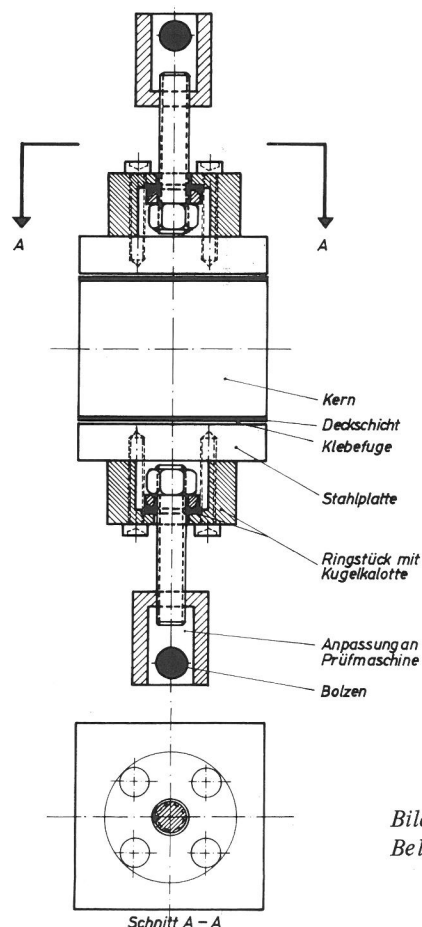


Bild 10
Belastungsvorrichtung für Stirnabzugsversuche

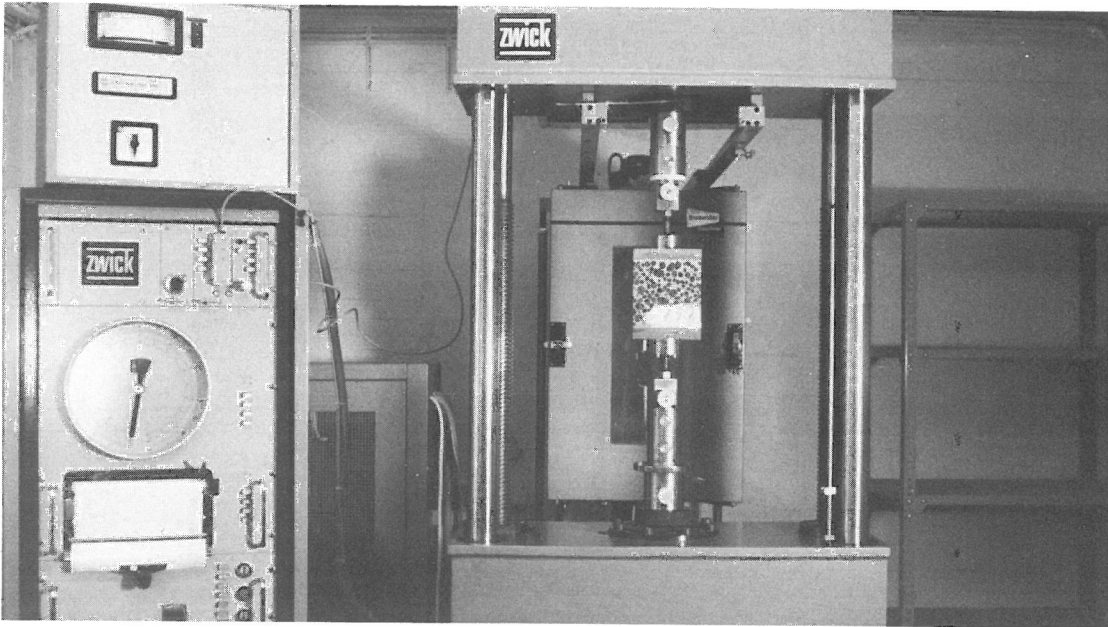


Bild 11
 Prüfstand für die Deckschicht-Abzugsversuche und Druckversuche senkrecht zur Deckschichtebene

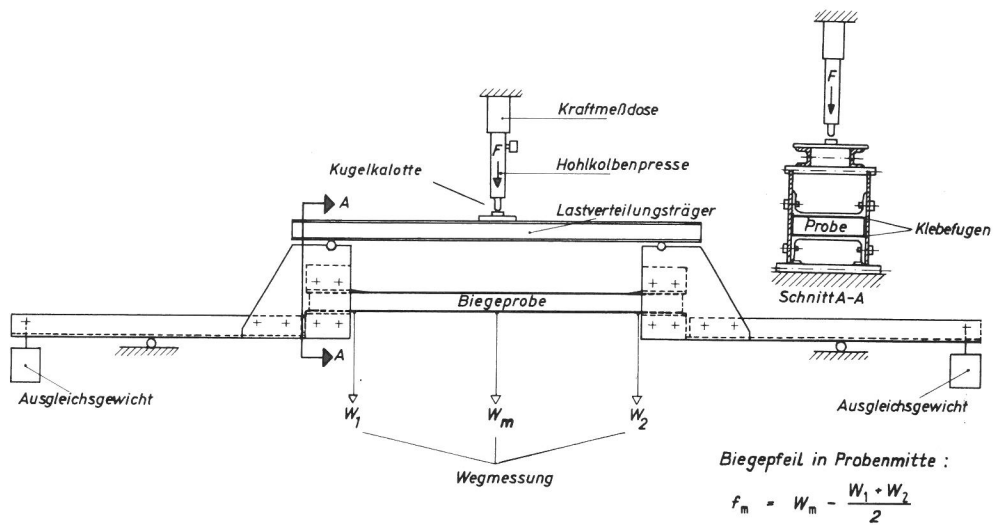


Bild 12
 Belastungsvorrichtung für Biegeversuche

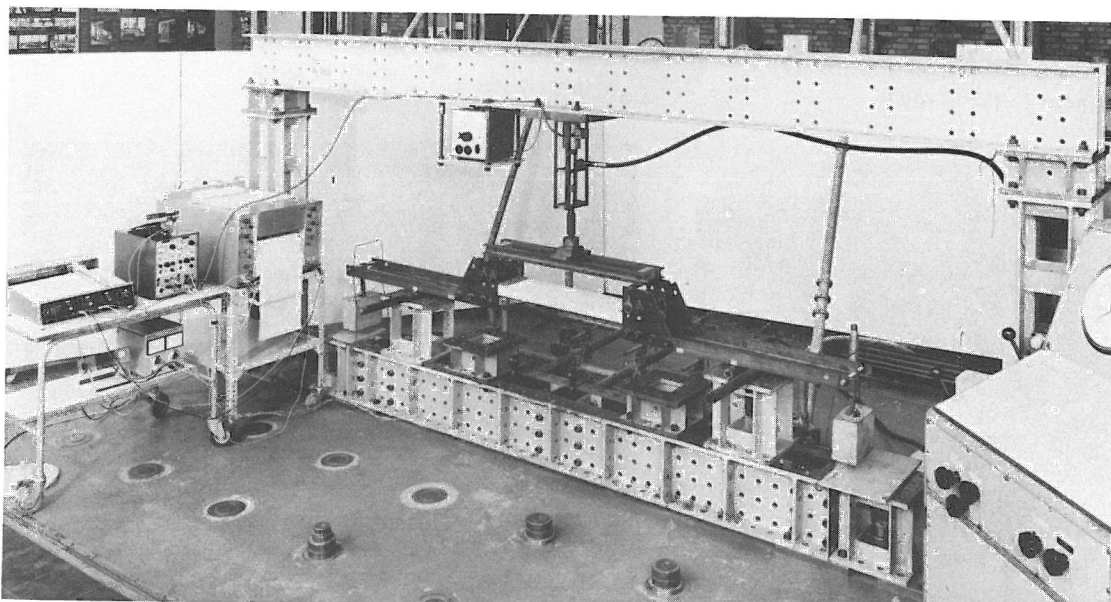
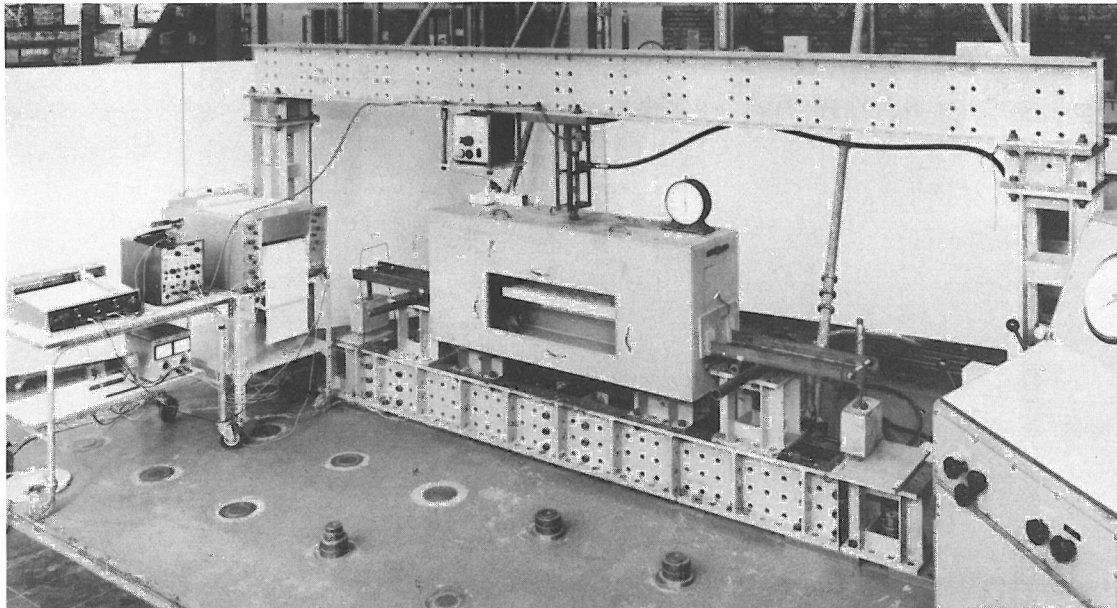
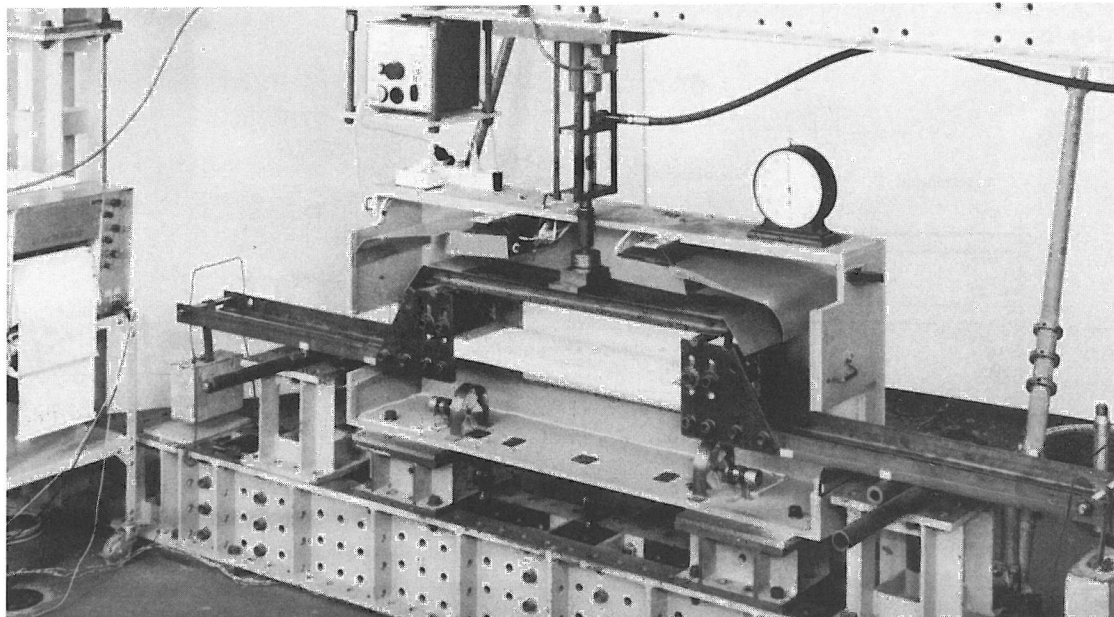


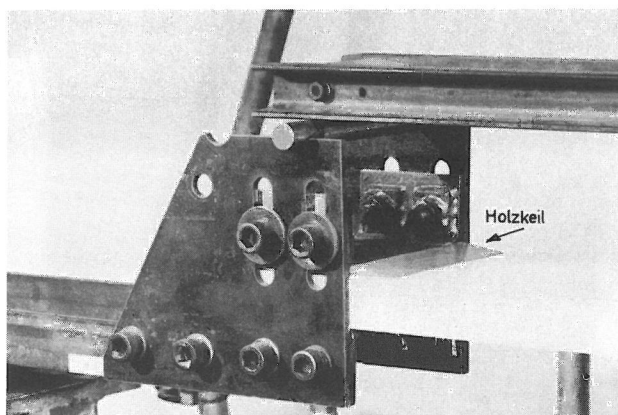
Bild 13
 Prüfstand für Sandwichbiegeversuche



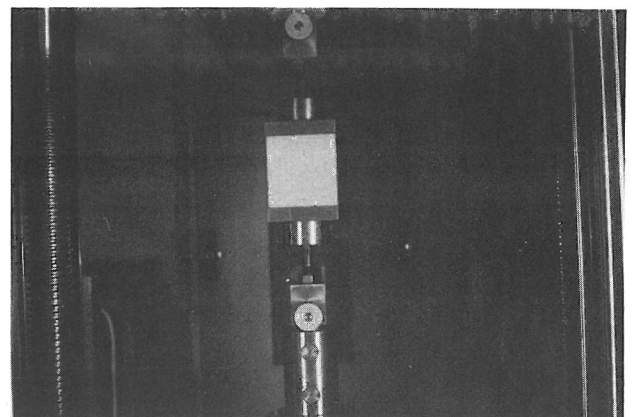
*Bild 14
Biegeprüfstand für Sandwich-Biegeversuche mit Temperierbox für Prüfung bei Umgebungstemperaturen bis max. 80°C*



*Bild 15
Biegeprüfstand, geöffnete Temperierbox*



*Bild 16
Biegeprüfstand
Einspannstelle der Sandwichprobe in die Metallverlängerung*



*Bild 17
Vorversuche
Zugversuche an PUR-Hartschaum, Proben unmittelbar auf Metallplatten geklebt*

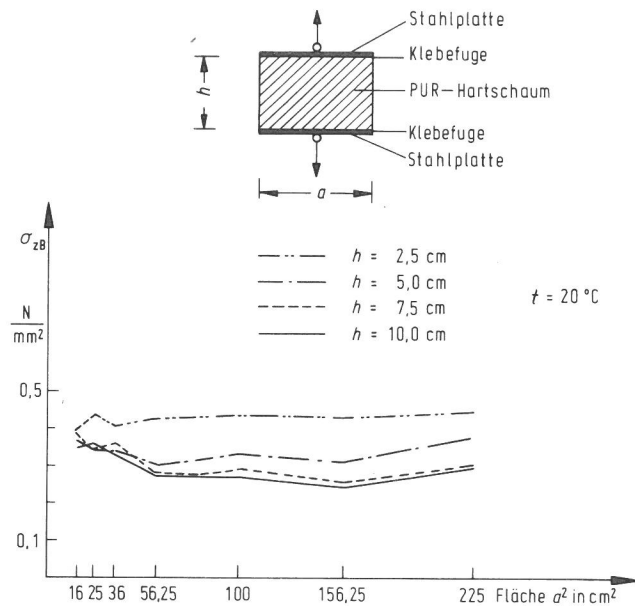


Bild 18
Zugversuche an PUR-Hartschaum
Zugfestigkeiten in Abhängigkeit
von der Probenquerschnitts-
fläche für unterschiedliche Probenhöhen

5.2 Probenvorbereitung

Die Probenvorbereitung begann mit dem Zuschnitt der Proben aus den $1,3 \times 1,0 \text{ m}^2$ bzw. $1,0 \times 1,0 \text{ m}^2$ großen Sandwichplatten. Mit einer automatischen Bandsäge, wie sie normalerweise für Metallarbeiten verwendet wird, wurden die Platten entsprechend den in Bild 19 wiedergegebenen Schneidplänen aufgeteilt und sofort gekennzeichnet. Bei stehend geschäumten Sandwichplatten wurde die Schäumrichtung, wie in den Zeichnungen eingetragen, berücksichtigt. Die Zugproben erhielten eine vom "unteren" Rand beginnende und die Biegeproben eine vom "linken" Rand beginnende fortlaufende Numerierung.

Danach wurden die Zug- und Biegeproben gewogen, vermessen und angezeichnet (Begrenzung der Klebeflächen, Lage der Geber), für die Klebung vorbereitet (entfettet, aufgerauht) und dann in die entsprechenden Teile der Prüfvorrichtung eingeklebt. Erst wenn der Kleber nach 2 bis 12 Stunden erhärtet war, konnte der Einbau in die eigentliche Prüfmaschine vorgenommen werden. Die beim Wiegen und Vermessen erhaltenen Werte und evtl. festgestellten Besonderheiten an den Proben wurden in Protokollblätter eingetragen, in die später auch die Eintragung der Ergebnisse und Beobachtungen aus den Versuchen erfolgte. Die wichtigsten Unregelmäßigkeiten sind auf den Bildern 20 bis 25 zu sehen.

Nach den Versuchen mußten die Klebeflächen der Prüfvorrich-

tung wieder gesäubert und für eine neue Klebung vorbereitet werden. Der ausgehärtete Kleber ließ sich im heißen Zustand relativ gut von den Flächen entfernen. Je nach Klebertyp wurden die zu säubernden Metallteile im Wärmeschrank auf Temperaturen zwischen 120 °C und 150 °C erhitzt. Ein stärkeres Aufheizen war unzweckmäßig, da dann infolge der Zersetzung der Kleber zu starke Geruchs- und Rauchbelästigungen auftraten.

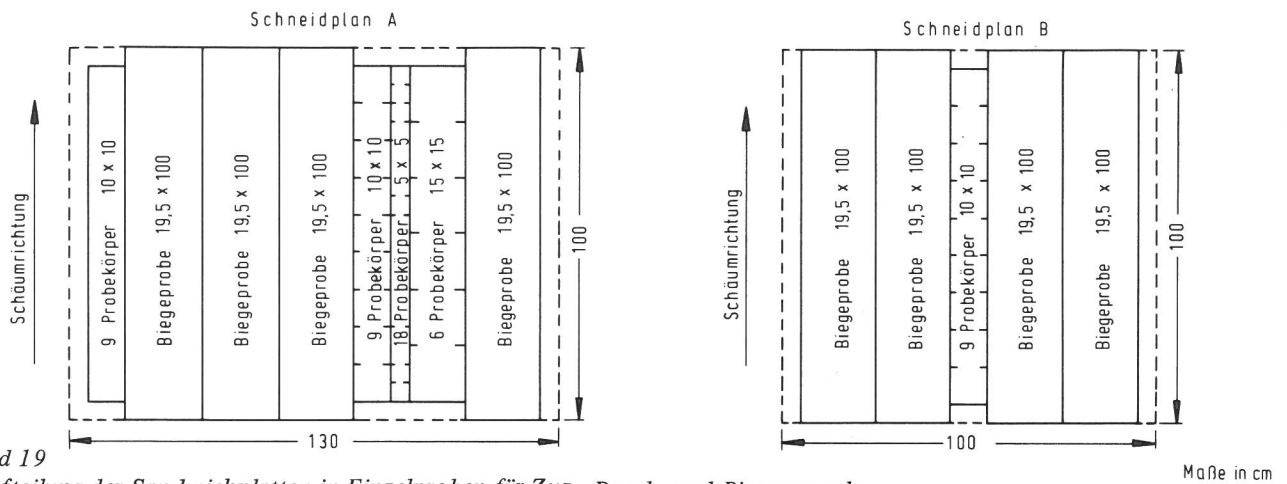


Bild 19
Aufteilung der Sandwichplatten in Einzelproben für Zug-, Druck- und Biegeversuche

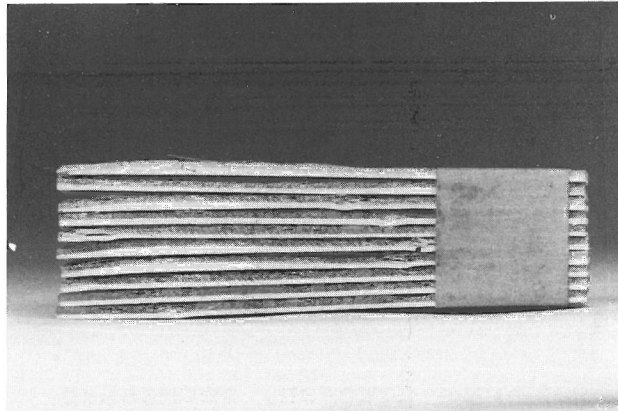


Bild 20
Unterschiedliche Materialdicken bei GF-UP-Deckschichten mit Feinschicht (Kern: UP-LB)

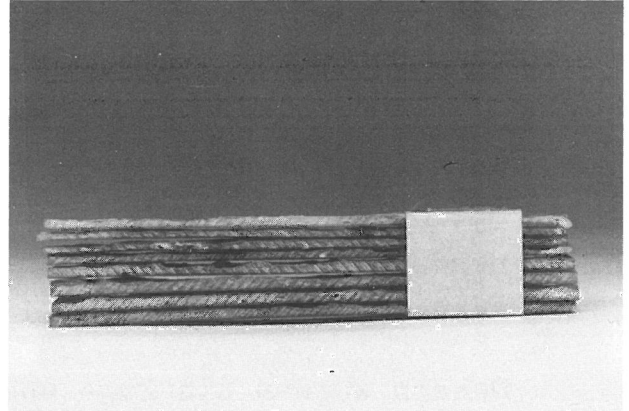


Bild 21
Unregelmäßige Materialdicken bei GF-UP-Deckschichten, die vor dem endgültigen Aushärten des UP-Harzes aufgeraut wurden (Kern: PH-LB)

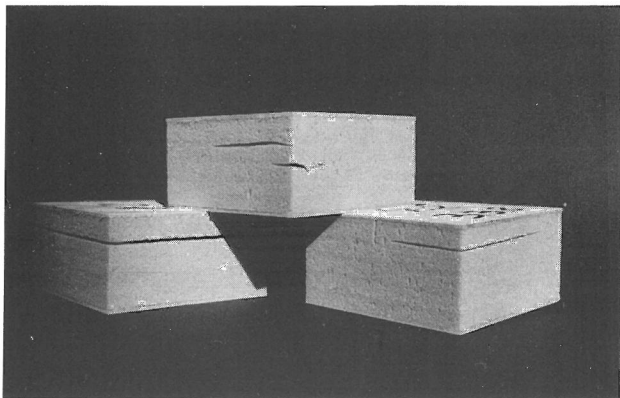


Bild 22
Äußerlich nicht erkennbare Fehler in Sandwichplatten mit PUR-Hartschaumkern

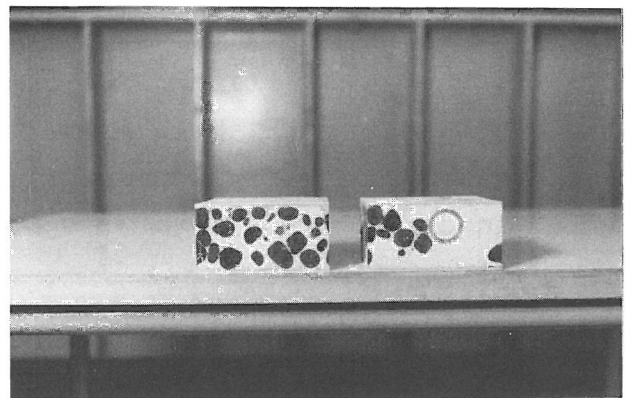


Bild 23
Unterschiedliche Verteilung des Zuschlagstoffes im PIR-LB. In der Umgebung des Schäumrohres (rechte Probe) kein Zuschlagstoff vorhanden

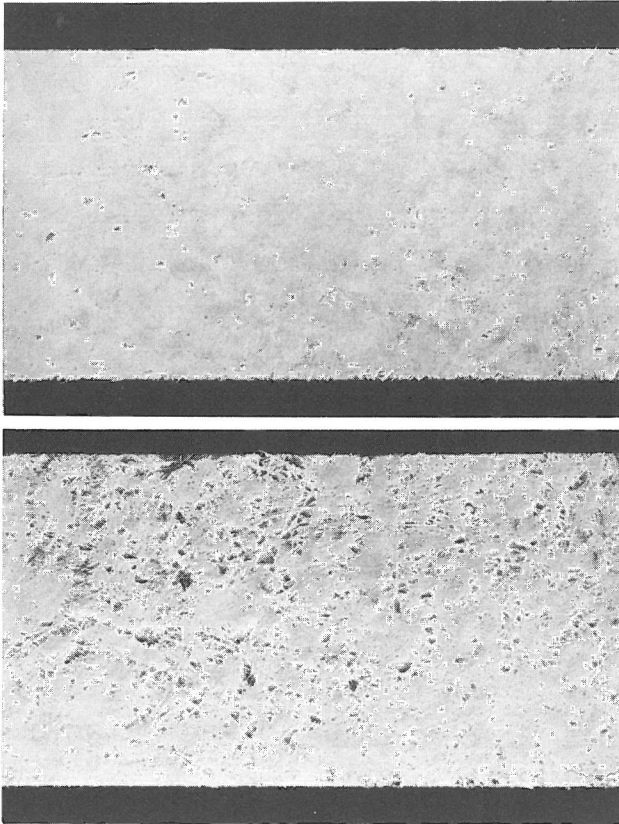
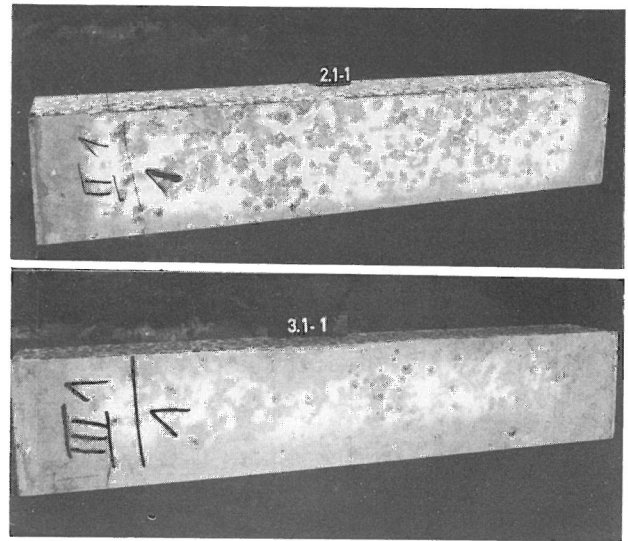


Bild 24
 Unterschiedliche Ausbildung der Deckschichtflächen (Außenansichten) bei im Depotverfahren hergestellten Sandwichproben aus UP-LB



Bilder 25 a und 25 b
 Farbliche Veränderungen des PH-Hartschaumes an Schnittkanten und Luft einschüssen (vermutlich infolge Veränderung des Feuchtigkeitsgehaltes) durch die nicht eingefärbten Deckschichten erkennbar
 Oben: PH-LB mit Blähglas ($\gamma_K \approx 250 \text{ kg/m}^3$)
 Unten: PH-LB mit Blähton ($\gamma_K \approx 450 \text{ kg/m}^3$)

5.3 Zug- und Druckversuche senkrecht zur Deckschichtebene

In der Hauptsache wurden sogenannte Deckschichtabzugversuche zur Prüfung des Verbundes zwischen Deckschichten und Kern und zur Ermittlung eines mittleren Elastizitätsmoduls für den gesamten zwischen den Deckschichten liegenden Kernbereich durchgeführt. Das geschah mit Hilfe der unter 5.2 beschriebenen Abzugsvorrichtung in einer Zwick-Universalprüfmaschine (Bild 11). Druckversuche wurden nur stichprobenartig in der gleichen Maschine mit einem Druckgehänge (ohne Einkleben der Proben) gemacht. Bei allen Versuchen wurde die Belastung bei konstanter Verformungsgeschwindigkeit von $\dot{\epsilon} \approx 1 \text{ %/min}$ bis zum Bruch der Proben gesteigert. Die Registrierung erfolgte in Form eines Last-Verformungsdiagramms. Die Prüfmaschine war mit einer Temperierkammer ausgerüstet, so daß die Versuche bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $40 \text{ }^\circ\text{C}$, $60 \text{ }^\circ\text{C}$ und $80 \text{ }^\circ\text{C}$ gefahren werden konnten.

Bei den ersten Sandwichproben, die UP-Harzschaum mit Blähglaszuschlag als Kernmaterial besaßen, wurden noch sämtliche im Schneidplan A eingetragenen Zugproben ge-

prüft. Die Auswertung zeigte jedoch, daß zwischen den Versuchsergebnissen der Proben mit $5 \times 5 \text{ cm}^2$, $10 \times 10 \text{ cm}^2$ und $15 \times 15 \text{ cm}^2$ großen Querschnittsflächen keine wesentlichen Unterschiede festzustellen waren. Diese Feststellung deckt sich auch mit den Beobachtungen bei den Vorversuchen (vgl. 5.1). Auch zwischen den Proben des Plattenrandstreifens und denen in Plattenmitte waren keine wesentlichen Unterschiede zu erkennen. Die Versuche konnten daher auf die in Plattenmitte liegenden $10 \times 10 \text{ cm}^2$ großen Proben beschränkt werden.

Nach den Versuchen wurden im Protokoll jeweils die Bruchlast und eine nähere Beschreibung des Bruchvorganges und Bruchbildes notiert.

Einzelne Probenarten zeigten sehr große Streuungen der Versuchsergebnisse. Besonders bei Proben, deren Deckschichthaftung geringer als die Zugfestigkeit des Kernmaterials war, und bei solchen, die viele Fehlstellen (z. B. Blasen) im Übergangsbereich Kern/Deckschicht hatten, wurde das beobachtet. Bei verschiedenen Probenarten wurden auch Veränderungen der Brucherscheinungen in Abhängigkeit von der Prüftemperatur festgestellt. Im allgemeinen wurde eine Abnahme der Bruchlasten mit steigender Temperatur sowohl bei Versagen der Proben im Kernbereich als auch bei Versagen am Übergang Kern/Deckschicht registriert. Der aus den Lastverformungskurven dieser Versuche ermittelte integrale E-Modul für das Kernmaterial zeigt ebenfalls eine Abnahme bei höheren Temperaturen.

Auf den Bildern 47 bis 51 sind einzelne aus den Zugversuchen senkrecht zur Deckschichtebene gewonnene $\sigma - \epsilon$ -Kurven abgebildet. Diese ausgewählten Kurven lassen die charakteristischen Kurvenverläufe für die verschiedenen Kernmaterialien unter den vier Temperaturbedingungen erkennen.

Die beiden Versagensarten "Bruch im Kern" und "Bruch am Übergang Kern/Deckschicht" zeigen die Bilder 26 bis 29.

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse der Zug- und Druckversuche senkrecht zur Deckschichtebene mit zusammenfassenden Kurzbeschreibungen für die einzelnen Probenarten bei den vier Prüftemperaturen befindet sich auf den Anlagen 1 bis 31 und in den Tabellen 9 bis 21.

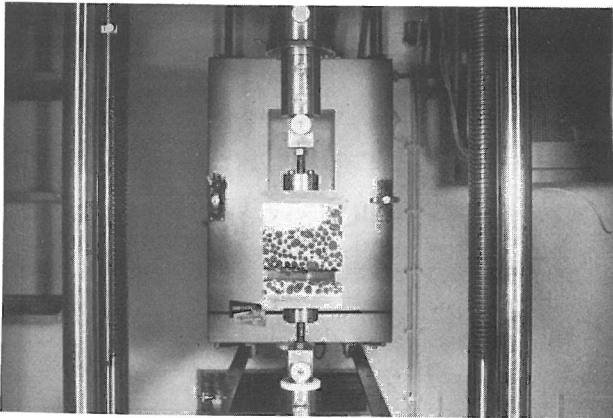


Bild 26
Zugversuche senkrecht zur Deckschichtebene.
Typisches Bruchbild bei Versagen im Kernmaterial (UP-LB mit Blähglas 10/30)

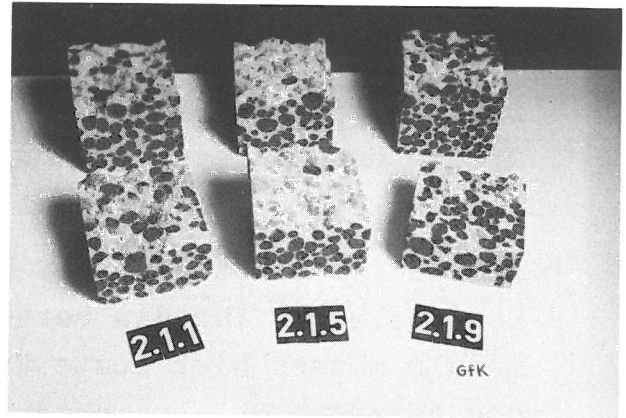


Bild 27
Zugversuche senkrecht zur Deckschichtebene.
Verschiedene Bruchflächen bei Bruch im Kern.
Füllstoffpartikel werden teilweise „umgangen“

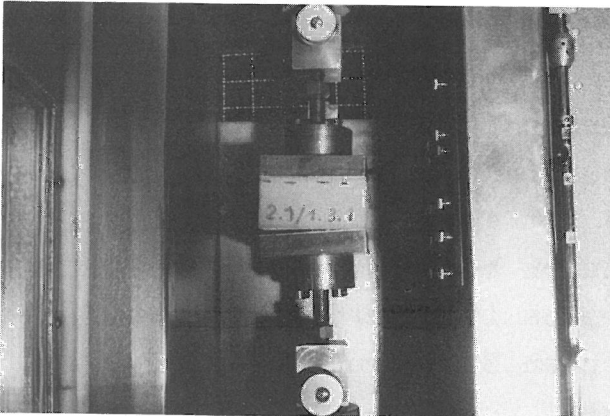


Bild 28
Zugversuche senkrecht zur Deckschichtebene.
Typisches Bruchbild bei Versagen am Übergang Kern/Deckschicht (PUR-HS/Al-Deckschicht)

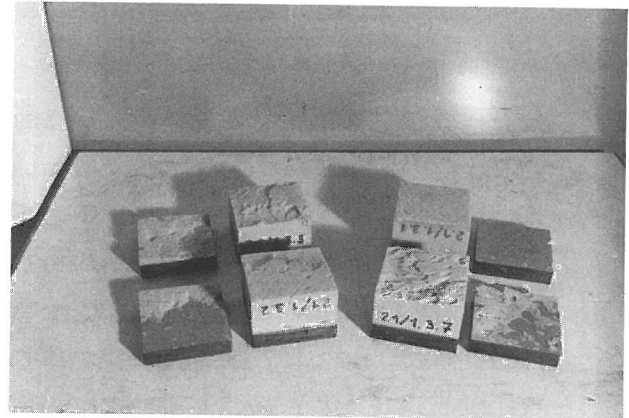


Bild 29
Zugversuche senkrecht zur Deckschichtebene.
Verschiedene Bruchflächen bei Bruch am Übergang Kern/Deckschicht

5.4 Versuche zur Bestimmung des Deckschicht-E-Moduls

Für die Anwendung der Knitterformel benötigt man neben dem Elastizitätsmodul für den Kunststoffschäumkern auch den E-Modul für das Deckschichtmaterial des jeweils betrachteten Sandwichsystems. Bei metallischen Deckschichten sind diese Werte hinreichend genau bekannt, und es erübrigt sich normalerweise eine Überprüfung. Die tatsächlichen Abweichungen von den Rechenwerten sind relativ gering. Der Fehler in der Rechnung bleibt klein, weil der Deckschicht-Elastizitätsmodul mit dem Exponenten $1/3$ in der Formel steht. Durch die Ermittlung der Elastizitätsmoduln für die Stahl- und Aluminiumdeckschichten der untersuchten Sandwichsysteme wurde das bestätigt. Der Unterschied in den Ergebnissen der errechneten Knitterspannungen betrug maximal 1,8 %, wenn statt der gemessenen Werte $E_{St} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ bzw. $E_{Al} = 0,7 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ angenommen wurde.

Die E-Modulwerte für die Deckschichten wurden an 10 mm breiten Streifen im Federblech-Biegeversuch mit Feinmessung nach DIN 50 151 bei Raumtemperatur bestimmt. Sie gelten für Druck- und Zugbeanspruchungen und sind praktisch im ganzen hier untersuchten Temperaturbereich gültig.

Anders ist es dagegen bei Deckschichten aus GF-UP. Zur Kontrolle der für die Berechnung angenommenen Elastizitätsmoduln müssen hier stets Versuche durchgeführt werden, da die tatsächlich erreichten Werte, relativ gesehen, erheblich stärker von theoretisch ermittelten Rechenwerten abweichen können, zumal diese Werte auch noch temperaturabhängig sind und für Druck- und Zugbelastung nicht unbedingt gleich sein müssen.

Für die Auswertung der Biegeversuche wurden die E-Werte für GF-UP-Deckschichten aus Druckversuchen an 12 mm breiten Proben entsprechend DIN 53 457 mit angesetzten Dehnungsgebern für die vier Temperaturstufen bestimmt. Obgleich der Druckversuch nicht ganz problemlos ist, wurde er gewählt, weil er bezüglich der auftretenden Beanspruchung sinnvoll erschien und weil Druckfestigkeit und E-Modul aus einem Versuch gewonnen werden konnten.

Recht schwierig gestaltete sich die Bestimmung für die GF-UP-Deckschichten bei Prüfkörpern mit PH-Harzschaumkern. Bei diesen war das Laminat zur Erzielung eines besseren Haftverbundes zwischen Deckschicht und Kern in noch feuchtem Zustand mechanisch aufgerauht worden. Die dadurch entstandenen Unregelmäßigkeiten in der Dickenrichtung der Proben (vgl. Abb. 21) erschwerten die Vermessung und die Durchführung der Versuche erheblich. Erwartungsgemäß ergaben sich dann auch große Streuungen in den Ergebnissen (vgl. Anl. Bl. 1 und 2).

Für die im Depotverfahren erzeugten Deckschichten konnte der E-Modul in dieser Weise nicht bestimmt werden, da es wegen des kontinuierlichen Überganges nicht möglich war, die Deckschicht in eindeutiger Weise vom Kern zu trennen.

5.5 Biegeversuche

Bei den Biegeversuchen wurden Sandwichstreifen von 19,5 cm Breite und 75 cm bis 100 cm Länge verwendet. Um untereinander vergleichbare Proben zu erhalten, war der Zuschnitt so gewählt worden, daß bei stehend geschäumten Platten die Seitenschnittkanten parallel zur Schäumrichtung verliefen (vgl. Bild 19). Die Proben wurden mit einem Zweikomponentenkleber in die verschraubbaren Metallteile der Verlängerungskonstruktion (vgl. 5.1) eingeklebt. Dabei wurden gleichzeitig an den Einspannteilen der oberen Deckschicht flach auslaufende Hartholzkeile angeklebt, die den Krümmungssprung, der beim Biegeversuch an diesen Stellen auftritt, überbrücken (Bild 16). Die freie Probenlänge zwischen den Einspannstellen mußte je nach Probendicke unterschiedlich gewählt werden. Dicke Proben forderten wegen der Randeinflüsse eine große freie Probenlänge, dünne Proben dagegen verlangten wegen der größeren Durchbiegungen möglichst kurze Biegeproben. Große Durchbiegungen und die damit verbundenen großen Drehwinkel der Biegevorrichtung über den Auflagerpunkten sollten aber wegen der sich ändernden Hebelverhältnisse des Belastungssystems unbedingt vermieden werden. Die 15 cm dicken Sandwichproben wurden daher mit 78 cm und die Mehrzahl der dünneren Proben mit 53 cm freier Probenlänge eingebaut.

Nach dem Erhärten des Klebers wurden die Proben mit den Verlängerungsteilen in den Prüfraumen eingesetzt und entsprechend der Zeichnung (Bild 12) mit Verteilungsträger, Ausgleichsgewichten und Geberanschlüssen versehen. Stützweite, Lastaufbau und Gegengewichte waren so aufeinander abgestimmt, daß die Probe vor Versuchsbeginn praktisch nur durch ihr Eigengewicht belastet wurde.

Die Meßeinrichtung bestand aus einer elektrischen Kraftmeßdose, drei elektrischen Weggebern und den dazugehörigen Verstärker- und Registriereinheiten. Die Meßwerte wurden mit Hilfe eines Mehrkanalschreibers in Form von Kurven (Kraft-Weg-Diagramme) aufgezeichnet. Die Belastung des Systems erfolgte mit einem hydraulischen Preßtopf über den Verteilungsträger. Ein Regelventil (Durchflußmengenregelung)sorgte für eine von der jeweiligen Last

unabhängige konstante Verformungsgeschwindigkeit der Probe während des Versuches. Eine Durchbiegungsgeschwindigkeit am mittleren Geber von 1 cm/min hatte sich in den Vorversuchen für alle Probentypen gleichermaßen als geeignet ergeben. Dies entsprach den folgenden Dehnungsgeschwindigkeiten in den Deckschichten:

Probendicke	Dehnungsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$
15 cm	0,25 %/min
8 cm	0,21 %/min
5 cm	0,13 %/min

Die Verformung und damit verbunden die Belastung wurde normalerweise bis zum Bruch der Biegeproben gesteigert. Nur wenn die Verformungen ein sinnvolles Maß überschritten, oder wenn im Last-Verformungsdiagramm eindeutig Fließerscheinungen erkennbar waren, wurden die Versuche abgebrochen und entsprechende Vermerke in den Protokollblättern gemacht.

Durch eine Temperierbox konnten die Versuche auch bei Umgebungstemperaturen von 40 °C, 60 °C und 80 °C durchgeführt werden. Die Box umschloß die Probe und einen Teil der Biegevorrichtung, ohne die Beweglichkeit des Systems zu beeinträchtigen. Sie war mit zwei modifizierten 2 x 1000-Watt-Heizlüftern besonders flacher Bauart und zusätzlichen Ventilatoren, die für eine starke Luftumwälzung innerhalb der Boxen sorgten, bestückt. Bei jeder der drei erhöhten Umgebungstemperaturen liefen die Heizlüfter mit verschiedenen in Vorversuchen ermittelten Grundlasten und ein Regler hielt die Temperatur durch das Zu- und Abschalten einer Zusatzheizung auf der gewünschten Höhe. Die Anpassung der Grund- und Zusatzheizung erfolgte durch Anlegen unterschiedlicher Spannungen an die Heizelemente mit Hilfe von Stelltransformatoren. Temperaturmessungen an verschiedenen Punkten innerhalb der Box und an der Probe selbst zeigten nach entsprechenden Aufwärmzeiten Abweichungen von maximal 2 Kelvin von der Solltemperatur. Die Proben wurden vor den Versuchen je nach Dicke 2 bis 5 Stunden vorgewärmt. Messungen in der Mitte der Kunststoffschäumkerne hatten ergeben, daß sich die Tem-

peraturen nach diesen Zeiten bis auf ca. 4 Kelvin den Umgebungstemperaturen angepaßt hatten. Das Verhalten der Proben konnte auch bei Versuchen mit erhöhten Temperaturen durch Glasfenster in der Box beobachtet werden (siehe Bild 35).

Der Bruch der Versuchsobjekte trat in den meisten Fällen plötzlich ein. In manchen Fällen kündigte er sich durch leichte Wellenbildung in der gedrückten Deckschicht oder durch Fließerscheinungen in den Last-Verformungskurven an. Bei höheren Temperaturen gingen aber auch - bedingt durch den konstanten Kolbenvorschub der Belastungseinrichtung - einzelne Proben förmlich im Zeitlupentempo zu Bruch. Sandwichsysteme, bei denen die Bruchdehnung des Kernmaterials kleiner als die Bruchdehnung des Deckschichtmaterials war, zeigten deutlich Rißbildung im Zugbereich des Kerns (Bilder 30 und 31).

Der überwiegende Teil der Proben ging durch instabiles Versagen der oberen gedrückten Deckschicht (örtliches Beulen, Knittern) zu Bruch. Bei geringen Rohdichten γ_K des Kernmaterials wurde vielfach ein Einbeulen (Einbrechen) der gedrückten Deckschicht in den Kern beobachtet. Bei höheren γ_K -Werten beulte die Deckschicht dagegen fast ausschließlich nach außen. Je nach Art des Verbundes zwischen Deckschicht und Kern blieb die Ausbeulung örtlich begrenzt oder weitete sich über die ganze Probenlänge aus. Wenn die Deckschicht sich plötzlich von der gesamten Probenlänge ablöste, erfolgte dies stets mit lautem Knall.

In vielen Versuchen trat auch der Bruch durch Werkstoffversagen des Deckschichtmaterials ein. Bei hohen Kernroh-dichten wurde beobachtet, daß nach dem Knittern oder der Zerstörung der gedrückten Deckschicht die Druckkraft vom Kern allein übernommen wurde, und die Proben erst nach weiterer Laststeigerung infolge von Materialversagen in der gezogenen Deckschicht oder im Druckbereich des Kerns endgültig zu Bruch gingen. Es wurde weiterhin beobachtet, daß sich die Versagensarten mancher Sandwichsysteme mit der Temperatur veränderten. Während diese Proben bei Normaltemperatur reines Werkstoffversagen (Zugbruch) der unteren Deckschicht zeigten, neigten sie mit steigender Tem-

peratur immer mehr zum Versagen durch Knittern oder Druckbruch der oberen Deckschicht.

Die einzelnen Versagensarten, die bei den Biegeversuchen beobachtet wurden, sind auf den Bildern 32 bis 45 zu sehen.

Wie bei den Deckschicht-Abzugversuchen wurden auch bei den Biegeversuchen Protokolle geführt, in die neben den jeweiligen Probandaten (Abmessungen, Gewicht, Besonderheiten usw.) und die Feststellungen nach den Versuchen (Bruchart, Bruchbild, evtl. Fehlstellen usw.) eingetragen wurden. Auf den Bildern 75 bis 82 sind für alle Versuchsserien einzelne Kurven $M = f(f_m)$ aufgetragen ($M =$ Biegemoment, $f_m =$ Biegepfeil in Probenmitte). Die Kurven wurden wiederum so ausgewählt, daß die typischen Kurvenverläufe für die verschiedenen Probenarten zu erkennen sind. Da wegen der unterschiedlichen Steifigkeiten nicht alle Versuche mit gleichen Probenlängen durchgeführt werden konnten, mußten einige Kurven mit Hilfe einfacher geometrischer Beziehungen umgerechnet werden, um Vergleichsmöglichkeiten zu schaffen. Die betreffenden Kurven sind in den Abbildungen gekennzeichnet.

Tabellarische Zusammenstellungen der Ergebnisse aller Biegeversuche mit zusammenfassenden Kurzbeschreibungen für die einzelnen Probenarten bei den vier Prüftemperaturen befinden sich auf den Anlagen Bl. 1 bis 31.

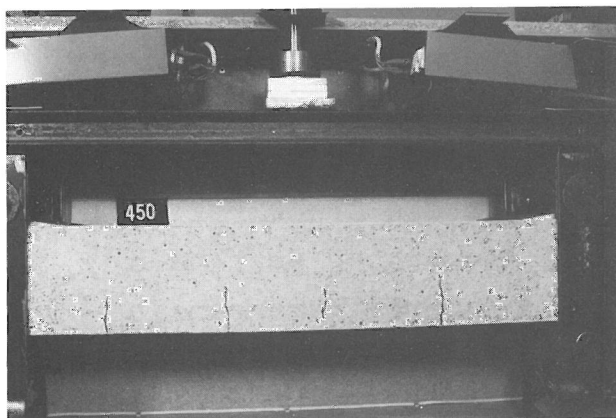


Bild 30
Biegeversuche. Beginnende Rißbildung im Zugbereich des Kerns bei Sandwichproben aus UP-LB mit GF-UP-Deckschicht (ca. 35 % der Bruchlast)

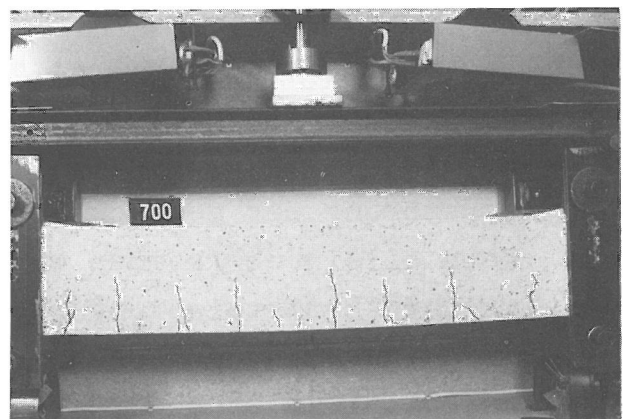


Bild 31
Biegeversuche. Fortgeschrittene Rißbildung im Zugbereich des Kerns bei UP-LB mit GF-UP-Deckschichten (ca. 60 % der Bruchlast)

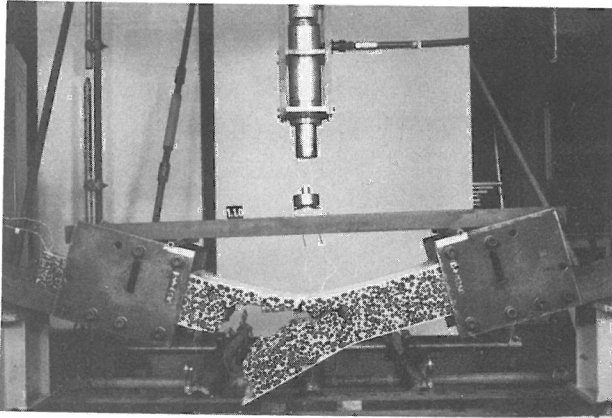


Bild 32
Biegeversuche. Materialversagen (Reißen) der gezogenen Deckschicht
 (UP-LB mit GF-UP-Deckschicht, $t = 20^{\circ}\text{C}$)

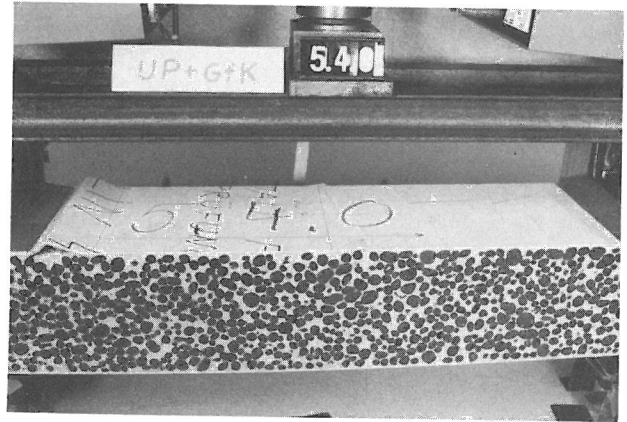


Bild 33
Biegeversuche. Materialversagen (Stauchungen) in der gedrückten Deckschicht
 (UP-LB mit GF-UP-Deckschicht, $t = 80^{\circ}\text{C}$)

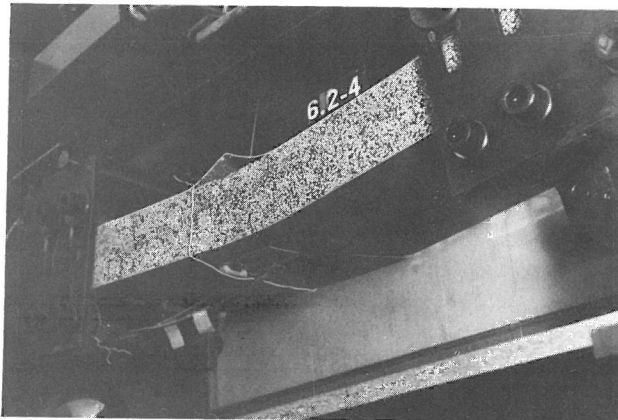


Bild 34
Biegeversuche. Materialversagen (Fließen) in beiden Deckschichten. Ausbeulung und Zugriß erst nach größerer Verformung
 (PS-LB mit Al-Deckschicht, $t = 40^{\circ}\text{C}$)

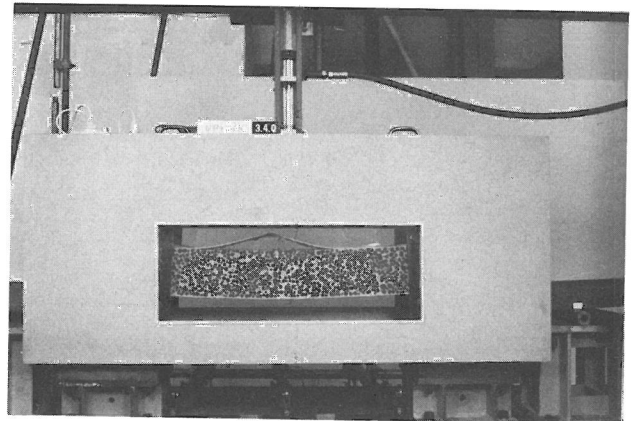


Bild 35
Biegeversuche. Beobachtung des Beulvorganges durch das Fenster der Temperierbox
 (UP-LB mit GF-UP-Deckschicht, $t = 40^{\circ}\text{C}$)

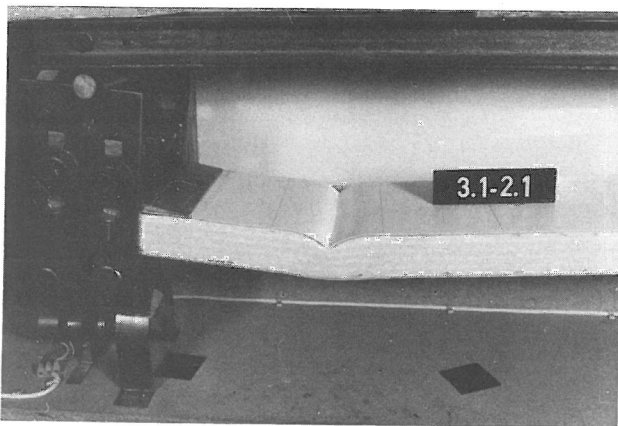


Bild 36
Biegeversuche. Versagen durch Instabilität (Einbeulen) der gedrückten Deckschicht
 (PUR-HS(40) mit GF-UP-Deckschicht, $t = 40^{\circ}\text{C}$)

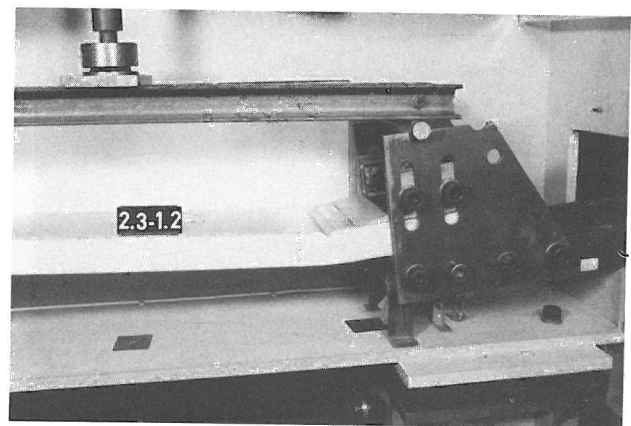


Bild 37
Biegeversuche. Versagen durch Instabilität (Einbeulen) der gedrückten Deckschicht
 (PUR-HS(100) mit Al-Deckschicht, $t = 20^{\circ}\text{C}$)

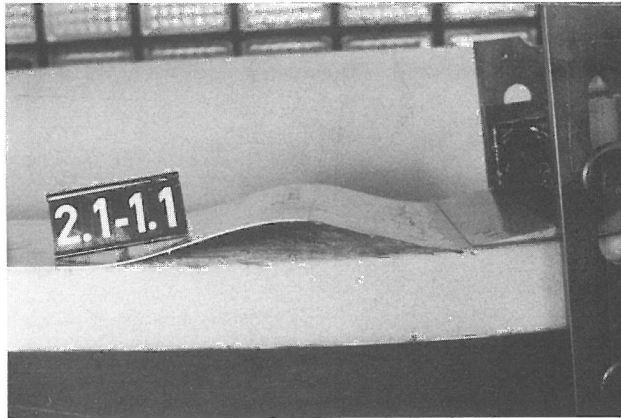


Bild 38
Biegeversuche. Versagen durch Instabilität (Ausbeulen) der gedrückten Deckschicht. Fehlstellen unter Deckschicht (PUR-HS(40) mit Al-Deckschicht, $t = 20^{\circ}\text{C}$)

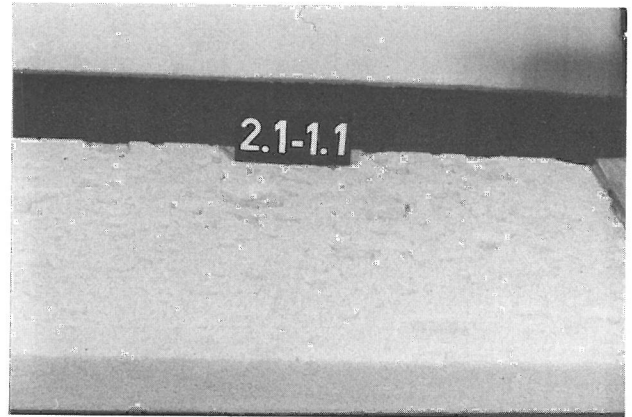


Bild 39
Zu Bild 38. Fehlstellen (Blasen) am Übergang Kern/Deckschicht nach Entfernen der Deckschicht

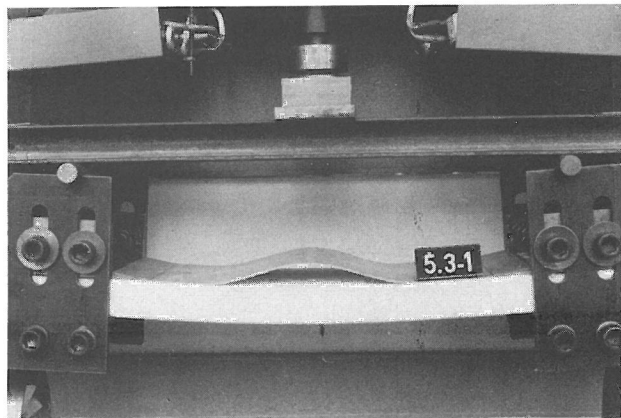


Bild 40
Biegeversuche. Versagen durch Instabilität (Ausbeulen) der gedrückten Deckschicht. Kleber löst sich vom Kern (PS-HS(30) mit GF-UP-Deckschicht, $t = 60^{\circ}\text{C}$)

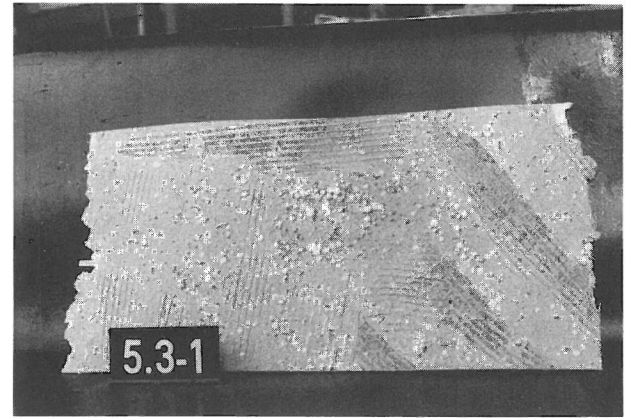


Bild 41
Zu Bild 40. Deckschichtunterseite mit Kleber aus dem Bereich der Ausbeulung

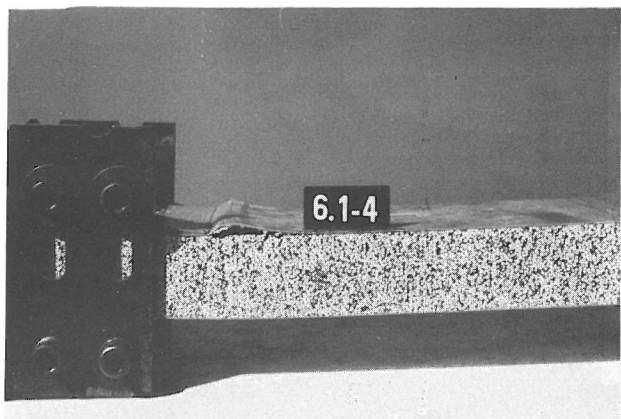


Bild 42
Biegeversuche. Ausbeulen der gedrückten Deckschicht nahe der Einspannstelle nach Fließerscheinungen (PS-LB mit Al-Deckschicht, $t = 20^{\circ}\text{C}$)

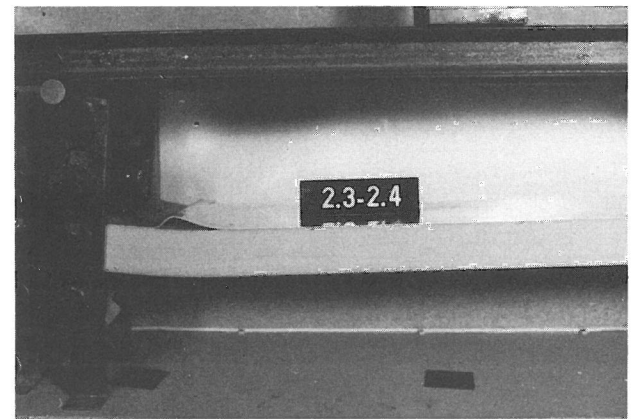


Bild 43
Biegeversuche. Ausbeulen der gedrückten Deckschicht nahe der Einspannstelle nach erkennbarer Wellenbildung (PUR-HS(100) mit Al-Deckschicht, $t = 40^{\circ}\text{C}$)

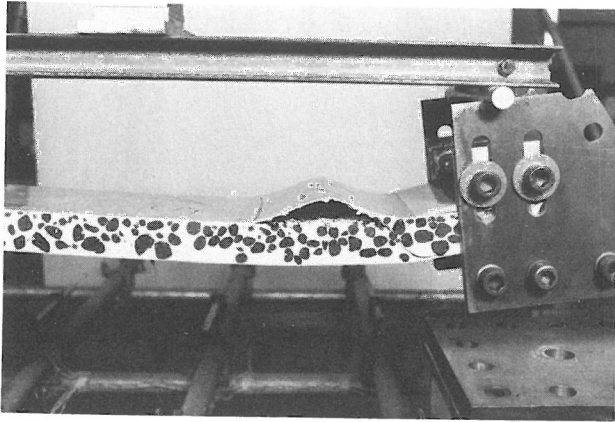


Bild 44
Biegeversuche. Ausbeulen der gedrückten Deckschicht, Kernriß sekundär
(PIR-LB mit Al-Deckschicht, $t = 20^{\circ}\text{C}$)

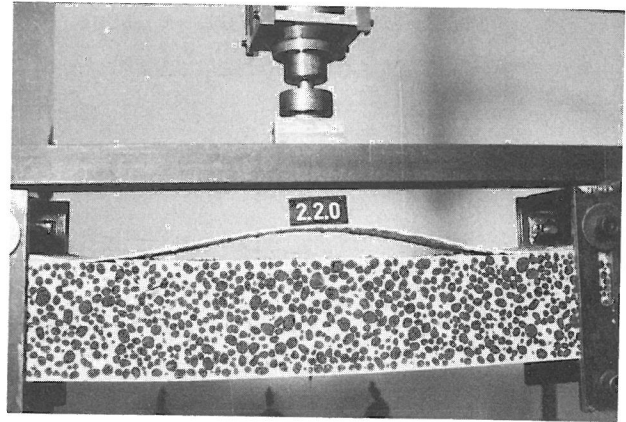


Bild 45
Biegeversuche. Abplatzen der gedrückten Deckschicht auf ganzer Probenlänge
(UP-LB mit GF-UP-Deckschicht, Zugseite verstärkt, $t = 20^{\circ}\text{C}$)

5.6 Aufbereitung der Versuchsergebnisse

Für die eigentliche Auswertung der Versuche, die laut Forschungsprogramm die Ermittlung von Beurteilungskriterien bezüglich der Deckschichtstabilität und Korrekturbeiwerten für die praxisgerechte Anwendung der Knitterformel bei verschiedenen Sandwichsystemen zum Ziele hatte, war es zunächst notwendig, die Vielzahl von Daten, Kurven und sonstigen Beobachtungen aus den einzelnen Versuchen aufzuarbeiten. Es wurden Datenblätter angelegt, aus denen alle für die weiteren Auswertungen wichtigen Informationen entnommen werden konnten. Für jedes untersuchte Sandwichsystem wurde solch ein Blatt angelegt. Die Datenblätter befinden sich vollzählig im Anhang dieses Berichtes auf den Anlagen Bl. 1 bis 31.

Bei der großen Zahl der untersuchten Parameter und dem damit zwangsläufig verbundenen hohen Prüfaufwand war man bestrebt, die Zahl der Einzelversuche je Probenart klein zu halten und mit relativ wenig Versuchen möglichst viel Information zu bekommen. Die Versuche und die Art ihrer Auswertung weichen daher in einigen Fällen von der üblichen Vorgehensweise ab. Es wurde jedoch in Voruntersuchungen jeweils sichergestellt, daß diese Modifikationen keinen nennenswerten Einfluß auf die erzielten Ergebnisse hatten.

Im folgenden soll kurz beschrieben werden, wie die einzelnen Werte in den Datenblättern bestimmt wurden. Für

die Berechnungen stand eine programmierbare elektronische Tischrechenmaschine zur Verfügung.

5.6.1 Kernrohddichte γ_K

Die Bestimmung erfolgte an Proben, die für die Deckschicht-Abzugversuche verwendet wurden. Da die äußeren Abmessungen vor den Versuchen und die Deckschichtdicken und das Kerngewicht nach den Versuchen festgestellt wurden, konnte die Kernrohddichte nach der Beziehung

$$\gamma_K = \frac{g_K}{(h-2t) \cdot b \cdot l} \quad (17)$$

berechnet werden. In der Formel bedeuten g_K das Gewicht des Kunststoffschäumkerns, h die Gesamtprobendicke, t die Deckschichtdicke und b und l die Kantenlängen (im Grundriß) der Probe. Es handelt sich also um eine mittlere Rohddichte bei Proben, die in ihrer Dickenrichtung verschiedenen dichte Zonen im Kernmaterial aufweisen (Füllbauweise, Depotverfahren).

5.6.2 Deckschichtabzugfestigkeit σ_{zBK}

Dieser Wert stellt je nach Versagensart entweder die Haftung der Deckschicht am Kern¹⁾ oder die Zugfestigkeit des Kernmaterials dar. Eine nähere Erläuterung dazu ist in der Nachbarspalte "Bruch" und unter "Beobachtungen" angegeben. Berechnet wurde der Wert nach der Formel

$$\sigma_{zBK} = \frac{F_{zB}}{b \cdot l} \quad (18)$$

wobei als F_{zB} die Bruchlast der Zugprobe einzusetzen war.

5.6.3 Druckfestigkeit σ_{dBK}

Darunter ist praktisch die Druckfestigkeit des Kernmaterials zu verstehen. Der Druckversuch wurde nur stichprobenartig durchgeführt.

1) Die Verbindungsfuge zwischen Deckschicht und Kern wird kurz als "Randzone" bezeichnet.

$$\text{Formel: } \sigma_{\text{dBK}} = \frac{F_{\text{dB}}}{b \cdot l} \quad (19)$$

Die Bruchlast F_{dB} war nicht immer eindeutig zu bestimmen.

5.6.4 Elastizitätsmoduln E_K (E_{zK} bzw. E_{dK})

Diese Werte wurden ebenfalls aus den "Zug- bzw. Druckversuchen senkrecht zur Deckschichtebene" bestimmt. Sie stellen entsprechend der Dichteverteilung in den Proben mittlere E-Moduln für die gesamte Kerndicke dar. Sie wurden aus den Last-Verformungskurven der Versuche mit Hilfe sogenannter "Nullkurven" ermittelt. Unter "Nullkurven" sind Last-Verformungskurven zu verstehen, die bei jeder Versuchsserie ohne Probenzweischaltung gefahren wurden und die es ermöglichten, die Einflüsse der Prüfmaschine und der sonstigen Prüfapparatur aus den Last-Verformungskurven zu eliminieren. Auf diese Weise war es möglich, ohne die bei der vorhandenen Probengeometrie recht aufwendige Anwendung von speziellen Dehnungsaufnehmern zu arbeiten. Die E-Moduln wurden aus der Differenzneigung der in Versuchskurve und "Nullkurve" eingelegten Geraden bestimmt nach der Formel

$$E_K = \frac{\Delta F (h-2t)}{l \cdot b \cdot \Delta h} \quad (20)$$

(Δh = Längenänderung aus reduzierter Kurve)

Der Wert E_{dK} wurde nur stichprobenartig bestimmt.

5.6.5 Druckfestigkeit der Deckschicht σ_{dBD}

Die Deckschicht-Druckfestigkeit wurde aus den Versuchen nach DIN 53 457, die auch zur Bestimmung des Deckschicht-Elastizitätsmoduls benutzt wurden, ermittelt (vgl. 5.4). Sie konnte nicht in allen Fällen angegeben werden, da diese Versuche hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit in erster Linie auf die E-Moduln abgestimmt waren und daher die Bruchlasten nicht immer erreicht wurden. Dicken und Breiten der ca. 77 mm langen und 12 mm breiten Deckschichtstreifen wurden jeweils an den beiden Probenenden und in Probenmitte gemessen und für die Berechnung gemittelt:

$$\sigma_{dB} = \frac{F_{dB}}{\bar{t} \cdot \bar{b}} \quad (21)$$

\bar{t} = Mittelwert aus drei Messungen von t
 \bar{b} = Mittelwert aus drei Messungen von b

5.6.6 Druck-Elastizitätsmodul der Deckschichten E_{dD}

Die Versuchsdurchführung ist unter 5.4 beschrieben. Da die Dehnungsmessungen mittels an die Probe angesetzter Meßfühler erfolgte, konnte E_{dD} beim Druckversuch direkt aus der Kraft-Verformungskurve bestimmt werden:

$$E_{dD} = \frac{\Delta F_d \cdot l_o}{\bar{t} \cdot \bar{b} \cdot \Delta l_o} \quad (22)$$

mit l_o = Meßfühlerabstand.

Bei den Metalldeckschichten erfolgte die Prüfung in Anlehnung an DIN 50 151. Der Elastizitätsmodul ergab sich aus folgender Formel:

$$E_D = \frac{F}{4 \cdot b \cdot f} \left(\frac{l_s}{\bar{t}} \right)^3 \quad (23)$$

mit l_s = Probenstützweite und f = Probendurchbiegung.

5.6.7 Bruch-Biegemoment M_B

Diese Werte geben die Belastungen an, bei denen erste wesentliche Schädigungen der Sandwichproben beobachtet wurden. Die Art des Versagens bzw. der Schädigung ist in der Nachbarspalte "Bruch" angegeben. Unter wesentlicher Schädigung ist in diesem Zusammenhang das Ablösen, Aus- oder Einbeulen, oder die örtliche Zerstörung der gedrückten Deckschicht zu verstehen. Die Tragfähigkeit der Biegeprobe konnte durchaus noch höher liegen, wenn, wie unter 5.5 beschrieben, infolge Kräfteumlagerungen innerhalb des Probenquerschnitts der Zusammenbruch erst nach weiterer Laststeigerung erfolgte. Die Werte M_B wurden aus den gemessenen Pressenkräften, dem Probeneigengewicht und allen aus dem Versuchsaufbau herrührenden Zusatzbelastungen für

den Mittelquerschnitt der Biegeprobe errechnet. Die in den beiden Spalten links neben M_B angegebenen Werte h und b geben die Querschnittsabmessungen an der Bruchstelle der Biegeprobe an. Sie wurden durch Interpolation aus den Querschnittsabmessungen, die vor den Versuchen an mindestens 5 Stellen einer Biegeprobe festgestellt worden waren, bestimmt.

5.6.8 Bruch-Durchbiegung f_B

Der bis zum Versagen aufgetretene Biegepfeil f_m in Probenmitte wurde mit f_B bezeichnet und bezieht sich jeweils auf die in der Spalte "Beobachtungen" angegebene Länge l_f . Diese Bezugslänge l_f entspricht bis auf eine Differenz von $2 \times 1,5$ cm, die für das Anbringen der Geber an der Probe erforderlich war, der unter 5.5 beschriebenen freien Probenlänge. Wie auf Bild 12 ersichtlich, konnte die Durchbiegung f_m nicht unmittelbar gemessen werden. Wegen der geometrischen Verhältnisse war jeweils die Auswertung von drei Einzelmessungen erforderlich.

Bei allen vorstehend beschriebenen Datenarten wurden als Zusammenfassung Mittelwert und Variationskoeffizient der Einzelergebnisse jeder Versuchsserie bestimmt und in der Tabelle angegeben. Auch die Beobachtungen und Angaben über Besonderheiten in den Protokollblättern wurden für die einzelnen Versuchsserien in der Spalte "Beobachtungen" zusammengefaßt.

Die Werte für die vier verschiedenen Temperaturstufen sind in der Tabelle übereinander angeordnet, so daß der Einfluß der Temperatur auf bestimmte Versuchsergebnisse recht gut verfolgt werden kann.

Durch die Unterbringung aller dieser Werte einer Probenart in je einem Datenblatt wurden Unterlagen geschaffen, die neben einem guten Gesamtüberblick auch alle wichtigen Einzelinformationen vermitteln und die es ermöglichten, die weiteren Auswertungsarbeiten weitgehend unabhängig von den vielen Versuchsprotokollen der Einzelversuche durchzuführen.

5.7 Messung der "Vorbeulen" der Deckschichten

Eine hinreichend genaue Bestimmung der Vorbeulen ist z.Z. ohne größeren Aufwand nicht möglich. Aus diesem Grunde ist eine Abschätzung der Größe der Vorbeulen aufgrund der äußerlich feststellbaren Welligkeit der Deckschichtoberfläche vorgenommen worden.

Es wurde eine Vorrichtung entsprechend Bild 46 gebaut, die es ermöglichte, die Oberfläche der Sandwichdeckschichten kontinuierlich abzutasten und im stark überhöhten Maßstab von einem x-y-Schreiber abbilden zu lassen. Die Ausmessung der Unebenheiten war dann relativ einfach.

Auf der Grundlage dieser Abmessungen wurden Abschätzungen für die tatsächliche Größe der Vorbeulen vorgenommen. In der folgenden Tabelle sind die Schätzwerte W_0 für die verschiedenen Sandwichproben zusammengestellt.

System		$\gamma_{K, \text{Soll}}$ (kg/m^3)	t (mm)	W_0 (mm)
Ziff.	Werkstoffe			
4.1.1.1	PH-LB/GF-UP	250	≈ 1,2	≈ 0,10
4.1.1.2	PH-LB/GF-UP	450	≈ 1,2	≈ 0,10
4.2.1.1.	PIR-LB/St	250	0,6	≈ 0,04
4.2.1.2	PIR-LB/Al	250	0,8	≈ 0,04
4.2.1.3	PIR-LB/GF-UP	250	≈ 2,0	≈ 0,10
4.3.1.1	PS-HS/Al	30	1,0	≈ 0,20
4.3.1.2	PS-HS/GF-UP	30	≈ 2,3	≈ 0,20
4.4.1.1	PS-LB/Al	600	≈ 1,0	≈ 0,03
4.5.1.1	PUR-HS/St	40	0,6	≈ 0,06
4.5.1.2	PUR-HS/St	70	0,6	≈ 0,04
4.5.1.3	PUR-HS/St	100	0,6	≈ 0,02
4.5.2.1	PUR-HS/Al	40	0,8	≈ 0,07
4.5.2.2	PUR-HS/Al	70	0,8	≈ 0,05
4.5.2.3	PUR-HS/Al	100	0,8	≈ 0,03
4.5.3.1	PUR-HS/GF-UP	40	≈ 2,0	≈ 0,30
4.5.3.2	PUR-HS/GF-UP	70	≈ 2,0	≈ 0,20
4.5.3.3	PUR-HS/GF-UP	100	≈ 2,0	≈ 0,10
4.5.4.1	PUR-HS/AZ	40	5,5	-
4.5.4.2	PUR-HS/AZ	70	5,5	-
4.5.4.3	PUR-HS/AZ	100	5,5	-
4.5.6.1	PUR-HS/GF-UP	40	≈ 2,0	≈ 0,20
4.5.6.2	PUR-HS/GF-UP	70	≈ 2,0	≈ 0,20
4.6.1.1	UP-LB/GF-UP	260	≈ 1,74	0,10
4.6.1.2	UP-LB/Al	260	≈ 1,00	0,04
4.6.1.3	UP-LB/Depot			

Tabelle 8
Übersicht der „Vorbeulen“

W_0 bezieht sich auf die kritische Länge (a) einer halben Knitterwelle (vgl. Ziff. 6.2.3).

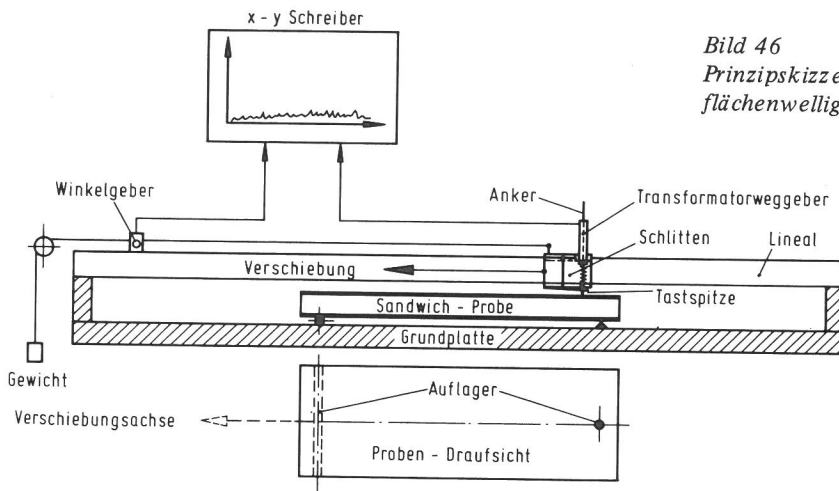


Bild 46
Prinzipische Skizze der Meßanordnung zur Bestimmung der Oberflächenwelligkeit an Sandwich-Deckschichten

6. Auswertung der Meßergebnisse

Wie unter Ziffer 5. beschrieben, wurden bei 20 °C, 40 °C, 60 °C und 80 °C folgende Versuche durchgeführt:

Stirnabzugsversuche (Ziff. 5.3)

und

querkraftfreie Biegung (Ziff. 5.5)

6.1 Stirnabzugversuch

Aus den Stirnabzugversuchen werden folgende mechanische Eigenschaften des Sandwichelementes festgestellt bzw. abgeleitet:

σ_{zBK} = Zugfestigkeit \perp Deckschichtebene

E_{zK} = E-Modul bei Zug \perp "

E_{dK} = E-Modul bei Druck \perp "

E_{zBK} = Bruchdehnung \perp "

Bei den durchgeführten Versuchen kommen 2 Versagensarten vor

a) Zugversagen im Stützkern,

b) Zugversagen in der Verbindungsfuge zwischen Deckschicht und Kern.

Die o. g. mechanischen Kenngrößen werden in Abhängigkeit von der Rohdichte und der Versuchstemperatur dargestellt. Die Meßergebnisse der Stirnabzugversuche zeigen die Bilder 47 bis 70.

Die Punkte in den graphischen Darstellungen von E_{zK} und σ_{zBK} sind Mittelwerte der Einzelmessungen gemäß Anlagen Bl. 1-31.

Die Darstellung von E_{dK} erfolgt aufgrund von stichprobenartig durchgeführten Einzelmessungen, vgl. ebenfalls Anlagen Bl. 1-31.

Die Punkte in den graphischen Darstellungen von σ_{zBK} sind wie bei E_{zK} Mittelwerte der Einzelmessungen gemäß Anlagen Bl. 1 bis 31. Die Proben, bei denen der Bruch in der Verbindungsfuge zwischen Deckschicht und Kern eintrat, wurden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.

Für E_{zK} , E_{dK} und σ_{zBK} wurden aus den o. g. Mittelwerten, soweit sinnvoll, Regressionsgeraden gemäß folgenden Ansatz gebildet:

$$y = A_1 \cdot x + A_2 \quad (24)$$

Darin bedeuten:

y = die Ordinaten, also E_{zK} , E_{dK} oder σ_{zBK}

x = die Abszissen, also v_K oder t ($^{\circ}\text{C}$)

$$A_1 = \frac{n \cdot \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (25)$$

$$A_2 = \frac{\sum y_i \cdot \sum x_i^2 - \sum x_i \cdot \sum x_i \cdot y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (26)$$

n = Anzahl der Proben

Die Summierung gilt für

$i = 1$ bis $i = n$.

Die Bilder 47-51 zeigen typische Spannungsdehnungskurven der Stirnabzugversuche bei den Temperaturen 20°C , 40°C , 60°C und 80°C .

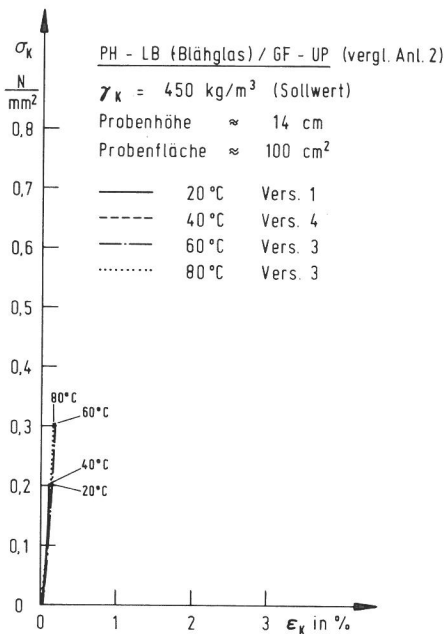
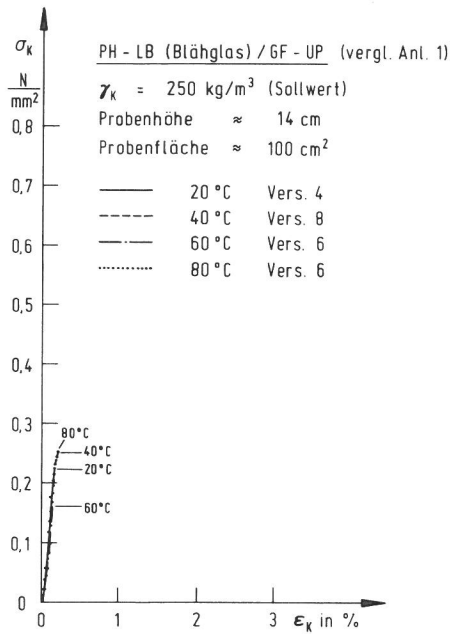


Bild 47
 Zugversuche senkrecht zur
 Deckschichtebene / Spannungs-
 Dehnungskurven $\sigma_K = f(\epsilon_K)$

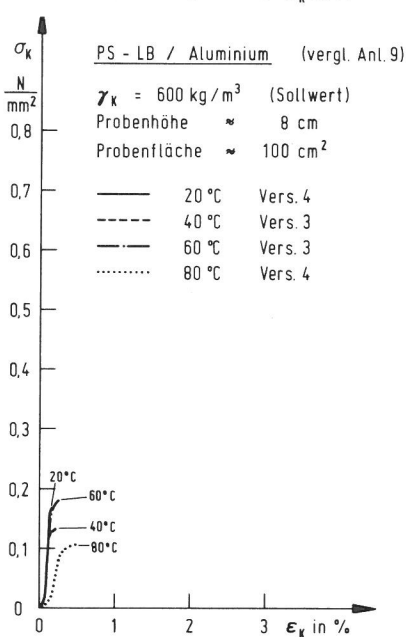
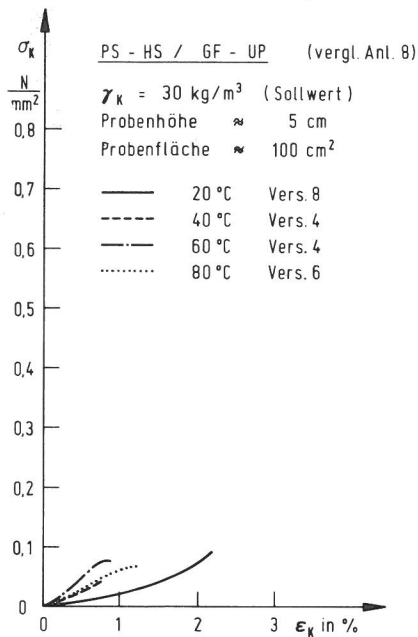


Bild 48
 Zugversuche senkrecht zur
 Deckschichtebene / Spannungs-
 Dehnungskurven $\sigma_K = f(\epsilon_K)$

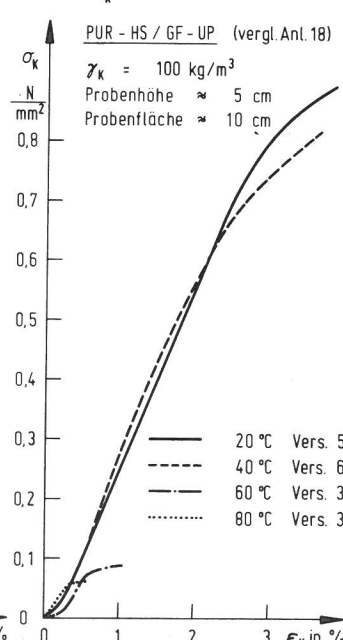
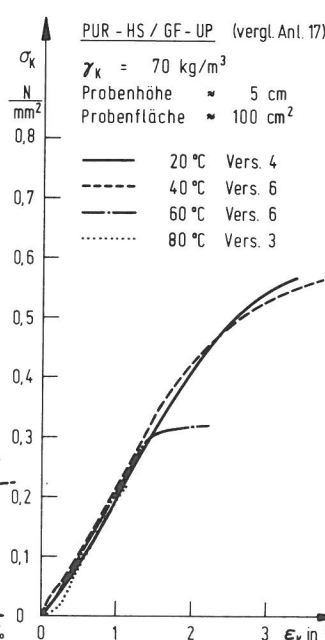
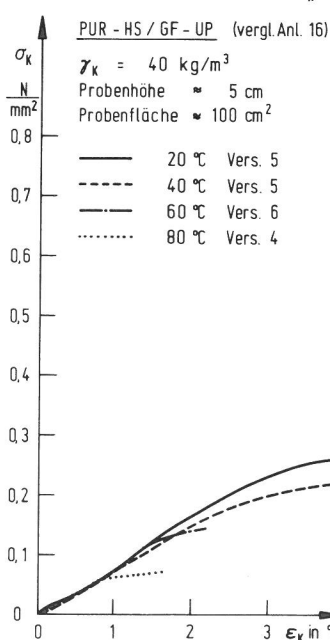


Bild 49
 Zugversuche senkrecht zur Deckschichtebene / Spannungs-Dehnungskurven $\sigma_K = f(\epsilon_K)$

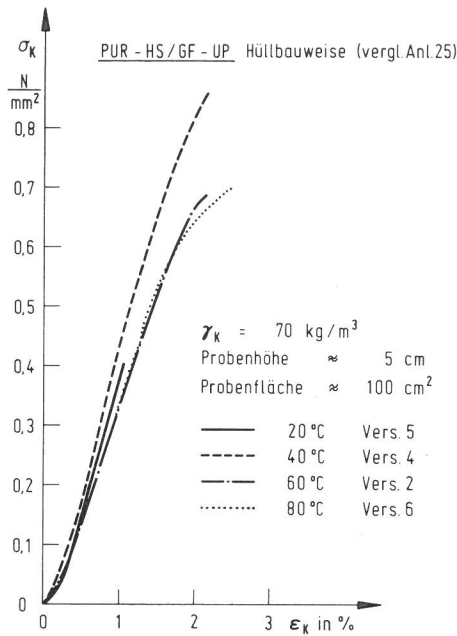
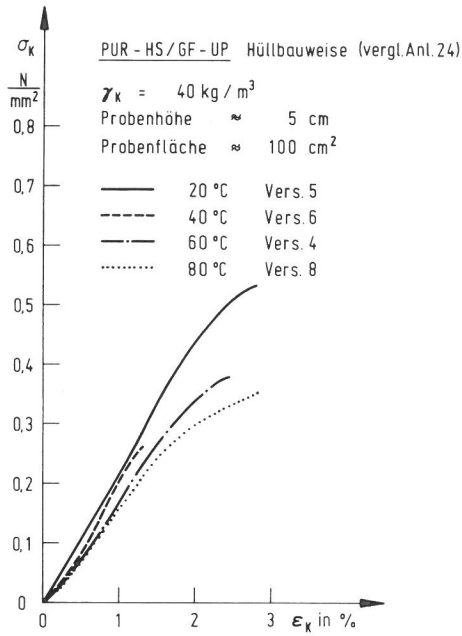


Bild 50
 Zugversuche senkrecht zur
 Deckschichtebene / Spannungs-
 Dehnungskurven $\sigma_K = f(\epsilon_K)$

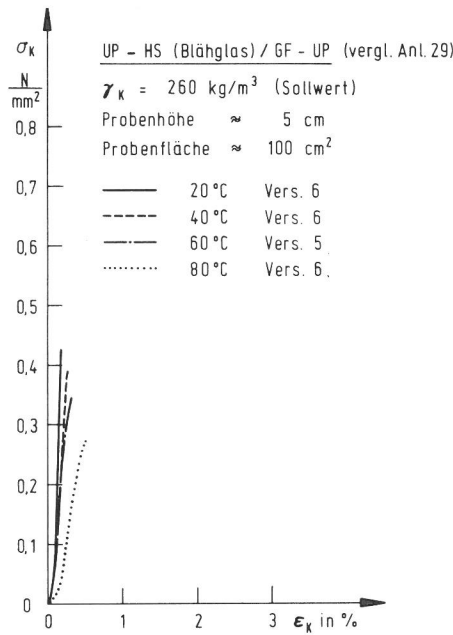
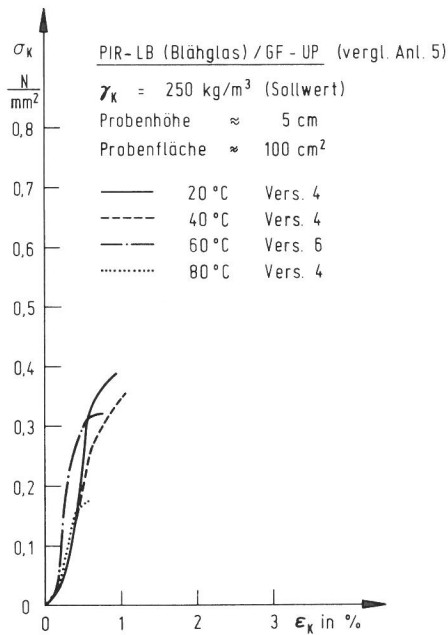


Bild 51
 Zugversuche senkrecht zur
 Deckschichtebene / Spannungs-
 Dehnungskurven $\sigma_K = f(\epsilon_K)$

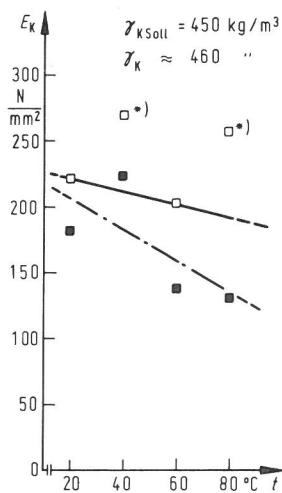
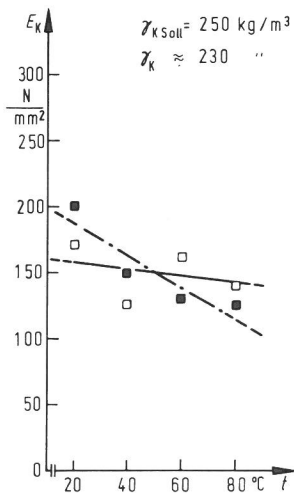
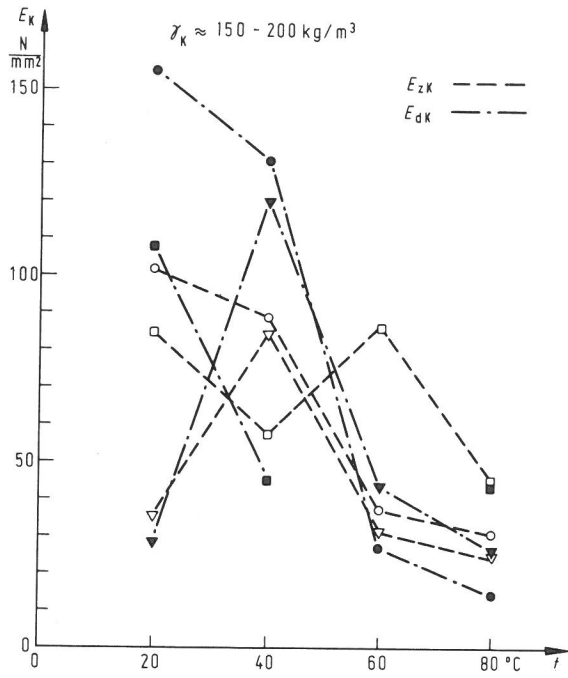


Bild 52
 Stirnabzugversuche
 E_K in Abhängigkeit von der Temperatur
 Stützkern: PH-LB, $\gamma_{K,Soll} = 250$ und 450 kg/m^3 (Füll-
 bauweise)
 Deckschicht: GF-UP (□) E_{zK} —, (■) E_{dK} - - -
 * diese Werte wurden bei der Ermittlung der Regressions-
 gerade nicht berücksichtigt.



Bemerkung: Hier nur Darstellung der Polygonzüge für die einzelnen Deckschichten. Wegen der starken Streuung keine Ermittlung einer Regressionsgeraden

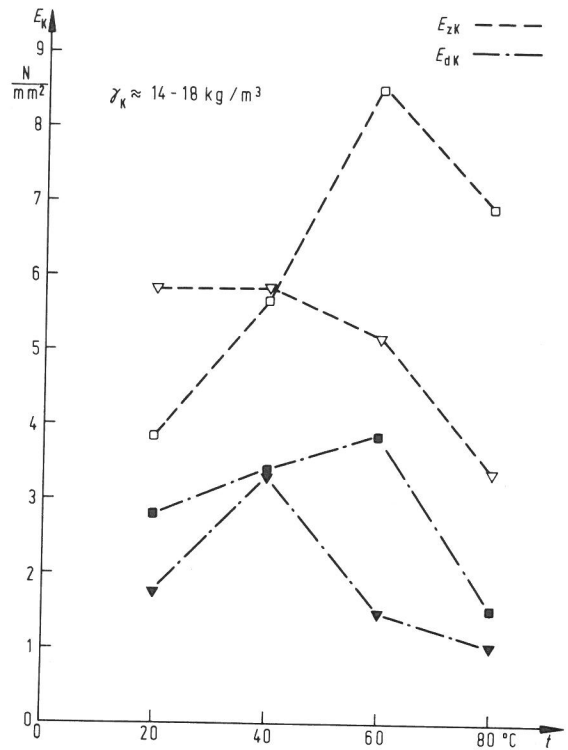
Bild 53

Stirnabzugversuche

E_K in Abhängigkeit von der Temperatur

Stützkern: PIR-LB, $\gamma_{K,Soll} = 250 \text{ kg/m}^3$ (Füllbauweise)

Deckschichten: Stahl (\circ) } E_{zK} (\bullet) } E_{dK}
 Alu (∇) } E_{zK} (\blacktriangledown) } E_{dK}
 GF-UP (\square) } E_{zK} (\blacksquare) } E_{dK}



Bemerkung: Hier nur Darstellung der Polygonzüge für die einzelnen Deckschichten. Wegen der starken Streuung keine Ermittlung einer Regressionsgerade

Bild 54

Stirnabzugversuche

E_K in Abhängigkeit von der Temperatur

Stützkern: PS-HS, $\gamma_{K,Soll} = 30 \text{ kg/m}^3$ (Hüllbauweise)

Deckschichten: Al (∇) } E_{zK} (\blacktriangledown) } E_{dK}
 GF-UP (\square) } E_{zK} (\blacksquare) } E_{dK}

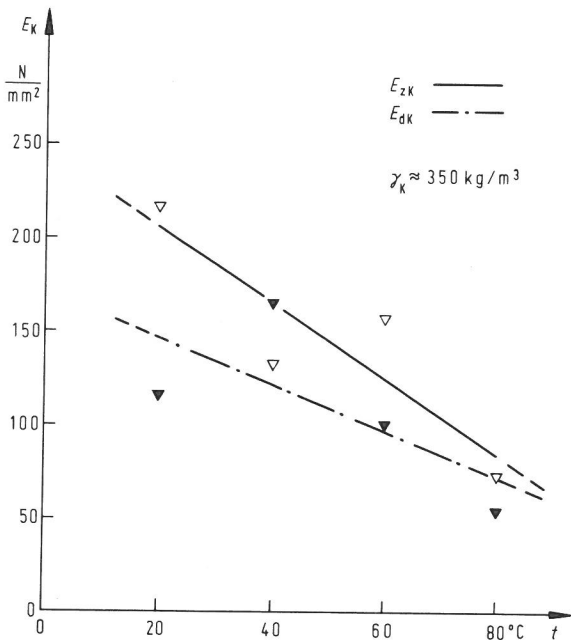


Bild 55

Stirnabzugversuche

E_K in Abhängigkeit von der Temperatur

Stützkern: PS-LB, $\gamma_{K,Soll} = 600 \text{ kg/m}^3$ (Füllbauweise)

Deckschicht: Alu (∇) } E_{zK} (\blacktriangledown) } E_{dK}

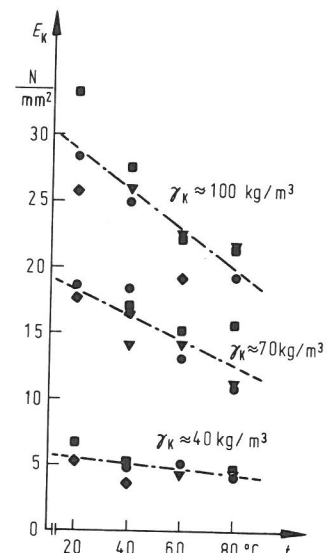
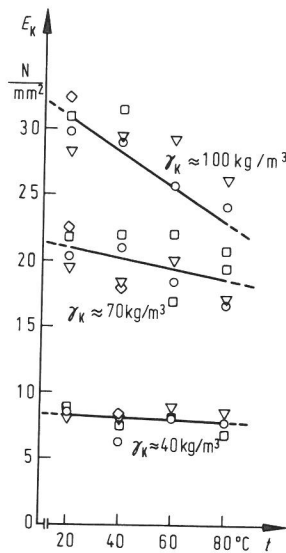


Bild 56

Stirnabzugversuche

E_K in Abhängigkeit von der Temperatur

Stützkern: PUR-HS, $\gamma_{K,Soll} = 40, 70, 100 \text{ kg/m}^3$ (Füllbauweise)

Deckschichten: Stahl (\circ) } E_{zK} (\bullet) } E_{dK}
 Alu (∇) } E_{zK} (\blacktriangledown) } E_{dK}
 GF-UP (\square) } E_{zK} (\blacksquare) } E_{dK}
 AZ (\diamond) } E_{zK} (\blacklozenge) } E_{dK}

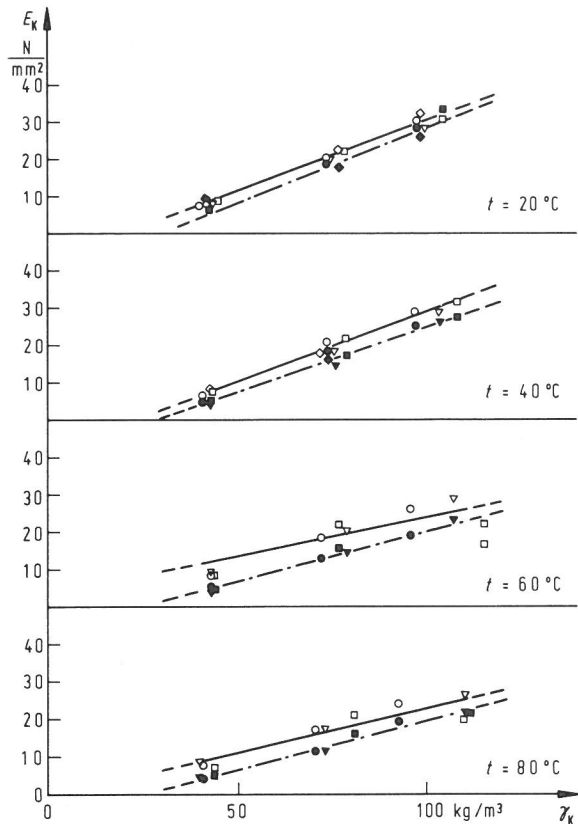


Bild 57
 Stirnabzugversuche
 E_K in Abhängigkeit von der Rohdichte, bei $t = 20, 40, 60, 80^\circ C$
 Stützkern: PUR-HS (Füllbauweise)
 Deckschichten: Stahl (\circ) } (\bullet) }
 Alu (∇) } (\blacktriangledown) }
 GF-UP (\square) } (\blacksquare) }
 AZ (\diamond) } (\blacklozenge) }

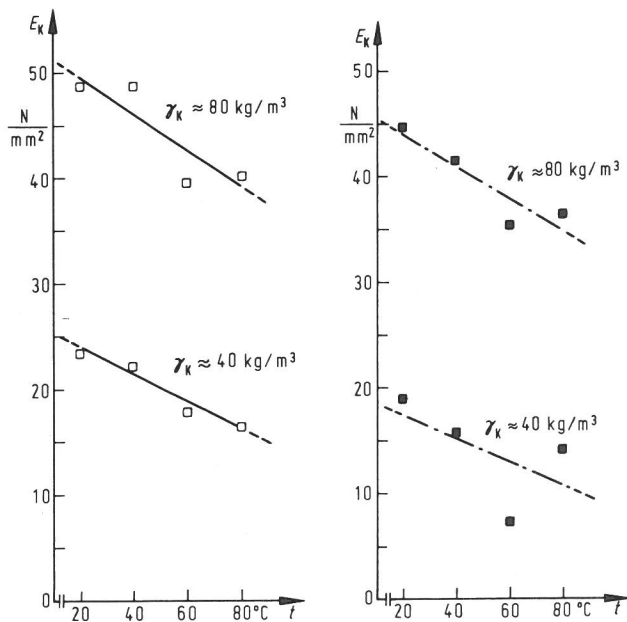


Bild 58
 Stirnabzugversuche
 E_K in Abhängigkeit von der Temperatur
 Stützkern: PUR-HS, $\gamma_{K,Soll} = 40, 70 \text{ kg/m}^3$ (Hüllbauweise)
 Deckschicht: GF-UP (\square) E_{zK} —, (\blacktriangledown) E_{dK} - - -

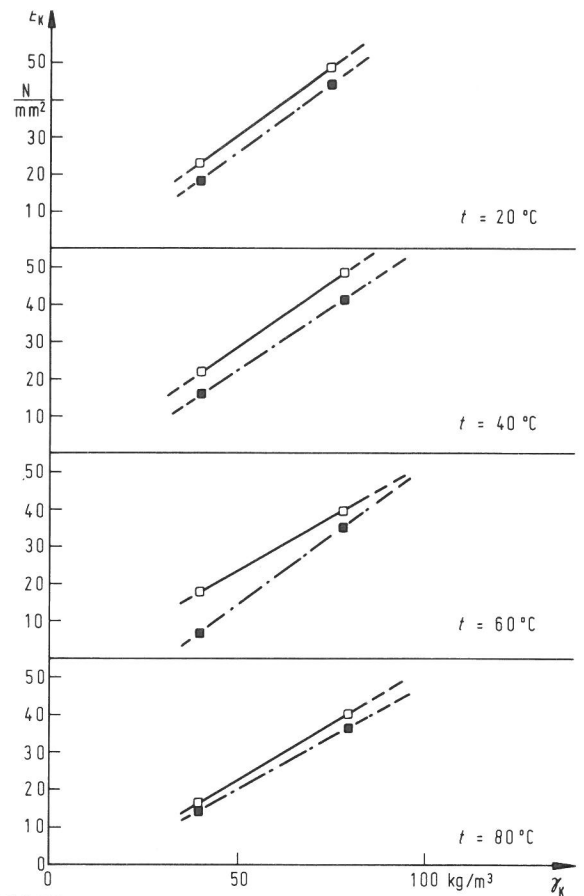


Bild 59
 Stirnabzugversuche
 E_K in Abhängigkeit von der Rohdichte, bei $t = 20, 40, 60, 80^\circ C$
 Stützkern: PUR-HS (Hüllbauweise)
 Deckschicht: GF-UP (\square) E_{zK} —, (\blacksquare) E_{dK} - - -

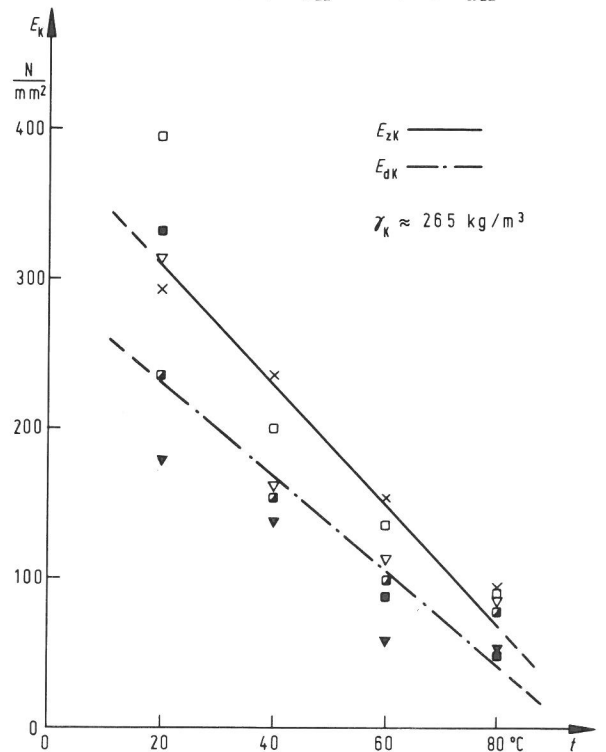


Bild 60
 Stirnabzugversuche
 E_K in Abhängigkeit von der Temperatur
 Stützkern: UP-LB, $\gamma_{K,Soll} = 260 \text{ kg/m}^3$ (Füllbauweise)
 Deckschichten: Alu (∇) } (\blacktriangledown) }
 GF-UP (\square) } (\blacksquare) }
 Glasfaser-
 matte } (\times) }
 450 g/m } (\blacksquare) }
 angeschäumt (\times) } (\blacksquare) }

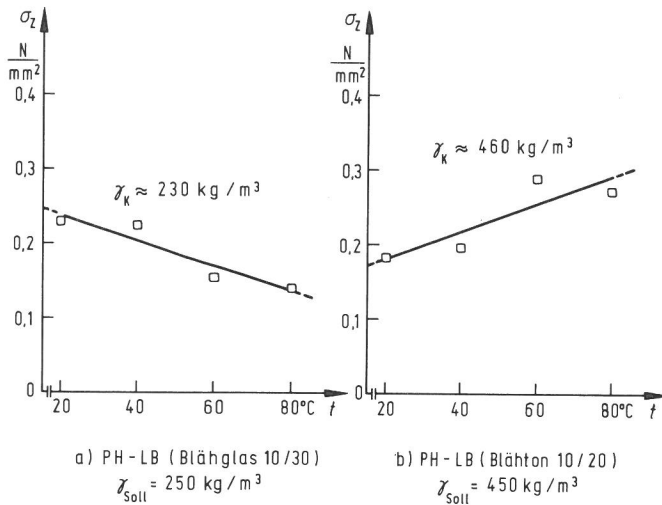


Bild 61

Stirnabzugversuche

σ_z in Abhängigkeit von der Temperatur

Stützkern: PH-LB, $\gamma_{Soll} = 250 \text{ kg/m}^3$ und 450 kg/m^3 (Füllbauweise)

Deckschicht: GF-UP (□)

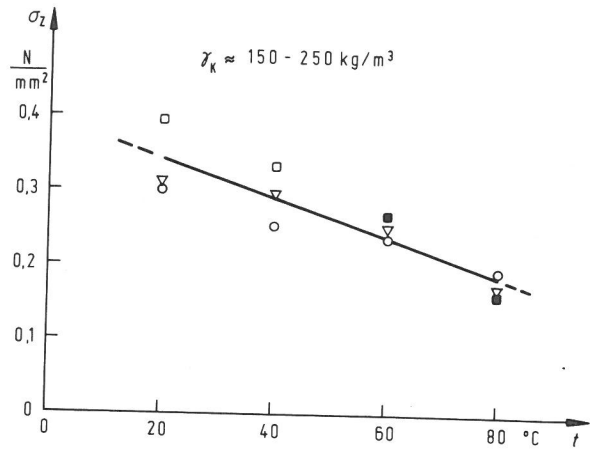


Bild 62

Stirnabzugversuche

σ_z in Abhängigkeit von der Temperatur

Stützkern: PIR-LB, $\gamma_{Soll} = 250 \text{ kg/m}^3$ (Füllbauweise)

Deckschichten: Stahl (○) } Bruch
 Aluminium (▽) } im
 GF-UP (□) } Stützkern (■) Bruch in Randzone

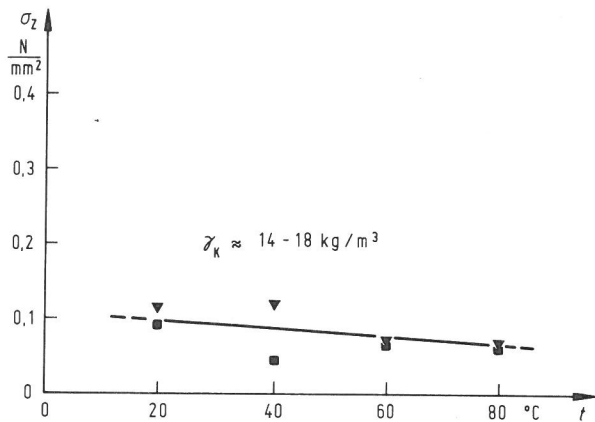


Bild 63

Stirnabzugversuche

σ_z in Abhängigkeit von der Temperatur

Stützkern: PS-HS, $\gamma_{Soll} = 30 \text{ kg/m}^3$ (Hüllbauweise)

Deckschichten: Aluminium (▽) } Bruch (▼) } Bruch in
 GF-UP (□) } im (■) } Randzone
 Stützkern

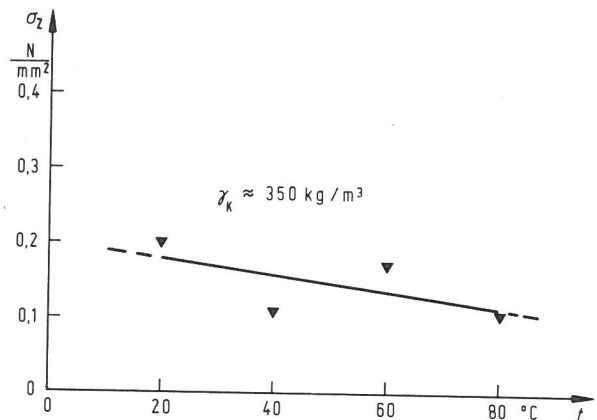


Bild 64

Stirnabzugversuche

σ_z in Abhängigkeit von der Temperatur

Stützkern: PS-LB, $\gamma_{Soll} = 600 \text{ kg/m}^3$ (Füllbauweise)

Deckschicht: Aluminium (▽) Bruch im (▼) Bruch in
 Stützkern Randzone

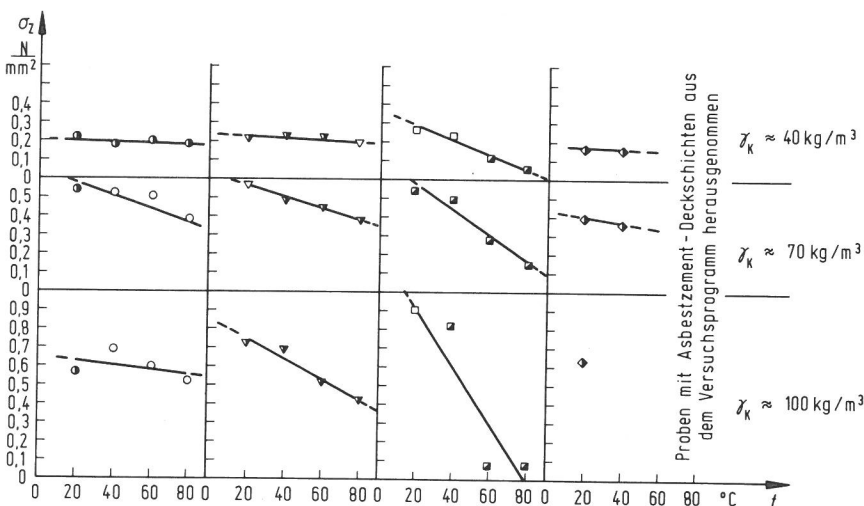


Bild 65

Stirnabzugversuche

σ_z in Abhängigkeit von der Temperatur und Rohdichte

Stützkern: PUR-HS, $\gamma_{Soll} = 40, 70$ und 100 kg/m^3 (Füllbauweise)

Deckschichten: Stahl (○) } Bruch im (●) }
 Aluminium (▽) } Stützkern (▼) } Bruch in
 GF-UP (□) } Randzone (■) }
 Asbestzement (◇) } (◆) }

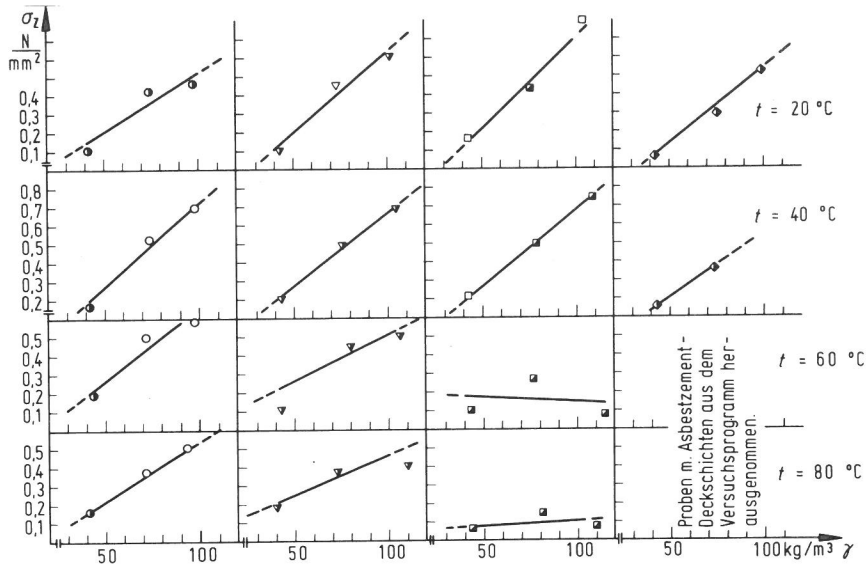


Bild 66

Stirnabzugversuche

σ_z in Abhängigkeit von der Temperatur und Rohdichte Stützkern: PUR-HS, $\gamma_{\text{Soll}} = 40, 70$ und 100 kg/m^3 (Füllbauweise)

Deckschichten: Stahl (○) } Bruch im Stützkern (●) } Bruch in Randzone (◊)
 Aluminium (▽) }
 GF-UP (□) }
 Asbestzement (◇) }

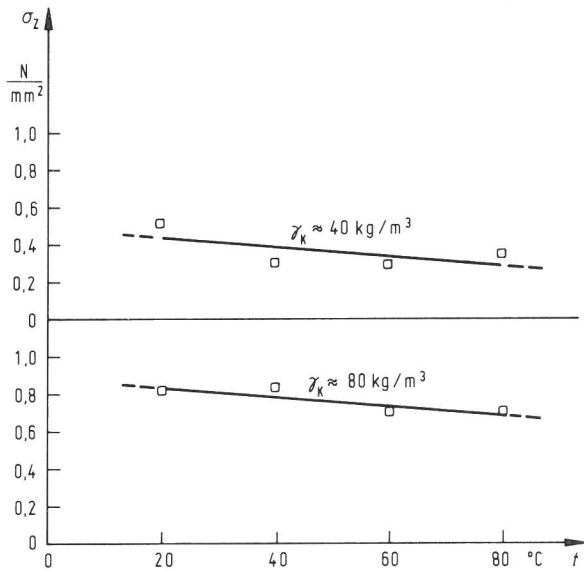


Bild 67

Stirnabzugversuche

σ_{zK} in Abhängigkeit von der Temperatur und Rohdichte Stützkern: PUR-HS, $\gamma_{\text{Soll}} = 40$ und 70 kg/m^3
 Deckschicht: GF-UP (□) (Hüllbauweise)

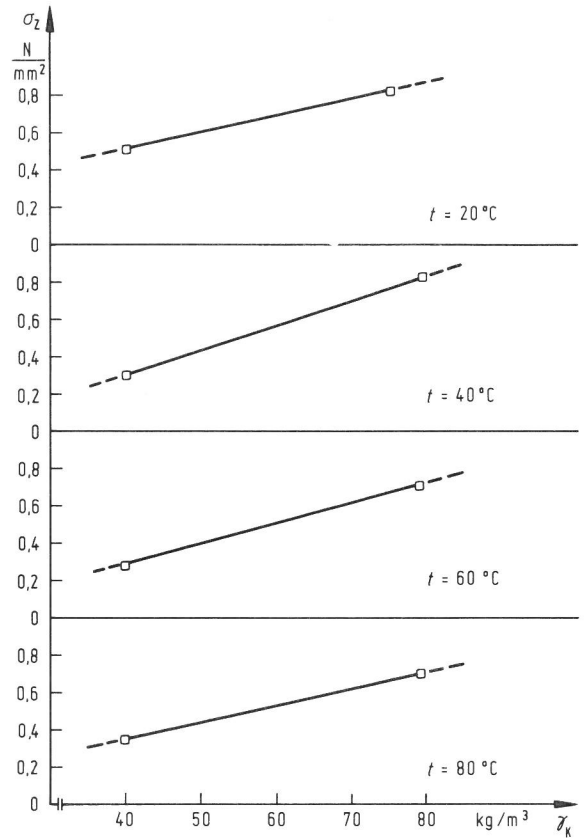


Bild 68

Stirnabzugversuche

σ_z in Abhängigkeit von der Temperatur und Rohdichte Stützkern: PUR-HS, $\gamma_{\text{Soll}} = 40$ und 70 kg/m^3
 Deckschicht: GF-UP (□), (Hüllbauweise)

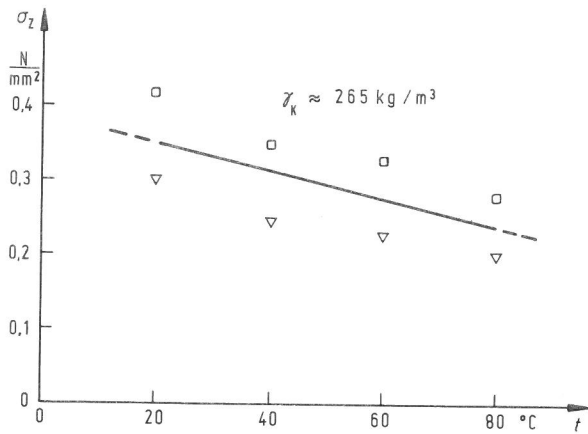


Bild 69
Stirnabzugversuche
 σ_z in Abhängigkeit von der Temperatur
Stützkern: UP-LB, $\gamma_{\text{Soll}} = 260 \text{ kg/m}^3$ (Füllbauweise)
Deckschichten: Aluminium (∇)
GF-UP (\square)

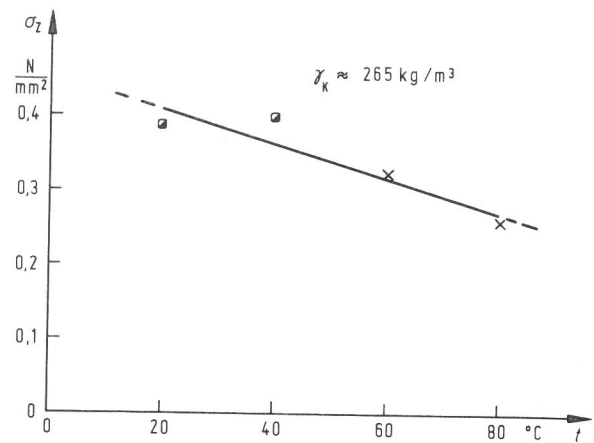


Bild 70
Stirnabzugversuche
 σ_z in Abhängigkeit von der Temperatur
Stützkern: UP-LB, $\gamma_{\text{Soll}} = 260 \text{ kg/m}^3$ (Depot-Verfahren)
Deckschicht: Glasfasermatte 450 g/m^2 angeschäumt
(\times) Bruch im Stützkern
(\blacksquare) Bruch in Randzone

6.1.1 E-Modul des Stützkernes \perp zu den Deckschichtebenen

Im Stirnabzugversuch wird der durchschnittliche E-Modul des gesamten Sandwichelementes einschließlich Deckschichten festgestellt.

Da die Querdehnung der Deckschichten verglichen mit der des Stützkernes vernachlässigbar gering ist, wird der durchschnittliche E-Modul des Sandwichelementes gleich dem E-Modul des Stützkernes angenommen.

E_{zK} und E_{dK} in Abhängigkeit von Rohdichte und Temperatur sind in den Bildern 52-60 aufgrund von Mittelwertbildung und Regressionsanalyse gemäß Ziff. 6.1 dargestellt.

Die Kurven zeigen, daß der E-Modul mit zunehmender Temperatur stark abnimmt. Ausnahmen hiervon bilden PH-LB mit $\gamma_{K,Soll} = 450 \text{ kg/m}^3$, Bild 52, und PS-HS mit $\gamma_{K,Soll} = 30 \text{ kg/m}^3$, Bild 54, bei denen Zunahmen zu verzeichnen sind. Die Ursachen hierfür können zweierlei sein, einmal kann es sich um einen Nachhärteeffekt handeln, zum anderen ist es denkbar, daß der Zellgasdruck mit steigender Temperatur zunimmt und somit die Zellenwände stabilisiert.

In den Tabellen 9 und 10 werden die jeweiligen Systeme im einzelnen besprochen. Die Mittelwerte der Messungen

bei 20 °C und 80 °C sowie die Änderung von E_K in % (ΔE_K) werden zur einfacheren Übersicht angegeben.

System	Stützkern		Deck- schicht	Elastizitätsmodul des Stützkernes						Bemerkungen	Bild	An- lage Bl.
	Typ	$\gamma_{K, \text{SOLL}}$ (kg/m ³)		E_{zK} (N/m ²)			E_{dK} (N/m ²)					
				20°C	80°C	$\Delta E(\%)$	20°C	80°C	$\Delta E(\%)$			
4.1.1.1	PH-LB	250	GF-UP	171	142	-17	199	125	-37	Starke Streuung der Meßergebnisse	47, 52	1
4.1.1.2	"	450	"	222	257	+16	183	131	-28		47, 52	2
4.2.1.1	PIR-LB	250	St	102	31	-70	155	14	-91	Die Darstellung des E-Moduls als Funktion von Rohdichte oder Temperatur ist nur als grobe Vereinfachung zu verstehen.	53	3
4.2.1.2	"	250	Al	35	25	-29	28	26	-7		53	4
4.2.1.3	"	250	GF-UP	85	45	-47	108	44	-59		51, 53	5
4.2.1.4	"	250	AZ									6
4.3.1.1	PS-HS	30	Al	5,8	3,4	-41	1,7	1,0	-41		54	7
4.3.1.2	"	30	GF-UP	3,8	6,9	+82	2,8	1,5	-46		48, 54	8
4.4.1.1	PS-LB	600	Al	216	73	-66	116	54	-54	48, 55	9	
4.5.1-	PUR-HS	40	St Al GF-UP AZ	8,6	8	-7	5,8	4,2	-28	Relativ gleichmäßige Meßergebnisse. Klare Relation zwischen E-Modul und Rohdichte. Bei Temperatursteigerung von 20°C auf 80°C ist eine fast lineare E-Modul-Abnahme festzustellen.	49,56,57	10-21
4.5.1-	"	70		21,5	19	-12	18,8	12,5	-34		49,56,57	
4.5.4	"	100		31,0	23,4	-25	29,4	20,0	-32		49,56,57	

Tabelle 9

E_{zK} und E_{dK} bei den Temperaturen 20 °C und 80 °C.

ΔE ist die Veränderung des E-Moduls in % bei Temperatursteigerung von 20 °C auf 80 °C bezogen auf den Zustand bei 20 °C.

System *)	Stützkern		Deck- schicht	Elastizitätsmodul des Stützkernes						Bemerkungen	Bild	An- lage Bl.
	Typ	$\gamma_{K, \text{SOLL}}$ (kg/m ³)		E_{zK} (N/m ²)			E_{dK} (N/m ²)					
				20°C	80°C	$\Delta E(\%)$	20°C	80°C	$\Delta E(\%)$			
F 4.5.5	PUR-HS	40 80	SAN							Da kein "Knittern" auftrat, wurde die Versuchsreihe abgebrochen.		22 23
H 4.5.6.1	PUR-HS	40	GF-UP	23,6	16,4	-31	19,0	14,3	-25	Vgl. Bemerkungen zu 4.5.1 - 4.5.4	50,58,59	24
H 4.5.6.2	"	70	"	48,7	40,3	-27	44,7	36,5	-18		50,58,59	25
F 4.5.7.1	PUR-HS	100	Depot	14,8						Da kein "Knittern" auftrat, wurde die Versuchsreihe abgebrochen.		26
F 4.5.7.2	"	100	"	25,4								27
F 4.6.1.1	UP-LB	260	Al	315	88	-72	178	52	-71	Relativ gleichmäßige Meßergebnisse. Bei Temperatursteigerung von 20°C auf 80°C ist eine fast lineare E-Modul-Abnahme festzustellen.	60	28
F 4.6.1.2	"	260	GF-UP	395	90	-77	332	51	-85		51,60	29
F 4.6.1.3	"	260	AZ	-	-	-	-	-	-			30
F 4.6.1.4	"	260	Depot	292	86	-71	234	79	-66		60	31

*) F = Füllbauweise
H = Hüllbauweise

Tabelle 10

E_{zK} und E_{dK} bei den Temperaturen 20 °C und 80 °C.

ΔE ist die Veränderung des E-Moduls in % bei Temperatursteigerung von 20 °C auf 80 °C bezogen auf den Zustand bei 20 °C.

6.1.2 Zugfestigkeit des Stützkernes \perp zu den Deckschichtebenen

Im Stirnabzugversuch reißt die Probe entweder

- in der Verbindungsfuge zwischen Deckschicht und Kern
- oder
- im Stützkern selbst.

σ_{zBK} in Abhängigkeit von Rohdichte und Temperatur ist in den Bildern 61-70 aufgrund von Mittelwertbildung und Regressionsanalyse gemäß Ziff. 6.1 dargestellt. Die Proben, bei denen der Bruch in der Verbindungsfuge zwischen Deckschicht und Kern eintrat, wurden in den Bildern besonders vermerkt, bei der Mittelwertbildung jedoch nicht berücksichtigt.

Die Kurven zeigen, daß die Querkzugfestigkeit des Sandwichelementes ebenso wie der E-Modul mit steigender Temperatur abnimmt. Eine Ausnahme hiervon bildet PH-LB mit $\gamma_{K,Soll} = 450 \text{ kg/m}^3$, Bild 61, bei dem eine Zunahme zu verzeichnen ist. Wahrscheinlich handelt es sich hier um einen Nachhärteeffekt.

In den Tabellen 11 bis 21 werden die jeweiligen Systeme im einzelnen besprochen. Die Mittelwerte der Messungen bei 20°C und 80°C sowie die Änderung von σ_{zBK} in % ($\Delta\sigma$) bezogen auf σ_{zBK} bei 20°C werden zur einfacheren Übersicht angegeben.

System	Stützkern		Deckschicht	Zugfestigkeit im Stirnabzugversuch							
	Typ	$\gamma_{K,Soll}$ (kg/m^3)		σ_{zBK} (N/mm^2)			Bruch		Bemerkung	Bild	Anlage Bl.
				20°C	80°C	$\Delta\sigma(\%)$	$^\circ\text{C}$	Bez.			
Füllbauweise 4.1.1.1	PH-LB	250	GF-UP	0,23	0,14	-39	20-80	K/D	$\Delta\sigma_{20-80^\circ\text{C}} = -39\%$ Der Bruch findet teils im Stützkern teils in der Randzone statt. Dabei ist die Zugfestigkeit der Randzone wesentlich geringer als die des Stützkernes. Auch ist die Festigkeit der Randzone stärker temperaturabhängig als die des Stützkerns. Randzone: $\Delta\sigma \approx -87\%$ Stützkern: $\Delta\sigma \approx -8\%$ Sehr große Streuung	47,61	1

Tabelle 11

σ_{zBK} bei den Temperaturen 20°C und 80°C .

$\Delta\sigma$ ist die Veränderung der Festigkeit in % bei Temperatursteigerung von 20°C auf 80°C bezogen auf den Zustand bei 20°C .

System	Stützkern		Deck- schicht	Zugfestigkeit im Stirnabzugversuch							
	Typ	$\gamma_{K, Soll}$ (kg/m ³)		σ_{zBK} (N/mm ²)			Bruch		Bemerkung	Bild	An- lage Bl.
				20°C	80°C	$\Delta\sigma$ (%)	°C	Bez.			
Füllbauweise 4.1.1.2	PH-LB	450	GF-UP	0,18	0,27	+ 50	20- 40	K/D	$\Delta \sigma_{20-80^\circ C} = + 50\%$ Der Bruch findet teils im Stützkern teils in der Rand- zone statt. Im Bereich 60-80°C findet der Bruch nur im Stützkern statt. Diese Tatsa- che in Zusammen- hang mit einer Festig- keitssteigerung von 50% im Bereich 20°- 80 °C läßt auf eine Nachhärtung des Stützkernes schlie- ßen. Wesentlich geringe- re Streuung als System 4.1.1.1.	47,61	2
							50- 80	K			

Tabelle 12

σ_{zBK} bei den Temperaturen 20 °C und 80 °C.

$\Delta\sigma$ ist die Veränderung der Festigkeit in % bei Temperatursteigerung von 20 °C auf 80 °C bezogen auf den Zustand bei 20 °C.

System	Stützkern		Deck- schicht	Zugfestigkeit im Stirnabzugversuch							
	Typ	$\gamma_{K, Soll}$ (kg/m ³)		σ_{zBK} (N/mm ²)			Bruch		Bemerkung	Bild	An- lage Bl.
				20°C	80°C	$\Delta\sigma$ (%)	°C	Bez.			
4.2.1.1	PIR-LB	250	St	0,30	0,19	- 37	20- 80	K	$\Delta \sigma_{20-80^\circ C} \approx - 35 \%$ Versagen ausschließ- lich im Bereich des Stützkernes. Bei niedrigen Tempe- raturen geringe Streuung. Größere Streuung bei den Temperaturen 60 °C- 80 °C.	62	3
4.2.1.2	PIR-LB	250	Al	0,31	0,17	- 35	20- 80	K			
Füllbauweise 4.2.1.3	PIR-LB	250	GF-UP	0,39	0,16	- 59	20- 40 60 80	K D/K D	$\Delta \sigma_{20-80^\circ C} = - 59 \%$ Bei niedrigen Tempe- raturen ist die Haf- tung zwischen Deck- schicht und Stütz- kern gut. Die Probe versagt im Bereich des Hartschaumes. Bei steigender Tem- peratur versagt die Randzone.	51,62	5
4.2.1.4	PIR-LB	250	AZ	0,30	-	-	20	K			

Tabelle 13

σ_{zBK} bei den Temperaturen 20 °C und 80 °C.

$\Delta\sigma$ ist die Veränderung der Festigkeit in % bei Temperatursteigerung von 20 °C auf 80 °C bezogen auf den Zustand bei 20 °C.

System	Stützkern		Deck- schicht	Zugfestigkeit im Stirnabzugversuch								
	Typ	$\gamma_{K, \text{Soll}}$ (kg/m^3)		σ_{zBK} (N/mm^2)			Bruch		Bemerkung	Bild	An- lage Bl.	
				20°C	80°C	$\Delta\sigma$ (%)	°C	Bez.				
Hüllbauweise	4.3.1.1	PS-HS	30	Al	0,11	0,07	- 36	20- 40 60- 80	D/K D	$\Delta \sigma_{20-80} \text{ °C} = - 36\%$ Im Bereich 20°C-40°C Versagen teils im Stützkern teils in der Randzone. Dabei ist die Festigkeit der Randzone deut- lich geringer als die des Stützkerns. Bei höheren Tempe- raturen Versagen nur in der Randzone. Große Streuung!	63	7
	4.3.1.2	PS-HS	30	GF-UP	0,09	0,07	- 22	20- 80	D	$\Delta \sigma_{20-80} \text{ °C} = - 22\%$ Versagen ausschließ- lich in der Rand- zone. Große Streuung!	48,63	8
	4.4.1.1	PS-LB	600	Al	0,20	0,11	- 45	20- 80	D	$\Delta \sigma_{20-80} \text{ °C} = - 45\%$ Versagen überwie- gend in der Randzone. Große Streuung!	48,64	9

Tabelle 14

σ_{zBK} bei den Temperaturen 20 °C und 80 °C.

$\Delta\sigma$ ist die Veränderung der Festigkeit in % bei Temperatursteigerung von 20 °C auf 80 °C bezogen auf den Zustand bei 20 °C.

System	Stützkern		Deck- schicht	Zugfestigkeit im Stirnabzugversuch								
	Typ	$\gamma_{K, \text{Soll}}$ (kg/m^3)		σ_{zBK} (N/mm^2)			Bruch		Bemerkung	Bild	An- lage Bl.	
				20°C	80°C	$\Delta\sigma$ (%)	°C	Bez.				
Füllbauweise	4.5.1.1	PUR-HS	40	St	0,21	0,18	- 14	20- 80	D	$\Delta \sigma_{20-80} \text{ °C} = - 14 \%$ Versagen praktisch nur in der Randzone. Vereinzelte Brüche im Stützkern lassen auf eine ca. 50 % höhere Hartschaum- als Randzonenfestig- keit schließen.	65,66	10
	4.5.1.2	PUR-HS	70	St	0,53	0,33	- 38	20 40- 60 80	D K D/K	$\Delta \sigma_{20-80} \text{ °C} = - 38 \%$ Versagen teils in der Randzone teils im Stützkern. Bei den untersuchten Temperaturen sind die Festigkeiten der Randzone und des Stützkernes na- hezu gleich. Bei 60°C und 80 °C könnten Einzeler- gebnisse auf eine Schwächung der Ran- dzone hindeuten.	65,66	11

Tabelle 15

σ_{zBK} bei den Temperaturen 20 °C und 80 °C.

$\Delta\sigma$ ist die Veränderung der Festigkeit in % bei Temperatursteigerung von 20 °C auf 80 °C bezogen auf den Zustand bei 20 °C.

System	Stützkern		Deck- schicht	Zugfestigkeit im Stirnabzugversuch							
	Typ	$\gamma_{K, \text{Soll}}$ (kg/m ³)		σ_{zBK} (N/mm ²)			Bruch		Bemerkung	Bild	An- lage Bl.
				20°C	80°C	$\Delta\sigma$ (%)	°C	Bez.			
Füllbauweise 4.5.1.3	PUR-HS	100	St	0,56	0,51	- 9	20 40- 80	D K	$\Delta \sigma_{20-80^\circ\text{C}} = - 9 \%$ Bei 20 °C überwie- gend Randzonenver- sagen, bei 80 °C ausschließlich Bruch im Stützkern. Als Tendenz läßt sich mit zunehmen- der Temperatur eine Verbesserung der Randzone und eine Verschlechte- rung der Stützkern- festigkeit fest- stellen.	65,66	12

Tabelle 16

σ_{zBK} bei den Temperaturen 20 °C und 80 °C.

$\Delta\sigma$ ist die Veränderung der Festigkeit in % bei Temperatursteigerung von 20 °C auf 80 °C bezogen auf den Zustand bei 20 °C.

System	Stützkern		Deck- schicht	Zugfestigkeit im Stirnabzugversuch							
	Typ	$\gamma_{K, \text{Soll}}$ (kg/m ³)		σ_{zBK} (N/mm ²)			Bruch		Bemerkung	Bild	An- lage Bl.
				20°C	80°C	$\Delta\sigma$ (%)	°C	Bez.			
4.5.2.1	PUR-HS	40	A1	0,21	0,19	- 10	20 40- 60	D D/K	$\Delta \sigma_{20-80^\circ\text{C}} = -10/-42\%$ Bei den untersuch- ten Temperaturen sind die Festigkei- ten der Randzone u. des Stützkernes na- hezu gleich. Relativ geringe Streuungen.	65,66	13
4.5.2.2	PUR-HS	70	A1	0,56	0,38	- 32	20 40- 80	K D			
4.5.2.3	PUR-HS	100	A1	0,72	0,42	- 42	20 40- 60 80	D D/K D			
Füllbauweise 4.5.3.1	PUR-HS	40	GF-UP	0,26	0,06	- 77	20- 40 60- 80	K D	$\Delta \sigma_{20-80^\circ\text{C}} = -70/-91\%$ Bei niedrigen Tem- peraturen ist die Haftung zwischen Deckschicht und Stützkern gut. Bei steigender Tempe- ratur versagt die Randzone. Mit zunehmender Temperatur steigt die Streuung der Meßergebnisse.	49,65 66	16
4.5.3.2	PUR-HS	70	GF-UP	0,54	0,16	- 70	20- 40 40- 60	D/K D	49,65 66	17	
4.5.3.3	PUR-HS	100	GF-UP	0,89	0,08	- 91	20 40 60- 80	K D/K D			

Tabelle 17

σ_{zBK} bei den Temperaturen 20 °C und 80 °C.

$\Delta\sigma$ ist die Veränderung der Festigkeit in % bei Temperatursteigerung von 20 °C auf 80 °C bezogen auf den Zustand bei 20 °C.

System	Stützkern		Deck- schicht	Zugfestigkeit im Stirnabzugversuch					Bemerkung	Bild	An- lage Bl.		
	Typ	$\gamma_{K, Soll}$ (kg/m ³)		σ_{zBK} (N/mm ²)			Bruch						
				20°C	80°C	$\Delta\sigma$ (%)	°C	Bez.					
Füllbauweise 4.5.4.1 4.5.4.2 4.5.4.3	PUR-HS	40	AZ	0,18	-		20-40	D	Bereits bei 20 °C liegt die Festigkeit des Verbundelementes niedriger als bei den übrigen PUR-HS-Proben. Hierbei versagen die PUR-HS/AZ-Proben ausschließlich in der Randzone. Messungen bei höheren Temperaturen erscheinen nicht notwendig, da eine Verbesserung der Meßergebnisse nicht zu erwarten ist.	65,66	19		
	PUR-HS	70	AZ	0,40	-		20-40	D				65,66	20
	PUR-HS	100	AZ	0,65	-		20	D					

Tabelle 18

σ_{zBK} bei den Temperaturen 20 °C und 80 °C.

$\Delta\sigma$ ist die Veränderung der Festigkeit in % bei Temperatursteigerung von 20 °C auf 80 °C bezogen auf den Zustand bei 20 °C.

System	Stützkern		Deck- schicht	Zugfestigkeit im Stirnabzugversuch					Bemerkung	Bild	An- lage Bl.
	Typ	$\gamma_{K, Soll}$ (kg/m ³)		σ_{zBK} (N/mm ²)			Bruch				
				20°C	80°C	$\Delta\sigma$ (%)	°C	Bez.			
Füllbauweise 4.5.5	PUR-HS	40	SAN						Diese Versuchsreihe wurde unterbrochen, weil kein "Knittern" auftrat.		22
		80	SAN								23

Tabelle 19

σ_{zBK} bei den Temperaturen 20 °C und 80 °C.

$\Delta\sigma$ ist die Veränderung der Festigkeit in % bei Temperatursteigerung von 20 °C auf 80 °C bezogen auf den Zustand bei 20 °C.

System	Stützkern		Deck- schicht	Zugfestigkeit im Stirnabzugversuch					Bemerkung	Bild	An- lage Bl.
	Typ	$\gamma_{K, Soll}$ (kg/m ³)		σ_{zBK} (N/mm ²)			Bruch				
				20°C	80°C	$\Delta\sigma$ (%)	°C	Bez.			
Hüllbauweise 4.5.6.1 4.5.6.2	PUR-HS	40	GF-UP	0,53	0,35	- 34	20-80	K	$\Delta \sigma_{20-80°C} = -34/35\%$ Bei den untersuchten Temperaturen findet der Bruch nur im Stützkern statt. Die Streuung der Meßergebnisse ist relativ groß. Die Güte des Sandwichverbundes ist jedoch nicht so temperaturabhängig wie System 4.5.3.1 - 4.5.3.4.	50,67 68	24
	PUR-HS	70	GF-UP	0,52	0,70	+ 35	20-80	K			
Depot 4.5.7.1 4.5.7.2	PUR-HS	100	GG 163	0,42					Diese Versuchsreihe wurde abgebrochen, weil kein "Knittern" auftrat.		26
	PUR-HS	100	GG 400								27

Tabelle 20

σ_{zBK} bei den Temperaturen 20 °C und 80 °C.

$\Delta\sigma$ ist die Veränderung der Festigkeit in % bei Temperatursteigerung von 20 °C auf 80 °C bezogen auf den Zustand bei 20 °C.

System	Stützkern		Deck- schicht	Zugfestigkeit im Stirnabzugversuch								
	Typ	γ_K, Soll (kg/m ³)		σ_{zBK} (N/mm ²)			Bruch		Bemerkung	Bild	An- lage Bl.	
				20°C	80°C	$\Delta\sigma$ (%)	°C	Bez.				
Füllbauweise	4.6.1.1	UP-LB	260	A1				20-80	K	$\Delta \sigma_{20-80^\circ\text{C}} \approx - 35 \%$ Die Proben versagen praktisch nur im Stützkern. Trotz großer Streuungen muß die Haftung zwischen Deckschicht und Stützkern als sehr gut bezeichnet werden.	69	28
	4.6.1.2	UP-LB	260	GF-UP	0,37	0,24	- 35	20-80	K		51,69	29
	4.6.1.3	UP-LB	260	AZ				20	K			30
	4.6.1.4	UP-LB	260	Depot				20-60-80	D/K K			70

Tabelle 21

σ_{zBK} bei den Temperaturen 20 °C und 80 °C.

$\Delta\sigma$ ist die Veränderung der Festigkeit in % bei Temperatursteigerung von 20 °C auf 80 °C bezogen auf den Zustand bei 20 °C.

6.2 Biegeversuch

Im Biegeversuch werden folgende Daten aufgenommen:

Last-Durchbiegungsdiagramm, Bruchlast.

Bei den durchgeführten Versuchen kommen 2 Versagensarten infrage:

- a) Werkstoffversagen
- b) Lokale Instabilität der Deckschichten, das sog. "Knittern"

Im nachfolgenden werden gemessene Daten den rechnerischen Bruch- und Deformationskriterien gegenübergestellt.

In den Tabellen 22 bis 30 wird der Faktor "k" aufgrund gemessener Vorbeulen (Ziff. 5.7), der Werkstoffkennwerte gemäß Anlagen Bl. 1-31 und der kritischen Länge (a) einer halben Knitterwelle rechnerisch ermittelt.

Diese Werte werden in den Tabellen 31 bis 42, Spalte 13, aufgeführt und mit den aus den Biegeversuchen ermittelten "k"-Faktoren (Spalte 12) verglichen.

|| Größenordnungsmäßig kann von einer guten Übereinstimmung gesprochen werden.

Spalte 14 enthält schließlich abgerundete Werte, die für die Praxis gedacht sind. In den Bildern 83 bis 89 ist "k"

in Abhängigkeit von der Temperatur für jedes untersuchte System dargestellt.

In den Spalten 7 und 8 werden gemessene (f_B) und rechnerische (f'_B) Durchbiegung gegenübergestellt.

Auch hier ist die Übereinstimmung zwischen den beiden Werten gut.

Bei der Berechnung der Biegesteifigkeiten gemäß Spalte 5 wurde der Anteil des Stützkernes vernachlässigt, sofern dieser 5 % der Biegesteifigkeit der Deckschichten nicht überstieg.

Die jeweiligen Steifigkeitsanteile sind in den Spalten 5 und 6 zusammengestellt.

Aufgrund der Teilsteifigkeiten wurden die Biegespannungen in Deckschicht und Stützkern nach Gl. (32) und (33) für den Bruchzustand ermittelt und in den Spalten 9 und 10 aufgeführt.

Hierbei wurde angenommen, daß Versagen gleichzeitig in Deckschicht und Stützkern auftritt. Bei einigen Stützkernen war das offensichtlich nicht der Fall.

Bei Stützkernen aus PH-LB, PS-LB und UP-LB wurden bei $1/3$ bis $1/4$ der Bruchlast Risse im Zugbereich festgestellt, vgl. Bild 30 und 31. Die Risse fingen bei Dehnungen entsprechend der Bruchdehnung des Stützkernmaterials an und weiteten sich bei zunehmender Last nach oben aus. Ein "Knick" in der Momenten-Durchbiegungskurve entsprechend Bild 73 konnte nicht beobachtet werden, vgl. z. B. Bild 75 und Bild 82.

Da noch nicht abgesehen werden kann, ob "gerissene Zugzone" des Stützkernes auf Dauer schädlich ist, wird vorgeschlagen, den Gebrauchszustand mit einer Sicherheit $\nu = 1,1$ gegen Zugrisse im Stützkern nachzuweisen.

Eine "Umkehrung" des Versagensbildes konnte bei einigen Systemen mit steigender Temperatur beobachtet werden. War bei 20°C (z. B. UP-LB/GF-UP, Anlage Bl. 29) Werkstoffversagen der unteren Deckschicht maßgeblich, wurde bei höhe-

ren Temperaturen instabiles Versagen der oberen Deckschicht festgestellt.

Diese Beobachtung führt zu dem Schluß, daß die Deckschichten bei der höchsten und der niedrigsten Gebrauchstemperatur in Bezug auf Werkstoffversagen und Instabilität nachgewiesen werden sollten.

Die Bilder 75 bis 82 zeigen typische Momenten-Durchbiegungsdiagramme.

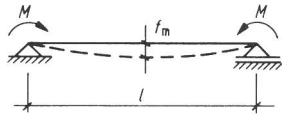


Bild 71
Biegeversuch, Systemskizze

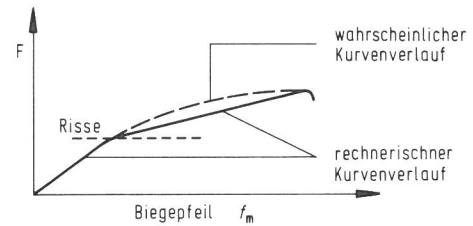


Bild 73
Schema des Last - Durchbiegungsdiagrammes

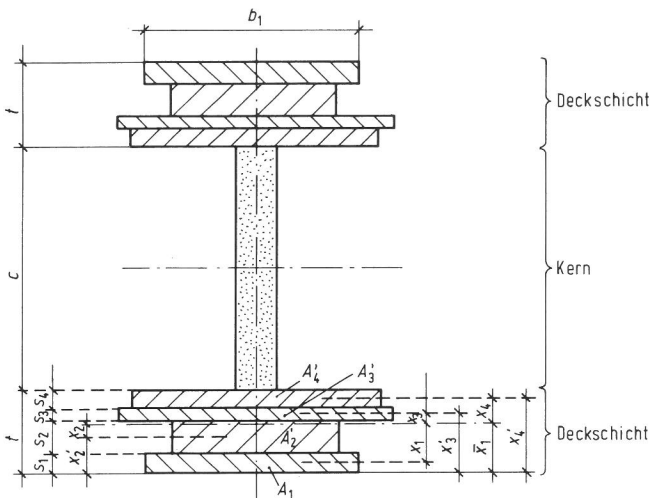


Bild 72
„Transformierte Querschnitte“
Schema eines symmetrischen Sandwichelementes

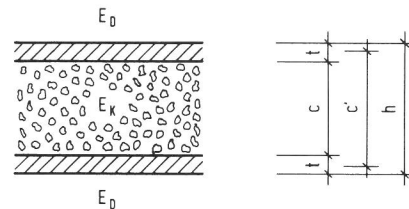


Bild 74
Symmetrischer Sandwichquerschnitt
Bezeichnungen für die Ermittlung der Trägheitsmomente und Biegesteifigkeiten

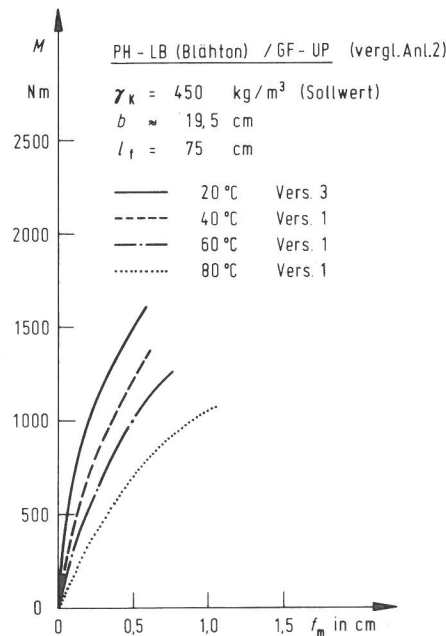
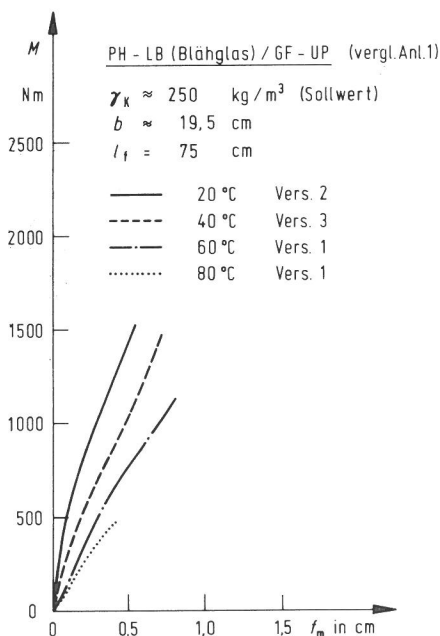


Bild 75
Biegeversuche, Momenten-Durchbiegungskurven
 $M = f(f_m)$

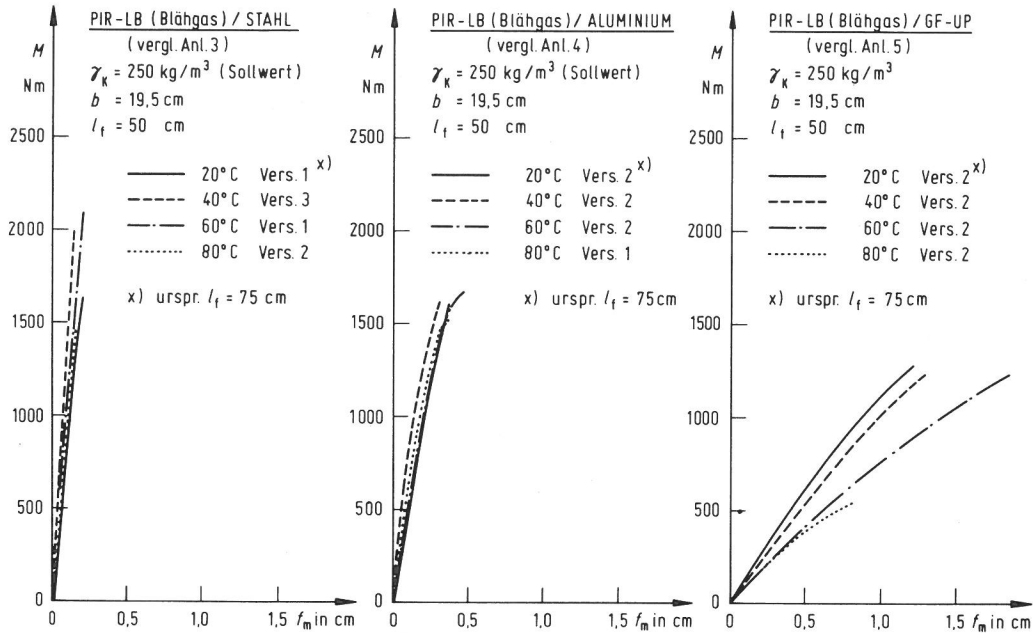


Bild 76
 Biegeversuche, Momenten-Durchbiegungskurven
 $M = f(f_m)$

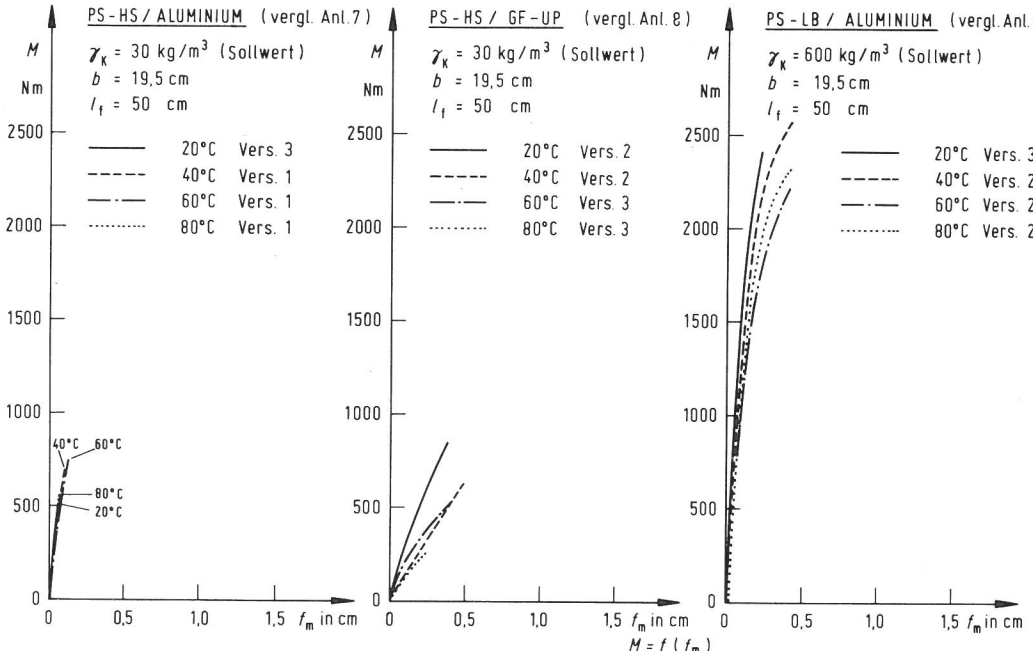


Bild 77
 Biegeversuche, Momenten-Durchbiegungskurven
 $M = f(f_m)$

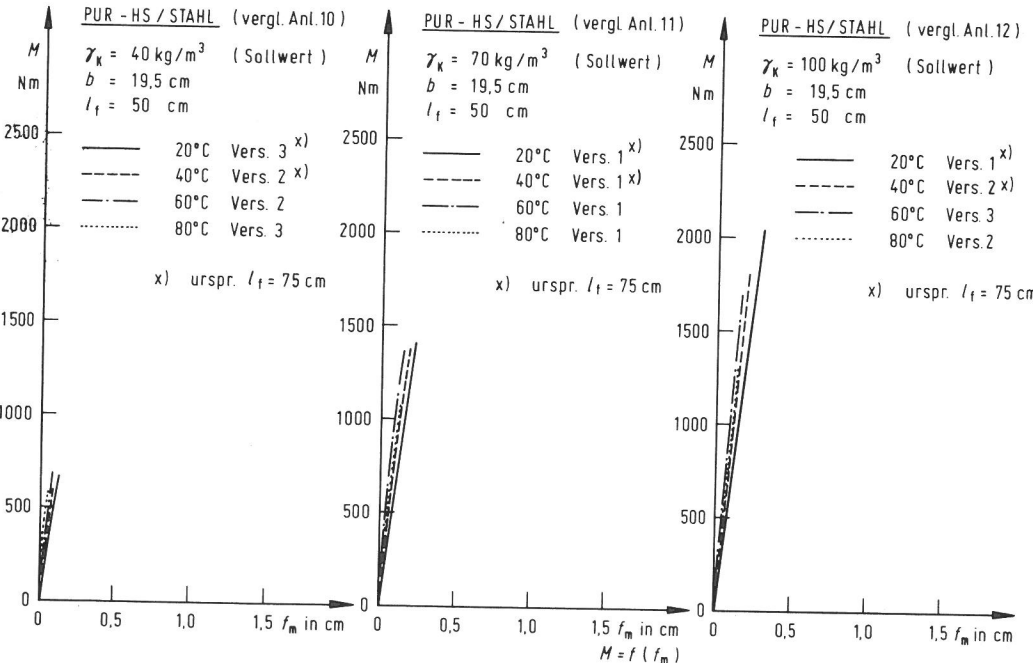


Bild 78
 Biegeversuche, Momenten-Durchbiegungskurven
 $M = f(f_m)$

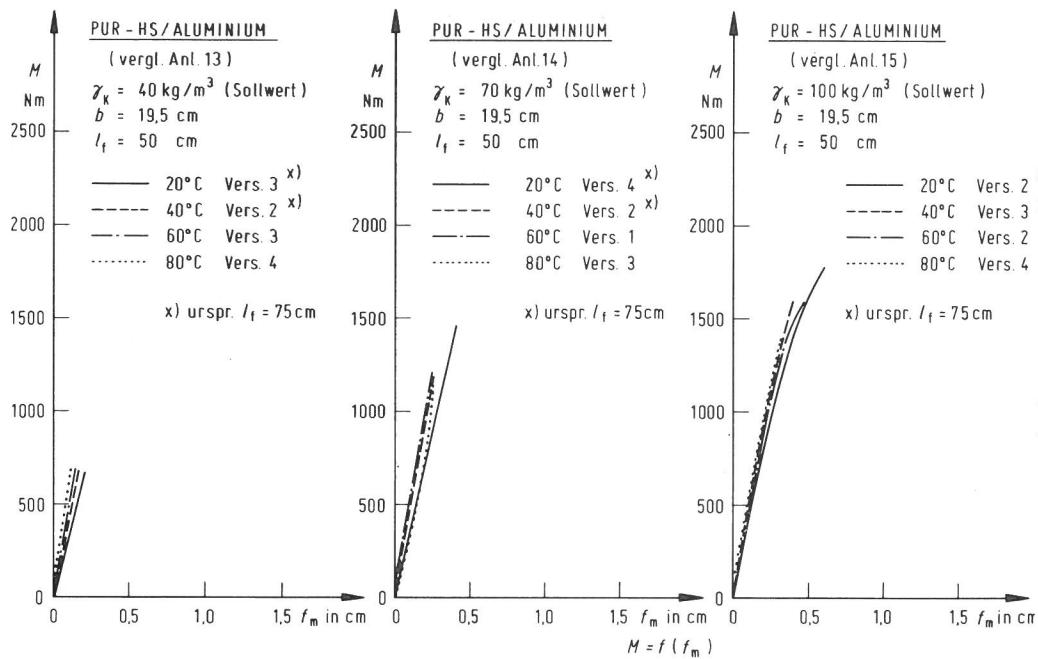


Bild 79
Biegeversuche, Momenten-
Durchbiegungskurven
 $M = f(f_m)$

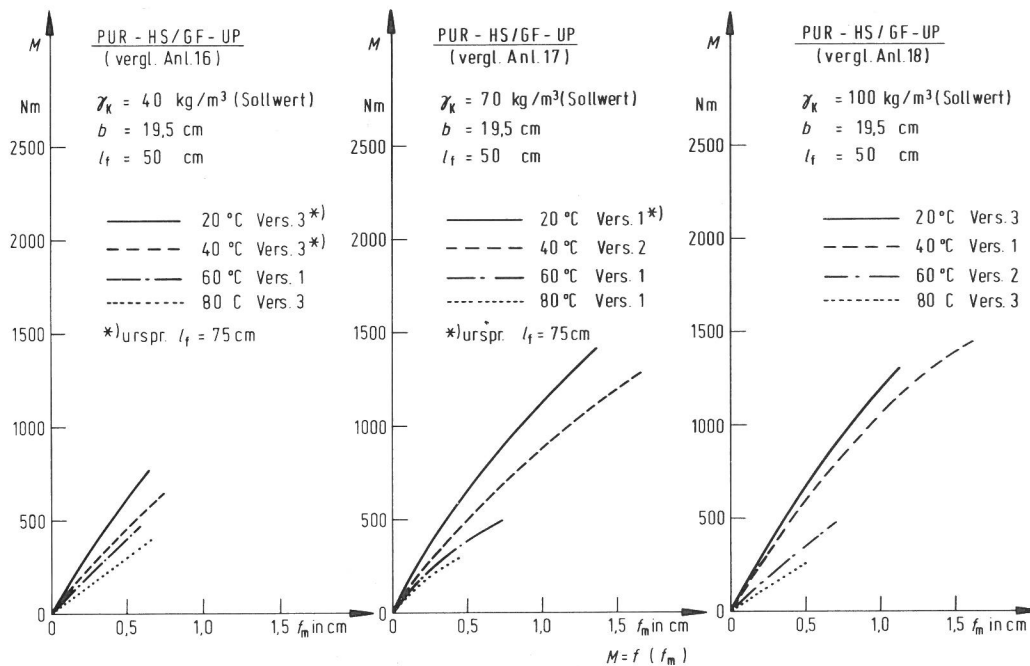


Bild 80
Biegeversuche, Momenten-
Durchbiegungskurven
 $M = f(f_m)$

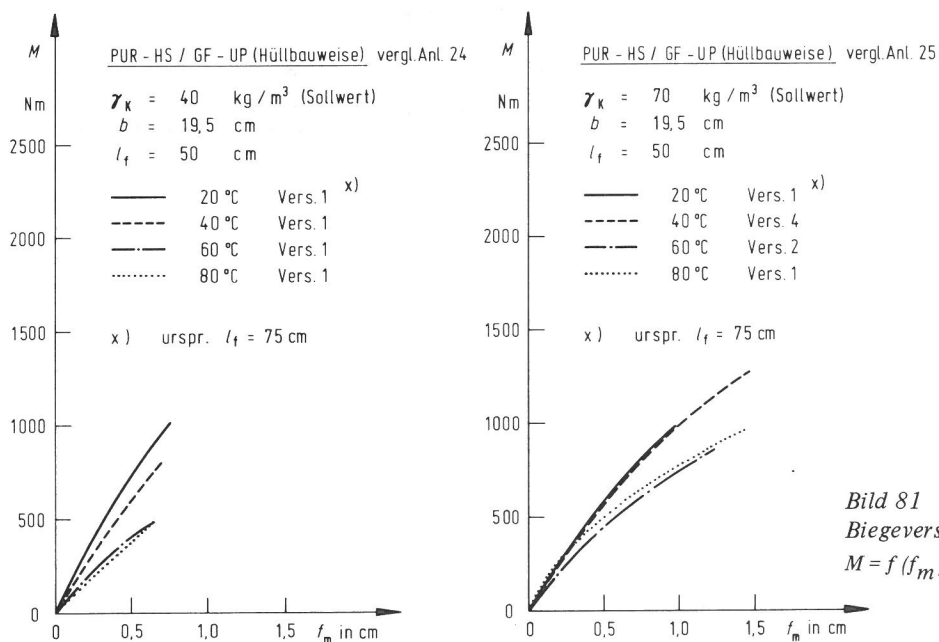


Bild 81
Biegeversuche, Momenten-
Durchbiegungskurven
 $M = f(f_m)$

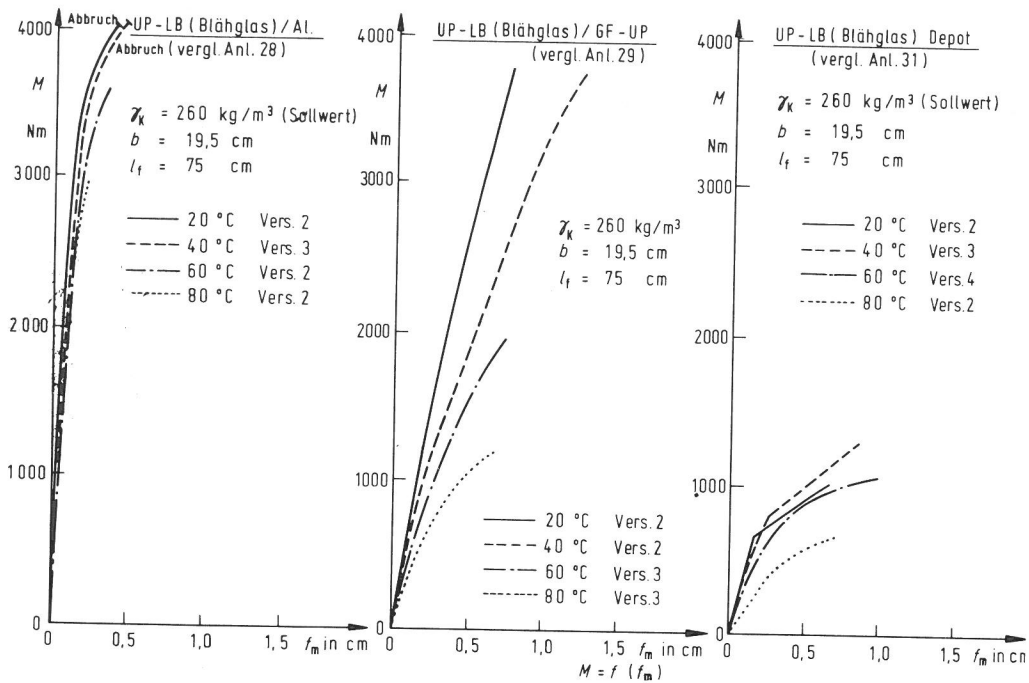


Bild 82
Biegeversuche, Momenten-Durchbiegungskurven $M = f(f_m)$

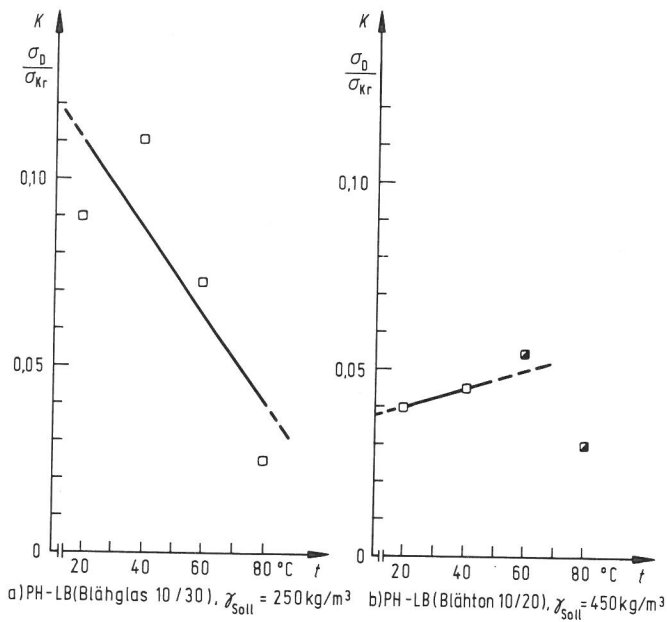


Bild 83
„K“ in Abhängigkeit von der Temperatur
Stützkern: PH-LB, $\gamma_{Soll} = 250 \text{ kg/m}^3$ und 450 kg/m^3 (Füllbauweise)
Deckschicht: GF-UP (□) „Knittern“ (■) Werkstoffversagen

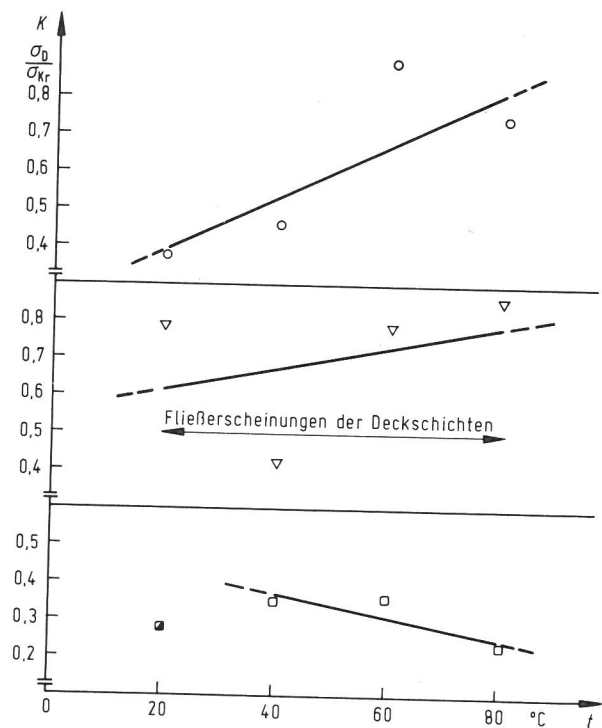


Bild 84
„K“ in Abhängigkeit von der Temperatur
Stützkern: PIR-LB, $\gamma_{Soll} = 250 \text{ kg/m}^3$ (Füllbauweise)
Deckschichten: Stahl (○) „Knittern“
Aluminium (▽) Werkstoffversagen
GF-UP (□) Werkstoffversagen

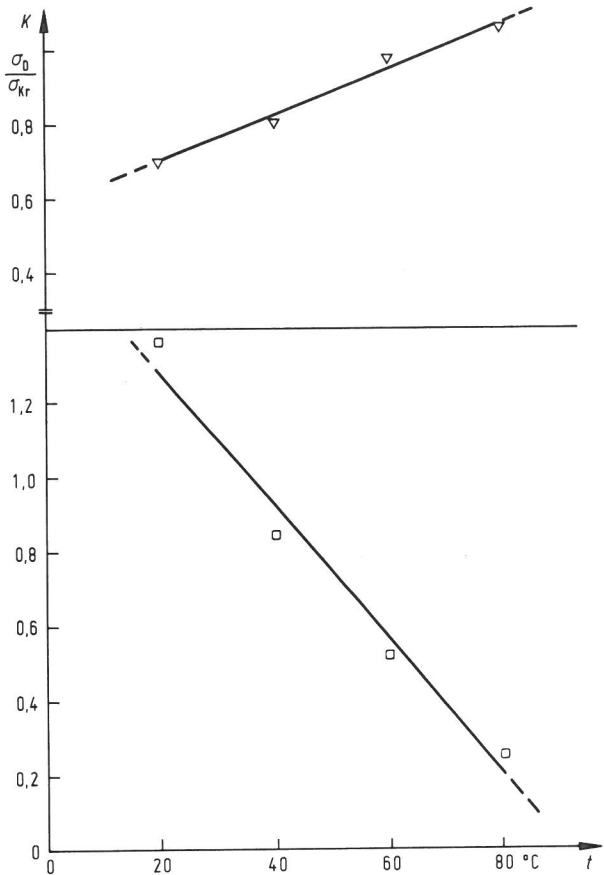


Bild 85
 „K“ in Abhängigkeit von der Temperatur
 Stützkern: PS-HS, $\gamma_{Soll} = 30 \text{ kg/m}^3$ (Hüllbauweise)
 Deckschichten: Alu (∇)
 GF-UP (\square) } „Knittern“

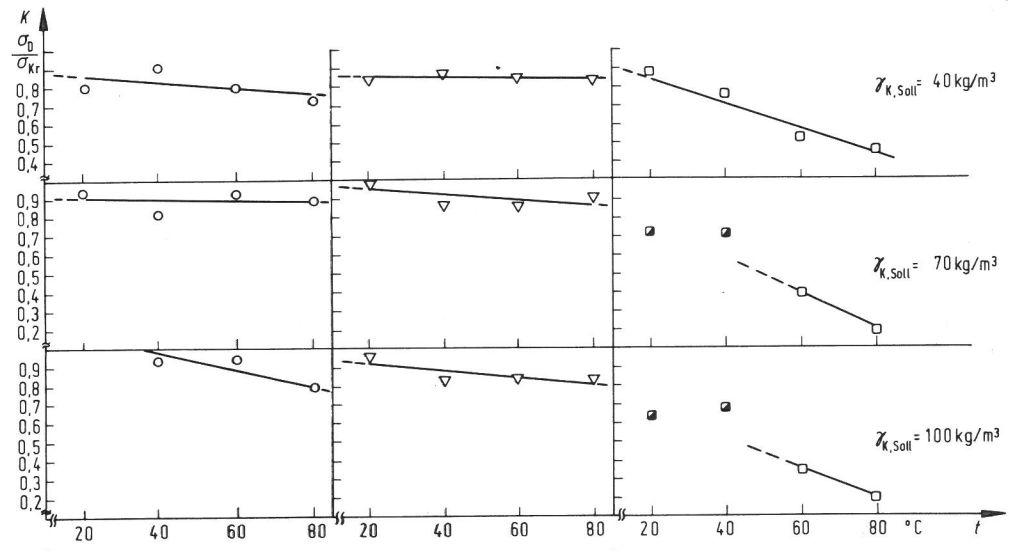


Bild 86 ▼
 „K“ in Abhängigkeit von Temperatur und Rohdichte
 Stützkern: PUR-HS, $\gamma_{K,Soll} = 40, 70 \text{ und } 100 \text{ kg/m}^3$
 (Füllbauweise)
 Deckschichten: Stahl (\circ)
 Aluminium (∇)
 GF-UP (\square) } „Knittern“
 (\blacksquare) Werkstoffversagen

$\gamma_{K,Soll} = 40 \text{ kg/m}^3$ Asbestzement-Deckschichten zeigten stets Werkstoffversagen.

$\gamma_{K,Soll} = 70 \text{ kg/m}^3$

$\gamma_{K,Soll} = 100 \text{ kg/m}^3$

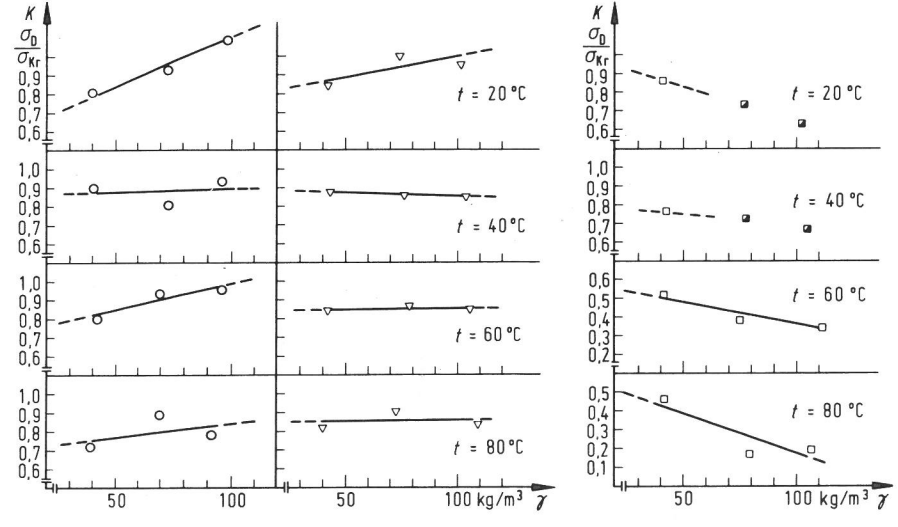


Bild 87
 „K“ in Abhängigkeit von der Temperatur und Rohdichte

Stützkern: PUR-HS, $\gamma_{Soll} = 40, 70 \text{ und } 100 \text{ kg/m}^3$
 (Füllbauweise)

Deckschichten: Stahl (\circ)
 Aluminium (∇)
 GF-UP (\square) } „Knittern“
 (\blacksquare) Werkstoffversagen

Asbestzement-Deck-schichten zeigten stets Werkstoffversagen.

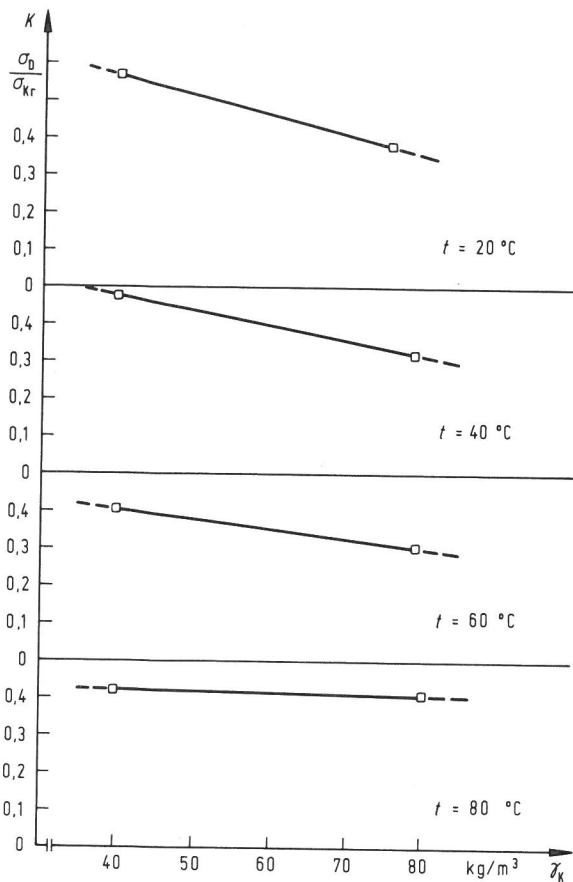


Bild 88
 „K“ in Abhängigkeit von der Temperatur und Rohdichte
 Stützkern: PUR-HS, $\gamma_{Soll} = 40$ und 70 kg/m^3
 Deckschicht: GF-UP (\square) (Hüllbauweise)

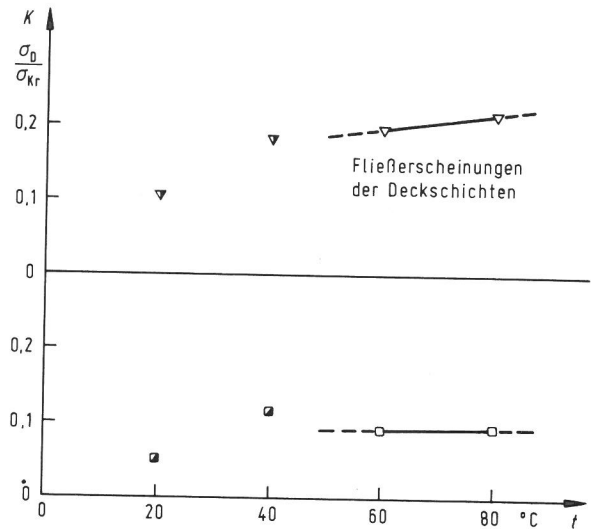


Bild 89
 „K“ in Abhängigkeit von der Temperatur
 Stützkern: UP-LB, $\gamma_{Soll} = 260 \text{ kg/m}^3$ (Füllbauweise)
 Deckschichten: Aluminium (∇) } „Knittern“ (∇) } Werkstoff-
 GF-UP (\square) } versagen (\square) }

6.2.1 Rechnerische Durchbiegung

Biegeversuch gemäß Bild 71

System: Träger auf 2 Stützen mit gleichgroßen Endmomenten.

Die Ermittlung der Durchbiegung erfolgte nach dem für homogene und isotrope Querschnitte üblichen Verfahren unter der Annahme einer gradlinigen Spannungsverteilung über die Trägerhöhe. Dabei wird die Querkontraktion

$$\nu = 0$$

angenommen.

Die Durchbiegung in Feldmitte beträgt:

$$f = \frac{M \cdot l^2}{8 \cdot E \cdot I} \quad (27)$$

Darin bedeuten:

- M - Endmomente
- l - Spannweite
- E - Elastizitätsmodul
- I - Trägheitsmoment

Die Biegesteifigkeit wird grundsätzlich nach der Methode der transformierten Einzelschichten ermittelt, Bild 72.

Fläche einer transformierten Einzelschicht

$$A'_i = A_i \cdot \frac{E_i}{E_1} \quad (28)$$

Die Eigensteifigkeit der Deckschichten beträgt 0,1 - 0,2% der Gesamtsteifigkeit des Sandwichelementes und wird vernachlässigt.

Die Biegesteifigkeit eines symmetrischen Sandwichelementes (vgl. Bild 74) kann daher nach folgender Formel errechnet werden:

$$\Sigma E I = 2 (A_i \cdot E_i) \cdot \left(\frac{c^2}{2} \right) + 1/12 \cdot b \cdot c^3 \cdot E_K \quad (29)$$

Darin bedeuten:

A_i = Querschnitt der Einzelkomponenten in Belastungsrichtung

E_i = E-Modul der Einzelkomponenten in Belastungsrichtung

h = Gesamtdicke

t = Deckschichtdicke

c = Kerndicke

E_K = E-Modul des Stützkernes

c' = innerer Hebel = $h - t$

Einsetzen von Gl. (29) in Gl. (27) ergibt:

$$f = \frac{M \cdot l^2}{8 \cdot \Sigma E I} \quad (30)$$

6.2.2 Rechnerische Spannungen

Ebenso wie die Biegesteifigkeit werden die Bruchmomente nach dem Verfahren der "transformierten Querschnitte" ermittelt.

Dabei ist mit "Bruch" der Zeitpunkt des endgültigen Versagens gemeint. Vor diesem Zustand können Risse im Stützkern und Matrix entstehen, die lediglich zu einem Knick im Spannungs-/Dehnungsdiagramm führen. Eine Laststeigerung ist danach noch möglich, Bild 73.

Trägheitsmoment eines symmetrischen Sandwichelementes
($I_1 = I_K$)

$$I' = 2 \left(\frac{c'}{2}\right)^2 \cdot A_D \cdot \frac{E_D}{E_K} + 1/12 \cdot b \cdot c^3 \quad (31)$$

Spannungen:

$$\begin{aligned} \sigma_D &= \frac{M}{I'} \cdot \frac{E_D}{E_K} \cdot \frac{h}{2} \\ &= \frac{M}{\frac{c'^2}{2} \cdot b \cdot t + \frac{1}{12} \cdot b \cdot c^3 \cdot \frac{E_K}{E_D}} \cdot \frac{h}{2} \\ &\approx \frac{M}{\Sigma E I} \cdot E_D \cdot \frac{c'}{2} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \sigma_K &= \frac{M}{I'} \cdot \frac{E_K}{E_K} \cdot \frac{c}{2} \\ &= \frac{M}{\frac{c'^2}{2} \cdot b \cdot t \cdot \frac{E_D}{E_K} + \frac{1}{12} \cdot b \cdot c^3} \cdot \frac{c}{2} \\ &\approx \frac{M}{\Sigma E I} \cdot E_K \cdot \frac{c}{2} \end{aligned} \quad (33)$$

6.2.3 Rechnerische Ermittlung des Faktors "k" auf der Grundlage des Vorbeulens

Nach Ziff. 3.4 beträgt die Zugspannung in der Verbindungsfuge zwischen Deckschicht und Kern

$$\sigma_{zK} = \frac{\pi \cdot W_0}{a} (\omega - 1) \cdot \sqrt{G_K \cdot E_{zK}} \quad (34)$$

Auf die Schubspannungen wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Bei Kunststoffhartschäumen ist jedoch σ_{zBK} erfahrungsgemäß die maßgebliche Bemessungsgröße.

Das Verhältnis

$$\frac{W_0}{a} = \frac{\text{Wellenamplitude}}{\text{Wellenlänge}}$$

wird konstant angenommen, also

$$\frac{W_0}{a} = \kappa \quad (35)$$

$$\omega - 1 = \frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr} - \sigma_{dD}} = \frac{1}{\frac{\sigma_{kr}}{\sigma_{dD}} - 1} \quad (36)$$

Einsetzen von " κ ", " $\omega - 1$ " und $G_K \approx E_K/2,6$ in Gl. (34) ergibt:

$$\sigma_{zK} \approx 1,95 \cdot \kappa \cdot \frac{1}{\frac{\sigma_{kr}}{\sigma_{dD}} - 1} \cdot E_{zK} \quad (37)$$

Nach Ziff. 6.2.4 ist

$$\frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr}} = k$$

Gleichung (37) wird nach " k " gelöst und $\sigma_{zK} = \sigma_{zBK}$ gesetzt:

$$k = \frac{\sigma_{zBK}}{1,95 \cdot \kappa \cdot E_{zK} + \sigma_{zBK}} = \frac{1}{\frac{1,95 \cdot \kappa}{\epsilon_K} + 1} \quad (38)$$

Das Ergebnis der Betrachtungen über das Vorbeulverhalten der Deckschichten ist aus den nachfolgenden Tabellen zu ersehen:

- Spalte 1 : Sandwichsystem nach Ziff. 4
- Spalte 2 : Versuchstemperatur
- Spalte 3 : Deckschichtwerkstoff
- Spalte 4 : Deckschichtdicke (cm)
- Spalte 5 : Stützkernwerkstoff
- Spalte 6 : Bruchdehnung des Stützkernes ermittelt aus den Anlagen Bl.1-31 als

$$\epsilon_K = \frac{\sigma_{zBK}}{E_{zK}} \cdot 100 \quad (\%)$$

- Spalte 7 : Maßgebliche Deckschichtaußermittigkeit, "Vorbeulen" nach Ziff. 5.7, W_0 (cm).

- Spalte 8 : $a = 2 \cdot t \left(\frac{E_{dD}}{E_{zK}} \right)^{1/3}$

ist die Länge einer halben "Knitterwelle" nach [3].

- Spalte 9 : Über eine einfache rechnerische Überlegung unter Berücksichtigung immer vorhandener Deckschichtungenauigkeiten und aufnehmbarer Stützkerndeformationen senkrecht zu den Deckschichten wird

$$k = \frac{\sigma_{dD}}{k_r}$$

nach Gl. (38) ermittelt.

System	t (°C)	Deckschicht		Stützkern		W ₀ (cm)	a (cm)	k
		Werkstoff	t (cm)	Werkstoff	$\frac{\sigma_{zBK}}{E_{zK}} \cdot 100$ (%)			
4.1.1.1 PH-LB/GF-UP Y _{K,Soll} = 250 kg/m ³ Y _K ≈ 230 kg/m ³ (vgl. Anlage Bl. 1)	20	GF-UP	≈ 0,12	PH-LB	$\frac{0,230}{172,4} \cdot 100 = 0,13$	0,010	0,83	0,0526
	40	"	≈ 0,12	"	$\frac{0,225}{126,1} \cdot 100 = 0,18$	0,010	0,85	0,0731
	60	"	≈ 0,12	"	$\frac{0,153}{162,2} \cdot 100 = 0,09$	0,010	0,61	0,0274
	80	"	≈ 0,12	"	$\frac{0,140}{141,7} \cdot 100 = 0,08$	0,010	0,59	0,0236
4.1.1.2 PH-LB/GF-UP Y _{K,Soll} = 450 kg/m ³ Y _K ≈ 462 kg/m ³ (vgl. Anlage Bl. 2)	20	GF-UP	≈ 0,12	PH-LB	$\frac{0,183}{222,1} \cdot 100 = 0,08$	0,010	0,76	0,0301
	40	"	≈ 0,12	"	$\frac{0,197}{270,4} \cdot 100 = 0,09$	0,010	0,63	0,0287
	60	"	≈ 0,12	"	$\frac{0,289}{215,7} \cdot 100 = 0,13$	0,010	0,63	0,0402
	80	"	≈ 0,12	"	$\frac{0,273}{257,2} \cdot 100 = 0,10$	0,010	0,52	0,0260

Tabelle 22

Rechnerische Ermittlung von „k“ auf der Grundlage gemessener „Vorbeulen“

System	t (°C)	Deckschicht		Stützkern		W ₀ (cm)	a (cm)	k
		Werkstoff	t (cm)	Werkstoff	$\frac{\sigma_{zBK}}{E_{zK}} \cdot 100$ (%)			
4.2.1.1 PIR-LB/St Y _{K,Soll} = 250 kg/m ³ Y _K ≈ 167 kg/m ³ (vgl. Anlage Bl. 3)	20	St	0,06	PIR-LB	$\frac{0,298}{101,5} \cdot 100 = 0,30$	0,004	1,52	0,36
	40	"	0,06	"	$\frac{0,251}{87,5} \cdot 100 = 0,29$	0,004	1,60	0,37
	60	"	0,06	"	$\frac{0,236}{37,1} \cdot 100 = 0,64$	0,004	2,12	0,63
	80	"	0,06	"	$\frac{0,194}{30,8} \cdot 100 = 0,63$	0,004	2,26	0,64
4.2.1.2 PIR-LB/Al Y _{K,Soll} = 250 kg/m ³ Y _K ≈ 160 kg/m ³ (vgl. Anlage Bl. 4)	20	Al	0,08	PIR-LB	$\frac{0,312}{34,9} \cdot 100 = 0,90$	0,004	2,01	0,70
	40	"	0,08	"	$\frac{0,296}{84,4} \cdot 100 = 0,35$	0,004	1,49	0,40
	60	"	0,08	"	$\frac{0,249}{31,3} \cdot 100 = 0,80$	0,004	2,08	0,72
	80	"	0,08	"	$\frac{0,170}{24,6} \cdot 100 = 0,69$	0,004	2,26	0,66
4.2.1.3 PIR-LB/GF-UP Y _{K,Soll} = 250 kg/m ³ Y _K ≈ 203 kg/m ³ (vgl. Anlage Bl. 5)	20	GF-UP	0,20	PIR-LB	$\frac{0,393}{84,6} \cdot 100 = 0,47$	0,010	1,77	0,31
	40	"	0,20	"	$\frac{0,332}{57,4} \cdot 100 = 0,58$	0,010	1,89	0,36
	60	"	0,20	"	$\frac{0,267}{85,9} \cdot 100 = 0,31$	0,010	1,41	0,18
	80	"	0,20	"	$\frac{0,162}{44,7} \cdot 100 = 0,36$	0,010	1,77	0,25
4.2.1.4 PIR-LB/AZ (vgl. Anlage Bl. 6)	"Knittern" trat bei diesem System nicht auf							

Tabelle 23

Rechnerische Ermittlung von „k“ auf der Grundlage gemessener „Vorbeulen“

1	2	3	4	5	6	7	8	9
System	t (°C)	Deckschicht		Stützkern		W _o (cm)	a (cm)	k
		Werkstoff	t (cm)	Werkstoff	$\epsilon_{zBK} = \frac{\sigma_{zBK}}{E_{zK}} \cdot 100$ (%)			
4.3.1.1 PS-HS/Al Y _{K,Soll} = 30 kg/m ³ Y _K ≈ 14 kg/m ³ (vgl. Anlage Bl. 7)	20	Al	0,10	PS-HS	$\frac{0,114}{5,83} \cdot 100 = 1,95$	0,020	4,55	0,69
	40	"	0,10	"	$\frac{0,120}{5,84} \cdot 100 = 2,05$	0,020	4,55	0,70
	60	"	0,10	"	$\frac{0,070}{5,18} \cdot 100 = 1,35$	0,020	4,73	0,62
	80	"	0,10	"	$\frac{0,066}{3,36} \cdot 100 = 1,96$	0,020	5,47	0,73
Hüllbauweise 4.3.1.2 PS-HS/GF-UP Y _{K,Soll} = 30 kg/m ³ Y _K ≈ 18 kg/m ³ (vgl. Anlage Bl. 8)	20	GF-UP	0,23	PS-HS	$\frac{0,090}{3,84} \cdot 100 = 2,35$	0,020	6,59	0,80
	40	"	0,22	"	$\frac{0,044}{5,66} \cdot 100 = 0,78$	0,020	5,18	0,51
	60	"	0,23	"	$\frac{0,072}{8,52} \cdot 100 = 0,84$	0,020	4,34	0,48
	80	"	0,22	"	$\frac{0,065}{6,94} \cdot 100 = 0,93$	0,020	4,04	0,49
4.4.1.1 PS-LB/Al Y _{K,Soll} = 600 kg/m ³ Y _K ≈ 353 kg/m ³ (vgl. Anlage Bl. 9)	20	Al	0,11	PS-LB	$\frac{0,204}{216,2} \cdot 100 = 0,09$	0,003	1,50	0,19
	40	"	0,11	"	$\frac{0,107}{132,0} \cdot 100 = 0,08$	0,003	1,45	0,17
	60	"	0,09	"	$\frac{0,173}{156,6} \cdot 100 = 0,11$	0,003	1,37	0,20
	80	"	0,09	"	$\frac{0,107}{72,6} \cdot 100 = 0,15$	0,003	1,77	0,31

Tabelle 24
Rechnerische Ermittlung von „k“ auf der Grundlage gemessener „Vorbeulen“

1	2	3	4	5	6	7	8	9
System	t (°C)	Deckschicht		Stützkern		W _o (cm)	a (cm)	k
		Werkstoff	t (cm)	Werkstoff	$\epsilon_{zBK} = \frac{\sigma_{zBK}}{E_{zK}} \cdot 100$ (%)			
4.5.1.1 PUR-HS/St Y _{K,Soll} = 40 kg/m ³ Y _K ≈ 41 kg/m ³ (vgl. Anlage Bl.10)	20	St	0,06	PUR-HS	$\frac{0,213}{8,55} \cdot 100 = 2,49$	0,006	3,47	0,88
	40	"	0,06	"	$\frac{0,175}{6,28} \cdot 100 = 2,78$	0,006	3,84	0,90
	60	"	0,06	"	$\frac{0,188}{8,11} \cdot 100 = 2,32$	0,006	3,53	0,87
	80	"	0,06	"	$\frac{0,178}{7,75} \cdot 100 = 2,30$	0,006	3,58	0,88
Hüllbauweise 4.5.1.2 PUR-HS/St Y _{K,Soll} = 70 kg/m ³ Y _K ≈ 72 kg/m ³ (vgl. Anlage Bl.11)	20	St	0,06	PUR-HS	$\frac{0,534}{20,3} \cdot 100 = 2,63$	0,004	2,60	0,90
	40	"	0,06	"	$\frac{0,617}{21,1} \cdot 100 = 2,45$	0,004	2,56	0,89
	60	"	0,06	"	$\frac{0,482}{18,5} \cdot 100 = 2,61$	0,004	2,68	0,90
	80	"	0,06	"	$\frac{0,332}{16,7} \cdot 100 = 1,98$	0,004	2,77	0,88
4.5.1.3 PUR-HS/St Y _{K,Soll} = 100kg/m ³ Y _K ≈ 96 kg/m ³ (vgl. Anlage Bl.12)	20	St	0,06	PUR-HS	$\frac{0,560}{29,8} \cdot 100 = 1,88$	0,002	2,29	0,92
	40	"	0,06	"	$\frac{0,680}{29,0} \cdot 100 = 2,24$	0,002	2,31	0,93
	60	"	0,06	"	$\frac{0,589}{25,7} \cdot 100 = 2,29$	0,002	2,40	0,93
	80	"	0,06	"	$\frac{0,513}{24,2} \cdot 100 = 2,12$	0,002	2,45	0,93

Tabelle 25
Rechnerische Ermittlung von „k“ auf der Grundlage gemessener „Vorbeulen“

1	2	3	4	5	6	7	8	9
System	t (°C)	Deckschicht		Stützkern		W ₀ (cm)	a (cm)	k
		Werkstoff	t (cm)	Werkstoff	$\frac{\sigma_{zBK}}{\epsilon_{zBK} \cdot E_{zK}} \cdot 100$ (%)			
4.5.2.1 PUR-HS/Al $\gamma_{K,Soll} = 40 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 43 \text{ kg/m}^3$ (vgl. Anlage Bl.13)	20	Al	0,08	PUR-HS	$\frac{0,210}{8,48} \cdot 100 = 2,47$	0,007	3,21	0,85
	40	"	0,08	"	$\frac{0,215}{8,04} \cdot 100 = 2,67$	0,007	3,27	0,86
	60	"	0,08	"	$\frac{0,210}{8,95} \cdot 100 = 2,35$	0,007	3,16	0,84
	80	"	0,08	"	$\frac{0,188}{8,47} \cdot 100 = 2,23$	0,007	3,21	0,84
Füllbauweise 4.5.2.2 PUR-HS/Al $\gamma_{K,Soll} = 70 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 76 \text{ kg/m}^3$ (vgl. Anlage Bl.14)	20	"	0,08	PUR-HS	$\frac{0,557}{19,59} \cdot 100 = 2,84$	0,005	2,43	0,88
	40	"	0,08	"	$\frac{0,494}{18,33} \cdot 100 = 2,70$	0,005	2,49	0,87
	60	"	0,08	"	$\frac{0,454}{20,03} \cdot 100 = 2,27$	0,005	2,41	0,85
	80	"	0,08	"	$\frac{0,375}{17,09} \cdot 100 = 2,20$	0,005	2,54	0,85
4.5.2.3 PUR-HS/Al $\gamma_{K,Soll} = 100 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 106 \text{ kg/m}^3$ (vgl. Anlage Bl.15)	20	Al	0,08	PUR-HS	$\frac{0,719}{28,35} \cdot 100 = 2,54$	0,003	2,15	0,90
	40	"	0,08	"	$\frac{0,689}{29,45} \cdot 100 = 2,34$	0,003	2,12	0,89
	60	"	0,08	"	$\frac{0,512}{29,22} \cdot 100 = 1,75$	0,003	2,13	0,86
	80	"	0,08	"	$\frac{0,416}{26,19} \cdot 100 = 1,59$	0,003	2,21	0,86

Tabelle 26

Rechnerische Ermittlung von „k“ auf der Grundlage gemessener „Vorbeulen“

1	2	3	4	5	6	7	8	9
System	t (°C)	Deckschicht		Stützkern		W ₀ (cm)	a (cm)	k
		Werkstoff	t (cm)	Werkstoff	$\frac{\sigma_{zBK}}{\epsilon_{zBK} \cdot E_{zK}} \cdot 100$ (%)			
4.5.3.1 PUR-HS/GF-UP $\gamma_{K,Soll} = 40 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 44 \text{ kg/m}^3$ (vgl. Anlage Bl.16)	20	GF-UP	0,2	PUR-HS	$\frac{0,262}{8,85} \cdot 100 = 2,96$	0,030	3,77	0,74
	40	"	0,2	"	$\frac{0,228}{7,73} \cdot 100 = 2,94$	0,030	3,69	0,65
	60	"	0,2	"	$\frac{0,113}{8,21} \cdot 100 = 1,37$	0,030	3,08	0,42
	80	"	0,2	"	$\frac{0,064}{6,88} \cdot 100 = 0,92$	0,030	3,30	0,43
Füllbauweise 4.5.3.2 PUR-HS/GF-UP $\gamma_{K,Soll} = 70 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 79 \text{ kg/m}^3$ (vgl. Anlage Bl.17)	20	GF-UP	0,2	PUR-HS	$\frac{0,538}{21,84} \cdot 100 = 2,46$	0,020	2,79	0,64
	40	"	0,2	"	$\frac{0,489}{22,02} \cdot 100 = 2,22$	0,020	2,60	0,60
	60	"	0,2	"	$\frac{0,271}{22,70} \cdot 100 = 1,23$	0,020	2,22	0,41
	80	"	0,2	"	$\frac{0,155}{20,83} \cdot 100 = 0,74$	0,020	2,28	0,30
4.5.3.3 PUR-HS/GF-UP $\gamma_{K,Soll} = 100 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 110 \text{ kg/m}^3$ (vgl. Anlage Bl.18)	20	GF-UP	0,2	PUR-HS	$\frac{0,890}{30,95} \cdot 100 = 2,37$	0,010	2,48	0,75
	40	"	0,2	"	$\frac{0,749}{31,56} \cdot 100 = 2,38$	0,010	2,31	0,75
	60	"	0,2	"	$\frac{0,083}{16,92} \cdot 100 = 0,49$	0,010	2,42	0,38
	80	"	0,2	"	$\frac{0,078}{19,48} \cdot 100 = 0,40$	0,010	2,33	0,32

Tabelle 27

Rechnerische Ermittlung von „k“ auf der Grundlage gemessener „Vorbeulen“

1	2	3	4	5	6	7	8	9
System	t (°C)	Deckschicht		Stützkern		W ₀ (cm)	a (cm)	k
		Werkstoff	t (cm)	Werkstoff	$\epsilon_{zBK} = \frac{\sigma_{zBK}}{E_{zK}} \cdot 100$ (%)			
4.5.4.1 PUR-HS/AZ $\gamma_{K,Soll} = 40 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 42 \text{ kg/m}^3$ (vgl. Anlage Bl.19)	20	AZ	0,55	PUR-HS	$\frac{0,177}{8,23} \cdot 100 = 2,15$	0,02	14,69	"Knittern" trat bei diesem System nicht auf
	40	"	0,55	"	$\frac{0,158}{8,43} \cdot 100 = 1,87$	0,02	14,58	
	60	"	0,55	"				
	80	"	0,55	"				
4.5.4.2 PUR-HS/AZ $\gamma_{K,Soll} = 70 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 76 \text{ kg/m}^3$ (vgl. Anlage Bl.20)	20	AZ	0,55	PUR-HS	$\frac{0,398}{22,51} \cdot 100 = 1,77$		10,51	
	40	"	0,55	"	$\frac{0,371}{18,09} \cdot 100 = 2,05$		11,30	
	60	"	0,55	"				
	80	"	0,55	"				
4.5.4.3 PUR-HS/AZ $\gamma_{K,Soll} = 100 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 99 \text{ kg/m}^3$ (vgl. Anlage Bl.21)	20	AZ	0,55	"	$\frac{0,645}{32,43} \cdot 100 = 1,99$		9,30	
	40	"	0,55	"				
	60	"	0,55	"				
	80	"	0,55	"				

Tabelle 28
Rechnerische Ermittlung von „k“ auf der Grundlage gemessener „Vorbeulen“

1	2	3	4	5	6	7	8	9
System	t (°C)	Deckschicht		Stützkern		W ₀ (cm)	a (cm)	k
		Werkstoff	t (cm)	Werkstoff	$\epsilon_{zBK} = \frac{\sigma_{zBK}}{E_{zK}} \cdot 100$ (%)			
4.5.6.1 PUR-HS/GF-UP $\gamma_{K,Soll} = 40 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 40 \text{ kg/m}^3$ (vgl. Anlage Bl.24)	20	GF-UP	0,2	PUR-HS	$\frac{0,526}{23,6} \cdot 100 = 1,40$	0,02	2,72	0,49
	40	"	0,2	"	$\frac{0,305}{22,3} \cdot 100 = 1,37$	0,02	2,59	0,48
	60	"	0,2	"	$\frac{0,285}{17,9} \cdot 100 = 1,59$	0,02	2,38	0,49
	80	"	0,2	"	$\frac{0,347}{16,4} \cdot 100 = 2,12$	0,02	2,47	0,57
4.5.6.2 PUR-HS/GF-UP $\gamma_{K,Soll} = 70 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 78 \text{ kg/m}^3$ (vgl. Anlage Bl.25)	20	GF-UP	0,2	PUR-HS	$\frac{0,515}{48,7} \cdot 100 = 1,06$	0,02	2,13	0,37
	40	"	0,2	"	$\frac{0,681}{48,6} \cdot 100 = 1,42$	0,02	2,00	0,42
	60	"	0,2	"	$\frac{0,713}{39,5} \cdot 100 = 1,81$	0,02	1,83	0,62
	80	"	0,2	"	$\frac{0,703}{40,3} \cdot 100 = 1,74$	0,02	1,83	0,45
4.5.7.1 PUR-HS/GG 163 $\gamma_{K,Soll} = 100 \text{ kg/m}^3$ (vgl. Anlage Bl.26) 4.5.7.2 PUR-HS/GG 400 $\gamma_{K,Soll} = 100 \text{ kg/m}^3$ (vgl. Anlage Bl.27)	"Knittern" trat bei diesen Systemen nicht auf							

Tabelle 29
Rechnerische Ermittlung von „k“ auf der Grundlage gemessener „Vorbeulen“

1	2	3	4	5	6	7	8	9
System	t (°C)	Deckschicht		Stützkern		W ₀ (cm)	a (cm)	k
		Werkstoff	t (cm)	Werkstoff	$\frac{\sigma_{zBK}}{E_{zK}} \cdot 100$ (%)			
4.6.1.1 UP-LB/Al Y _{K,Soll} = 260 kg/m ³ Y _K ≈ 263 kg/m ³ (vgl. Anlage Bl. 28)	20	Al	0,100	UP-LB	$\frac{0,301}{314,8} \cdot 100 = 0,10$	0,004	1,20	0,13
	40	"	0,100	"	$\frac{0,247}{162,7} \cdot 100 = 0,15$	0,004	1,50	0,22
	60	"	0,100	"	$\frac{0,230}{113,6} \cdot 100 = 0,20$	0,004	1,69	0,30
	80	"	0,100	"	$\frac{0,201}{87,6} \cdot 100 = 0,23$	0,004	1,84	0,35
Füllbauweise 4.6.1.2 UP-LB/GF-UP Y _{K,Soll} = 260 kg/m ³ Y _K ≈ 267 kg/m ³ (vgl. Anlage Bl. 29)	20	GF-UP	0,174	UP-LB	$\frac{0,418}{394,7} \cdot 100 = 0,11$	0,01	0,79	0,02
	40	"	0,174	"	$\frac{0,351}{198,9} \cdot 100 = 0,18$	0,01	0,95	0,08
	60	"	0,174	"	$\frac{0,331}{136,0} \cdot 100 = 0,24$	0,01	0,87	0,10
	80	"	0,174	"	$\frac{0,278}{89,8} \cdot 100 = 0,31$	0,01	0,98	0,13
4.6.1.3 UP-LB/AZ (vgl. Anlage Bl. 30)	"Knittern" trat bei diesen Systemen nicht auf							
Depot 4.6.1.4 UP-LB / 450 kg/m ³ (vgl. Anlage Bl. 31)								

Tabelle 30

Rechnerische Ermittlung von „k“ auf der Grundlage gemessener „Vorbeulen“

6.2.4 Tabellarische Gegenüberstellung von rechnerischen und gemessenen Bruchkriterien

- gemessene Durchbiegung f_B
- rechnerische Durchbiegung f'_B
- Spannungen im Stützkern beim Versagen des Sandwichelementes σ_K
- Druckspannungen in der Deckschicht beim Versagen des Sandwichelementes σ_{dD}
- Faktor "k" aus dem Biegeversuch.

Das Ergebnis der Biegeversuche ist aus den nachfolgenden Tabellen zu ersehen:

- Spalte 3 : Bruchmoment M_B (Nm)
gemäß Anlagen Bl. 1-31
- Spalte 4 : Biegesteifigkeit $\Sigma E I$ (Nmm²)
- Spalte 5/6 : Anteil der Biegesteifigkeit des Stützkernes $\Sigma E I_K$ (%) und der Deckschicht $\Sigma E I_D$ (%)
- Spalte 7 : gemessene Durchbiegung im Bruchzustand f_B (mm)

- Spalte 8 : rechnerische Durchbiegung f'_B für den Bruchzustand nach Gl. (30) mit $M = M_B$
- Spalte 9 : Spannung des Stützkernes im Bruchzustand σ_K (N/mm²) nach Gl. (33)
Annahme:
 $\epsilon_K = \epsilon_D$
- Spalte 10 : Spannung der Deckschicht im Bruchzustand σ_{dD} (N/mm²) nach Gl. (32)
Annahme:
 $\epsilon_K = \epsilon_D$
- Spalte 11 : "Knitterspannung" nach Gl. (3) unter Zugrundelegung der mittleren Meßwerte aus den Anlagen Bl. 1-31
- Spalte 12 : Die Division der aus dem Versuch ermittelten Biegebruchspannung gemäß Ziff. 6.2.2, Gl. (32), mit der rechnerischen Knitterspannung gemäß Ziff. 2, Gl. (3), ergibt
- $$k = \frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr}}$$
- In den Bildern 83-89 wurde "k" in Abhängigkeit von ν_K und Temperatur (°C) für die jeweiligen Sandwichsysteme dargestellt.
- Die Punkte in den graphischen Darstellungen von "k" sind aus den entsprechenden Mittelwerten gemäß Anlagen Bl. 1-31 ermittelt worden.
- Für "k" wurden aus den Mittelwerten, soweit sinnvoll, Regressionsgeraden wie bei den Stirnabzugversuchen gebildet.
- Hierbei wurde nur Versagen der gedrückten Deckschicht berücksichtigt.
- Spalte 13 : rechnerisch ermittelte k-Werte unter Berücksichtigung des Vorbeulens der Deckschichten nach Ziff. 6.2.3 .
- Spalte 14 : enthält Faktor "k" als Empfehlung für die Praxis.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
System	t (°C)	M _B (Nm)	Biegesteifigkeit			Durchbiegung (mm)		Bruchspannungen (N/mm ²)			k _{Versuch} = $\frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr}}$	k _{rechnerisch}	k
			ΣEI (Nmm ²)	ΔEI_K (%)	ΔEI_D (%)	f _B	f _{B'}	σ_K	σ_{dD}	σ_{kr}			
4.1.1.1 PH-LB/GF-UP Y _{K, Soll} = 250 kg/m ³ Y _K ≈ 230 kg/m ³ (vgl. Anl. Bl. 1, Bild 75)	20	1513	22,8 · 10 ⁹	31,6	68,4	5,3	4,7	0,78	32,2	366	0,088	0,0526	0,10
	40	1481	18,9 · 10 ⁹	28,6	71,4	7,2	5,5	0,68	30,3	276	0,111	0,0731	0,10
	60	1152	14,5 · 10 ⁹	46,2	53,8	7,7	5,6	0,88	21,1	288	0,073	0,0274	0,05
	80	368	11,5 · 10 ⁹	51,3	48,7	3,0	2,3	0,31	5,6	231	0,024		
4.1.1.2 PH-LB/GF-UP Y _{K, Soll} = 450 kg/m ³ Y _K ≈ 462 kg/m ³ (vgl. Anl. Bl. 2, Bild 75)	20	931	25,7 · 10 ⁹	37,7	62,3	3,0	2,6	0,56	17,8	435	0,041	0,0301	0,05
	40	1325	24,9 · 10 ⁹	46,2	53,8	6,6	3,7	0,99	20,5	459	0,045	0,0287	0,05
	60	1276	17,3 · 10 ⁹	53,8	46,2	7,3	5,2	1,10	19,6	349	(0,056)	0,0402	0,05
	80	970	16,5 · 10 ⁹	66,1	33,9	8,6	4,1	1,04	10,4	343	(0,30)	0,0260	0,03

Tabelle 31

Biegeversuche Ermittlung und Gegenüberstellung von Durchbiegungen und k-Faktoren

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
System	t (°C)	M _B (Nm)	Biegesteifigkeit			Durchbiegung (mm)		Bruchspannungen (N/mm ²)			k _{Versuch} = $\frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr}}$	k _{rechnerisch}	k
			ΣEI (Nmm ²)	ΔEI_K (%)	ΔEI_D (%)	f _B	f _{B'}	σ_K	σ_{dD}	σ_{kr}			
4.2.1.1 PIR-LB/St Y _{K, Soll} = 250 kg/m ³ Y _K ≈ 167 kg/m ³ (vgl. Anl. Bl. 3, Bild 76)	20	1740	27,5 · 10 ⁹			4,0	4,4		302	780	0,39	0,36	0,35
	40	1945	28,3 · 10 ⁹	< 1	≈ 100	1,5	2,1	≈ 0	333	702	0,47	0,37	0,35
	60	2061	28,0 · 10 ⁹			2,1	2,3		354	399	0,89	0,63	0,65
	80	1505	27,8 · 10 ⁹			1,6	1,7		260	353	0,74	0,64	0,65
4.2.1.2 PIR-LB/Al Y _{K, Soll} = 250 kg/m ³ Y _K ≈ 160 kg/m ³ (vgl. Anl. Bl. 4, Bild 76)	20	1646	13,1 · 10 ⁹			> 8,3	8,8		213	271	0,79	0,70	0,40
	40	1564	13,2 · 10 ⁹	< 1	≈ 100	> 3,2	3,7	≈ 0	202	488	0,41	0,40	0,40
	60	1545	13,1 · 10 ⁹			> 4,1	3,7		200	252	0,79	0,72	0,70
	80	1395	13,1 · 10 ⁹			> 3,3	3,3		181	213	0,85	0,66	0,70
4.2.1.3 PIR-LB/GF-UP Y _{K, Soll} = 250 kg/m ³ Y _K ≈ 203 kg/m ³ (vgl. Anl. Bl. 5, Bild 76)	20	1265	3,39 · 10 ⁹			27,0	26,2		66,8	233	0,29	0,31	0,30
	40	1120	2,79 · 10 ⁹	≈ 4	≈ 100	10,9	12,5	≈ 0	59,4	168	0,35	0,36	0,30
	60	1276	1,69 · 10 ⁹			18,8	23,6		68,4	188	0,36	0,18	0,20
	80	503	1,74 · 10 ⁹			7,4	9,0		29,9	122	0,25	0,25	0,20
4.2.1.4 PIR-LB/AZ (vgl. Anl. Bl. 6)	"Knittern" trat bei diesem System nicht auf												

Tabelle 32

Biegeversuche Ermittlung und Gegenüberstellung von Durchbiegungen und k-Faktoren

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
System	t (°C)	M _B (Nm)	Biegesteifigkeit			Durchbiegung (mm)		Bruchspannungen (N/mm ²)			k _{Versuch} = $\frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr}}$	k _{rechnerisch}	k
			ΣEI (Nmm ²)	ΔEI_K (%)	ΔEI_D (%)	f _B	f _{B'}	σ_K	σ_{dD}	σ_{kr}			
4.3.1.1 PS-HS/Al Y _{K, Soll} = 30 kg/m ³ Y _K ≈ 14 kg/m ³ (vgl. Anl. Bl. 7, Bild 77)	20	552	1,65 · 10 ¹⁰			0,7	1,1		57,1	81,8	0,70	0,69	0,70
	40	640	1,71 · 10 ¹⁰	< 1	≈ 100	0,8	1,2	≈ 0	65,6	81,9	0,80	0,70	0,70
	60	714	1,69 · 10 ¹⁰			1,0	1,3		73,8	75,6	0,98	0,62	0,70
	80	573	1,63 · 10 ¹⁰			0,7	1,1		59,6	56,6	1,05	0,73	0,70
4.3.1.2 PS-HS/GF-UP Y _{K, Soll} = 30 kg/m ³ Y _K ≈ 18 kg/m ³ (vgl. Anl. Bl. 8, Bild 77)	20	868	5,48 · 10 ⁹			3,9	4,9		46,4	34,1	1,36	0,80	0,80
	40	659	4,51 · 10 ⁹	< 1	≈ 100	3,6	4,6	≈ 0	34,6	41,3	0,84	0,51	0,70
	60	452	3,02 · 10 ⁹			3,7	4,7		26,0	49,9	0,52	0,48	0,40
	80	181	2,28 · 10 ⁹			1,3	2,5		10,3	38,9	0,26	0,49	0,20
4.4.1.1 PS-LB/Al Y _{K, Soll} = 600 kg/m ³ Y _K ≈ 353 kg/m ³ (vgl. Anl. Bl. 9, Bild 77)	20	2564	3,56 · 10 ¹⁰			3,4	2,3		206,5	932	0,22	0,19	0,20
	40	2676	3,59 · 10 ¹⁰	< 1	≈ 100	6,5	2,3	≈ 0	214,4	671	0,32	0,17	0,20
	60	2246	3,60 · 10 ¹⁰			4,0	2,0		179,5	751	0,24	0,20	0,20
	80	2312	3,62 · 10 ¹⁰			4,2	2,0		184,9	451	0,41	0,31	0,20

Tabelle 33

Biegeversuche Ermittlung und Gegenüberstellung von Durchbiegungen und k-Faktoren

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
System	t (°C)	M _B (Nm)	Biegesteifigkeit			Durchbiegung (mm)		Bruchspannungen (N/mm ²)			k _{Versuch} = $\frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr}}$	k _{rechnerisch}	k
			ΣEI (Nmm ²)	ΔEI_K (%)	ΔEI_D (%)	f _B	f _{B'}	σ_K	σ_{dD}	σ_{kr}			
4.5.1.1 PUR-HS/St Y _{K,Soll} = 40 kg/m ³ Y _K ≈ 41 kg/m ³ (vgl. Anl.Bl.10,Bild 78)	20	657	2,65·10 ¹⁰			2,6	1,7		120	150	0,80	0,88	0,70
	40	605	2,64·10 ¹⁰			2,0	1,6		110	122	0,90	0,90	0,70
	60	640	2,62·10 ¹⁰	< 1	≈100	0,7	0,8	≈ 0	116	145	0,80	0,87	0,70
	80	557	2,69·10 ¹⁰			0,6	0,6		101	140	0,72	0,88	0,70
4.5.1.2 PUR-HS/St Y _{K,Soll} = 70 kg/m ³ Y _K ≈ 72 kg/m ³ (vgl. Anl.Bl.11,Bild 78)	20	1352	2,72·10 ¹⁰			4,6	3,5		248	267	0,93	0,90	0,80
	40	1204	2,56·10 ¹⁰			3,7	3,3		222	274	0,81	0,89	0,80
	60	1261	2,58·10 ¹⁰	< 1	≈100	1,4	1,5	≈ 0	232	251	0,93	0,90	0,80
	80	1113	2,57·10 ¹⁰			1,3	1,3		205	233	0,88	0,88	0,80
4.5.1.3 PUR-HS/St Y _{K,Soll} = 100 kg/m ³ Y _K ≈ 96 kg/m ³ (vgl. Anl.Bl.12,Bild 77)	20	2043	2,63·10 ¹⁰			6,6	5,5		372	343	1,09	0,92	0,85
	40	1725	2,63·10 ¹⁰			4,4	4,6		314	336	0,94	0,93	0,85
	60	1616	2,61·10 ¹⁰	< 1	≈100	1,6	1,9	≈ 0	295	311	0,95	0,93	0,85
	80	1315	2,69·10 ¹⁰			1,3	1,5		237	300	0,79	0,93	0,85

Tabelle 34
Biegeversuche Ermittlung und Gegenüberstellung von Durchbiegungen und k-Faktoren

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
System	t (°C)	M _B (Nm)	Biegesteifigkeit			Durchbiegung (mm)		Bruchspannungen (N/mm ²)			k _{Versuch} = $\frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr}}$	k _{rechnerisch}	k
			ΣEI (Nmm ²)	ΔEI_K (%)	ΔEI_D (%)	f _B	f _{B'}	σ_K	σ_{dD}	σ_{kr}			
4.5.2.1 PUR-HS/Al Y _{K,Soll} = 40kg/m ³ Y _K ≈ 43 kg/m ³ (vgl. Anl.Bl.13,Bild79)	20	669	13,1·10 ⁹			≈4,2	3,6		87	105	0,83	0,85	0,80
	40	671	13,0·10 ⁹			3,9	3,6	≈ 0	89	102	0,87	0,86	0,80
	60	689	12,9·10 ⁹	< 1	≈100	1,5	1,7		90	109	0,83	0,84	0,80
	80	651	13,0·10 ⁹			1,4	1,6		85	105	0,81	0,84	0,80
4.5.2.2 PUR-HS/Al Y _{K,Soll} = 70kg/m ³ Y _K ≈ 76 kg/m ³ (vgl. Anl.Bl.14,Bild79)	20	1427	13,3·10 ⁹			9,1	7,5		184	184	1,00	0,88	0,80
	40	1150	13,1·10 ⁹			5,8	6,2		149	176	0,85	0,87	0,80
	60	1214	12,9·10 ⁹	< 1	≈100	2,9	2,9	≈ 0	159	187	0,85	0,85	0,80
	80	1146	12,9·10 ⁹			2,6	2,8		151	168	0,90	0,85	0,80
4.5.2.3 PUR-HS/Al Y _{K,Soll} = 100 kg/m ³ Y _K ≈ 106 kg/m ³ (vgl. Anl.Bl.15,Bild79)	20	1727	13,2·10 ⁹			13,0	9,2		224	236	0,95	0,90	0,80
	40	1536	13,2·10 ⁹			8,0	8,2		198	243	0,82	0,89	0,80
	60	1548	13,2·10 ⁹	< 1	≈100	4,4	3,7	≈ 0	201	241	0,83	0,86	0,80
	80	1406	13,1·10 ⁹			3,2	3,4		182	224	0,81	0,86	0,80

Tabelle 35
Biegeversuche Ermittlung und Gegenüberstellung von Durchbiegungen und k-Faktoren

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
System	t (°C)	M _B (Nm)	Biegesteifigkeit			Durchbiegung (mm)		Bruchspannungen (N/mm ²)			k _{Versuch} = $\frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr}}$	k _{rechnerisch}	k
			ΣEI (Nmm ²)	ΔEI_K (%)	ΔEI_D (%)	f _B	f _{B'}	σ_K	σ_{dD}	σ_{kr}			
4.5.3.1 PUR-HS/GF-UP Y _{K,Soll} = 40 kg/m ³ Y _K ≈ 44 kg/m ³ (vgl. Anl.Bl.16,Bild80)	20	807	3,22·10 ⁹			15,7	17,6		44,5	51,4	0,87	0,74	0,80
	40	617	2,64·10 ⁹			15,2	16,4	≈ 0	34,0	44,0	0,77	0,65	0,70
	60	386	1,72·10 ⁹	< 1	≈100	5,1	7,0		20,2	39,1	0,52	0,42	0,50
	80	308	1,78·10 ⁹			4,8	5,4		16,1	35,2	0,46	0,43	0,40
4.5.3.2 PUR-HS/GF-UP Y _{K,Soll} = 70 kg/m ³ Y _K ≈ 79 kg/m ³ (vgl. Anl.Bl.17,Bild80)	20	1301	3,34·10 ⁹			>26,7	27,4		69,4	94,4	0,74	0,64	0,70
	40	1276	2,70·10 ⁹			15,6	14,8		68,7	89,0	0,73	0,60	0,70
	60	559	1,71·10 ⁹	< 2	≈100	5,4	10,2	≈ 0	29,9	75,8	0,39	0,41	0,40
	80	237	1,72·10 ⁹			3,9	4,3		12,8	76,2	0,17	0,30	0,20
4.5.3.3 PUR-HS/GF-UP Y _{K,Soll} = 100kg/m ³ Y _K ≈ 110kg/m ³ (vgl. Anl.Bl.18,Bild80)	20	1436	3,38·10 ⁹			21,3			(76,0)	119	(0,63)	0,75	0,60
	40	1439	2,75·10 ⁹			17,3	16,3		76,8	113	0,68	0,75	0,60
	60	423	1,69·10 ⁹	< 2	≈100	5,9	7,8	≈ 0	22,7	63,8	0,37	0,38	0,30
	80	263	1,77·10 ⁹			4,1	4,6		14,0	70,7	0,20	0,32	0,20

Tabelle 36
Biegeversuche Ermittlung und Gegenüberstellung von Durchbiegungen und k-Faktoren

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14					
System	t (°C)	M _B (Nm)	Biegesteifigkeit			Durchbiegung (mm)		Bruchspannungen (N/mm ²)			k _{Versuch} = $\frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr}}$	k _{rechnerisch}	k					
			ΣEI (Nmm ²)	ΔEI_K (%)	ΔEI_D (%)	f _B	f _{B'}	σ_K	σ_{dD}	σ_{kr}								
4.5.4.1 PUR-HS/AZ Y _{K,Soll} = 40kg/m ³ Y _K ≈ 42kg/m ³ (vgl. Anl. Bl. 19)	20	873	17,0·10 ⁹	< 1	≈100	3,2	3,6		(17,7)	62,3	"Knittern" trat bei diesem System nicht auf	≈ 1						
	40	708															(14,4)	63,3
	60																	
	80																	
4.5.4.2 PUR-HS/AZ Y _{K,Soll} = 70kg/m ³ Y _K ≈ 76kg/m ³ (vgl. Anl. Bl. 20)	20	576	16,3·10 ⁹	< 1	≈100	1,8	2,5		(11,9)	121,9		≈ 1						
	40																	
	60																	
	80																	
4.5.4.3 PUR-HS/AZ Y _{K,Soll} = 100kg/m ³ Y _K ≈ 99kg/m ³ (vgl. Anl. Bl. 21)	20	762	16,3·10 ⁹	< 1	≈100	2,0	3,3		(15,7)			≈ 1						
	40																	
	60																	
	80																	

Tabelle 37
Biegeversuche
Ermittlung und Gegenüberstellung von Durchbiegungen und k-Faktoren

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
System	t (°C)	M _B (Nm)	Biegesteifigkeit			Durchbiegung (mm)		Bruchspannungen (N/mm ²)			k _{Versuch} = $\frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr}}$	k _{rechnerisch}	k
			ΣEI (Nmm ²)	ΔEI_K (%)	ΔEI_D (%)	f _B	f _{B'}	σ_K	σ_{dD}	σ_{kr}			
4.5.5.1 PUR-HS/SAN Y _{K,Soll} = 40kg/m ³ (vgl. Anl. Bl. 22)	"Knittern" trat bei diesem System nicht auf												

Tabelle 38
Biegeversuche
Ermittlung und Gegenüberstellung von Durchbiegungen und k-Faktoren

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
System	t (°C)	M _B (Nm)	Biegesteifigkeit			Durchbiegung (mm)		Bruchspannungen (N/mm ²)			k _{Versuch} = $\frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr}}$	k _{rechnerisch}	k
			ΣEI (Nmm ²)	ΔEI_K (%)	ΔEI_D (%)	f _B	f _{B'}	σ_K	σ_{dD}	σ_{kr}			
4.5.6.1 PUR-HS/GF-UP Y _{K,Soll} = 40kg/m ³ Y _K ≈ 40 kg/m ³ (vgl. Anl. Bl. 24, Bild 81)	20	1108	3,60·10 ⁹	< 2	≈100	18,7	21,6	≈ 0	56,9	99,4	0,57	0,49	0,50
	40	827	2,94·10 ⁹			7,3	8,8		42,7	89,8	0,48	0,48	0,50
	60	513	1,77·10 ⁹			6,4	9,1		26,9	66,2	0,41	0,49	0,40
	80	494	1,68·10 ⁹			7,8	9,2		27,0	63,0	0,43	0,57	0,30
4.5.6.2 PUR-HS/GF-UP Y _{K,Soll} = 70kg/m ³ Y _K ≈ 78 kg/m ³ (vgl. Anl. Bl. 25, Bild 81)	20	1115	3,20·10 ⁹	< 4	≈100	27,0	24,5	≈ 0	60,7	161	0,38	0,37	0,40
	40	>875	2,69·10 ⁹			>9,4	10,2		47,2	151	0,32	0,42	0,30
	60	>672	1,74·10 ⁹			>8,8	12,1		35,6	112	0,32	0,62	0,30
	80	905	1,83·10 ⁹			13,5	1,55		47,9	115	0,42	0,45	0,30

Tabelle 39
Biegeversuche
Ermittlung und Gegenüberstellung von Durchbiegungen und k-Faktoren

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
System	t (°C)	M _B (Nm)	Biegesteifigkeit			Durchbiegung (mm)		Bruchspannungen (N/mm ²)			k _{Versuch} = $\frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr}}$	k _{rechnerisch}	k
			ΣEI (Nmm ²)	ΔEI_K (%)	ΔEI_D (%)	f _B	f _{B'}	σ_K	σ_{dD}	σ_{kr}			
4.5.7.1 PUR-HS/GG 163 Y _{K,Soll} = 100kg/m ³ (vgl.Anl.Bl. 26)	"Knittern" trat bei diesem System nicht auf												
													4.5.7.2 PUR-HS/GG 400 Y _{K,Soll} = 100kg/m ³ (vgl.Anl.Bl. 27)

Tabelle 40
Biegeversuche
Ermittlung und Gegenüberstellung von Durchbiegungen und k-Faktoren

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
System	t (°C)	M _B (Nm)	Biegesteifigkeit			Durchbiegung (mm)		Bruchspannungen (N/mm ²)			k _{Versuch} = $\frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr}}$	k _{rechnerisch}	k
			ΣEI (Nmm ²)	ΔEI_K (%)	ΔEI_D (%)	f _B	f _{B'}	σ_K	σ_{dD}	σ_{kr}			
4.6.1.1 UP-LB/Al Y _{K,Soll} = 260 kg/m ³ Y _K ≈ 263 kg/m ³ (vgl. Anl.Bl.28,Bild 82)	20	>4061	15,8·10 ¹⁰	10,1	89,9	> 4,6	1,8	>0,59	> 132	1182	0,112	0,13	0,10
	40	>3953	15,1·10 ¹⁰	5,9	94,1	> 4,4	1,8	>0,31	> 135	760	0,178	0,22	0,20
	60	3346	14,8·10 ¹⁰	3,9	96,1	2,3	1,6	0,19	118	598	0,197	0,30	0,20
	80	3081	14,9·10 ¹⁰	3,2	96,8	2,5	1,5	0,13	108	503	0,215	0,35	0,20
4.6.1.2 UP-LB/GF-UP Y _{K,Soll} = 260 kg/m ³ Y _K ≈ 267 kg/m ³ (vgl. Anl.Bl.29,Bild 82)	20	3434	38,3·10 ⁹	52,5	47,5	7,0	6,3	2,6	30,6	552	0,055	0,04	0,05
	40	3443	27,2·10 ⁹	39,3	60,7	10,0	8,9	1,9	38,3	336	0,114	0,08	0,10
	60	1910	15,6·10 ⁹	47,4	52,6	7,9	8,6	1,2	19,9	211	0,094	0,10	0,10
	80	1178	11,3·10 ⁹	40,7	59,3	6,3	7,3	0,7	15,3	156	0,095	0,13	0,10
4.6.1.3 UP-LB/AZ (vgl. Anlage Bl.30 Bild 82)	"Knittern" trat bei diesem System nicht auf												

Tabelle 41
Biegeversuche
Ermittlung und Gegenüberstellung von Durchbiegungen und k-Faktoren

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
System	t (°C)	M _B (Nm)	Biegesteifigkeit			Durchbiegung (mm)		Bruchspannungen (N/mm ²)			k _{Versuch} = $\frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{kr}}$	k _{rechnerisch}	k
			ΣEI (Nmm ²)	ΔEI_K (%)	ΔEI_D (%)	f _B	f _{B'}	σ_K	σ_{dD}	σ_{kr}			
4.6.1.4 UP-LB/450 kg/m ² Y _{K,Soll} = 260kg/m ³ Y _K ≈ 267kg/m ³ (vgl.Anl.Bl. 31)	20	907	30,0·10 ⁹	53,0	47,0	6,5	2,1	"Knittern" trat bei diesem System nicht auf					
	40	1099	26,8·10 ⁹	47,8	52,2	~7,3	2,9						
	60	1014	22,4·10 ⁹	37,5	62,5	8,4	4,3						
	80	669	18,7·10 ⁹	25,1	74,9	7,2	2,5						

1) Als Deckschicht wird nur die Querschnittsfläche der Glasfaser in der Belastungsrichtung angesetzt:

$$Y_{\text{Glas}} \approx 2500 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 450/2 \cdot 0,0025 \cdot 1000 = 90 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$E \approx 73000 \text{ N/m}^2$$

Die Probenabmessungen werden einheitlich b/h = 195/150 mm angenommen.
Die Schwerpunktschwerachse der Glasfasern wird 1 mm jeweils vom oberen und unteren Probenrand angenommen, also c' = h - 2.

$$\Sigma EI \approx 2 \left(\frac{c'}{2}\right)^2 \cdot 73000 \cdot 90 \cdot 0,195 + \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \cdot E_{zK}$$

Tabelle 42
Biegeversuche
Ermittlung und Gegenüberstellung von Durchbiegungen und k-Faktoren

7. Faktor "k"

Aus Gleichung (38) geht folgendes hervor:

Unter der Voraussetzung, daß die Länge der Vorbeule mit der Länge der halben rechnerischen "Knitterwelle" zusammenfällt, ist k vom Verhältnis κ/ϵ_K abhängig.

κ ist wie bereits erläutert = W_0/α , also = "Amplitude der Vorbeule"/"Länge der halben Knitterwelle".

ϵ_K ist die Bruchdehnung des Stützkernes, also = σ_{zBK}/E_{zK} .

Bei großem κ/ϵ_K , also wenn W_0 groß oder σ_{zBK} klein ist, wird "k" klein.

Bei kleinem κ/ϵ_K , also wenn W_0 klein oder σ_{zBK} groß ist, wird "k" groß und nähert sich als Grenzwert $k = 1$.

Bei diesen Betrachtungen spielt also die Festigkeit des Stützkernes eine Rolle.

Unter Ziff. 6.2.4, Spalte 14, wird "k" für die Temperaturen 20 °C, 40 °C, 60 °C und 80 °C angegeben. Bei der Ermittlung von "k" wurden die bei den jeweiligen Temperaturen gemessenen Bruchmomente bzw. Werkstoffkennwerte angesetzt.

Somit:

$$\sigma_{kr_t} = k \cdot 0,625 (E_{D_t} \cdot E_{K_t}^2)^{1/3} \quad (39)$$

Der Index "t" gibt an, bei welcher Temperatur E_D bzw. E_K gemessen wurde.

Man kann auch "k" für die Temperaturen 40 °C, 60 °C und 80 °C auf die Werkstoffkennwerte bei 20 °C beziehen. Dieser Faktor wird mit "k'" bezeichnet und kann aus der Beziehung

$$k' \cdot 0,625 (E_{D_{20^\circ C}} \cdot E_{K_{20^\circ C}}^2)^{1/3} = k \cdot 0,625 (E_{D_t} \cdot E_{K_t}^2)^{1/3} \quad (40)$$

ermittelt werden:

$$k' = k \cdot \underbrace{\left(\frac{E_{D_t} \cdot E_{K_t}^2}{E_{D_{20^\circ C}} \cdot E_{K_{20^\circ C}}^2} \right)^{1/3}}_{m_t} \quad (41)$$

Der Ausdruck

$$\left(\frac{E_{D_t} \cdot E_{K_t}^2}{E_{D_{20^\circ C}} \cdot E_{K_{20^\circ C}}^2} \right)^{1/3} \quad (42)$$

wird als m_t bezeichnet

$$k' = k \cdot m_t \quad (43)$$

In den Tabellen 43-51 sind m_t , k und k' zusammengestellt. Diese Werte werden anschließend noch erläutert:

Spalte 1

$$m_t = \left(\frac{E_{D_t} \cdot E_{K_t}^2}{E_{D_{20^\circ C}} \cdot E_{K_{20^\circ C}}^2} \right)^{1/3}$$

ausgerechnet auf der Grundlage der in den Anlagen Bl. 1-31 angegebenen Werte.
 $t = 20^\circ C, 40^\circ C, 60^\circ C$ und $80^\circ C$.

m_t berücksichtigt die Änderung der Knitterspannung infolge Zunahme der Temperatur.

Spalte 2

k nach Tabellen 31-42, Spalte 14.

Bei Anwendung dieser k -Werte müssen E_D und E_K für die jeweiligen Temperaturstufen in die Knitterformel eingesetzt werden.

$$\sigma_{kr_t} = k \cdot 0,625 \cdot (E_{D_t} \cdot E_{K_t}^2)^{1/3}$$

$t = 20^\circ C, 40^\circ C, 60^\circ C$ und $80^\circ C$

Spalte 3

$$k' = k \cdot m_t.$$

m_t beinhaltet bereits die Änderung der Knitterspannung infolge Temperatursteigerung,

$$\sigma_{kr_t} = k' \cdot 0,625 \cdot \left(\frac{E_{D_{20^\circ C}} \cdot E_{K_{20^\circ C}}^2}{E_{D_t} \cdot E_{K_t}^2} \right)^{1/3}$$

k' ist ein auf $t = 20^\circ C$ bezogener Abminderungsfaktor.

Gültigkeitsbereich:

Hoff und Mautner [20] wiesen experimentell nach, daß Knittern eintrat, wenn der Stützkern mehr als zwanzigmal so dick ist wie die Deckschicht. Ein größeres Verhältnis zwischen t und c sollte auch deshalb nicht gewählt werden, weil dann die Annahme einer mittigen Deckschichtbeanspruchung entsprechend der üblichen Sandwichtheorie nicht mehr gerechtfertigt ist.

Somit:

$$1. \quad \frac{t}{c} < \frac{1}{20}$$

Die Ermittlung der Knitterspannung basiert auf der Annahme eines unendlich dicken Stützkernes. Andererseits ist die Randstörung des Stützkernes durch den Knittervorgang durch eine wechselnde Folge von Zug- und Druckbeanspruchung, die sich durch Normal- und Schubkräfte gegenseitig abbauen, gekennzeichnet. Nach Berechnungen mehrerer Autoren, z. B. Yussuff, [21], [22], dringt die Störung nur ungefähr $a/2$ vom Rande aus in den Stützkern hinein. Daraus ergibt sich, daß die Kerndicke mindestens gleich a sein muß, also:

$$2. \quad c = a = 2 \cdot t \left(\frac{E_{dB}}{E_{zK}} \right)^{1/3}$$

Bei den durchgeführten Versuchen wurden diese Bedingungen in der Regel eingehalten.

System	4.1.1.1 (vgl. Anl. Bl. 1) PH-LB/GF-UP $\gamma_{K, \text{Soll}} = 250 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 230 \text{ kg/m}^3$			4.1.1.2 (vgl. Anl. Bl. 2) PH-LB/GF-UP $\gamma_{K, \text{Soll}} = 450 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 462 \text{ kg/m}^3$		
	t (°C)	m_t nach Anlage Blatt 1	k Tabelle Spalte 14	k' $=m_t \cdot k$	m_t nach Anlage Blatt 2	k Tabelle Spalte 14
	1	2	3	1	2	3
20	1,000	0,10	0,10	1,000	0,05	0,05
40	0,754	0,10	0,07	1,000	0,05	0,04
60	0,789	0,05	0,04	0,800	0,05	0,03
80	0,630	0,02	0,01	0,790	0,03	0,02

Tabelle 43
PH-LB Füllbauweise
Übersicht der Korrekturbeiwerte
für die „Knitterformel“

System	4.2.1.1 (vgl. Anl. Bl. 3) PIR-LB/St $\gamma_{K,Soll} = 250 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 167 \text{ kg/m}^3$			4.2.1.2 (vgl. Anl. Bl. 4) PIR-LB/Al $\gamma_{K,Soll} = 250 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 160 \text{ kg/m}^3$			4.2.1.3 (vgl. Anl. Bl. 5) PIR-LB/GF-UP $\gamma_{K,Soll} = 250 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 203 \text{ kg/m}^3$		
	t (°C)	m_t nach Anlage Blatt 3	k Tabelle Spalte 14	k' $\approx m_t \cdot k$	m_t nach Anlage Blatt 4	k Tabelle Spalte 14	k' $\approx m_t \cdot k$	m_t nach Anlage Blatt 5	k Tabelle Spalte 14
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
20	1,000	0,35	0,35	1,000	0,40	0,40	1,000	0,30	0,30
40	0,906	0,35	0,30	1,802	0,40	0,35	0,724	0,30	0,25
60	0,511	0,65	0,30	0,930	0,70	0,30	1,010	0,20	0,20
80	0,452	0,65	0,30	0,792	0,70	0,25	0,528	0,20	0,10

Tabelle 44

PIR-LB Füllbauweise

Übersicht der Korrekturbeiwerte für die „Knitterformel“

System	4.3.1.1 (vgl. Anl. Bl. 7) PS-HS/Al $\gamma_{K,Soll} = 30 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 14 \text{ kg/m}^3$			4.3.1.2 (vgl. Anl. Bl. 8) PS-HS/GF-UP $\gamma_{K,Soll} = 30 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 18 \text{ kg/m}^3$		
	t (°C)	m_t nach Anlage Blatt 7	k Tabelle Spalte 14	k' $\approx m_t \cdot k$	m_t nach Anlage Blatt 8	k Tabelle Spalte 14
	1	2	3	1	2	3
20	1,000	0,70	0,70	1,000	0,80	0,70
40	1,000	0,70	0,70	1,212	0,70	0,70
60	0,924	0,70	0,60	1,463	0,40	0,60
80	0,693	0,70	0,50	1,158	0,20	0,20

Tabelle 45

PS-HS Hüllbauweise

Übersicht der Korrekturbeiwerte für die „Knitterformel“

System	4.4.1.1 (vgl. Anl. Bl. 9) PS-LB/Al $\gamma_{K,Soll} = 600 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 353 \text{ kg/m}^3$		
	t (°C)	m_t nach Anlage Blatt 9	k Tabelle Spalte 14
	1	2	3
20	1,000	0,20	0,20
40	0,720	0,20	0,15
60	0,807	0,20	0,10
80	0,483	0,20	0,10

Tabelle 46

PS-LB Füllbauweise

Übersicht der Korrekturbeiwerte für die „Knitterformel“

System	4.5.1.1 (vgl. Anl. Bl. 10) PUR-HS/St $\gamma_{K,Soll} = 40 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 41 \text{ kg/m}^3$			4.5.1.2 (vgl. Anl. Bl. 11) PUR-HS/St $\gamma_{K,Soll} = 70 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 72 \text{ kg/m}^3$			4.5.1.3 (vgl. Anl. Bl. 12) PUR-HS/St $\gamma_{K,Soll} = 100 \text{ kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 96 \text{ kg/m}^3$		
	t (°C)	m_t nach Anlage Blatt 10	k Tabelle Spalte 14	k' $\approx m_t \cdot k$	m_t nach Anlage Blatt 11	k Tabelle Spalte 14	k' $\approx m_t \cdot k$	m_t nach Anlage Blatt 12	k Tabelle Spalte 14
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
20	1,000	0,70	0,70	1,000	0,80	0,80	1,000	0,85	0,85
40	0,814	0,70	0,65	1,026	0,80	0,75	0,982	0,85	0,80
60	0,965	0,70	0,60	0,940	0,80	0,70	0,906	0,85	0,75
80	0,935	0,70	0,55	0,878	0,80	0,65	0,870	0,85	0,70

Tabelle 47

PUR-HS Füllbauweise

Übersicht der Korrekturbeiwerte für die „Knitterformel“

System	4.5.2.1 (vgl. Anl. Bl. 13) PUR-HS/A1 $Y_{K,So11} = 40 \text{ kg/m}^3$ $\bar{Y}_K \approx 43 \text{ kg/m}^3$			4.5.2.2 (vgl. Anl. Bl. 14) PUR-HS/A1 $Y_{K,So11} = 70 \text{ kg/m}^3$ $\bar{Y}_K \approx 76 \text{ kg/m}^3$			4.5.2.3 (vgl. Anl. Bl. 15) PUR-HS/A1 $Y_{K,So11} = 100 \text{ kg/m}^3$ $\bar{Y}_K \approx 106 \text{ kg/m}^3$		
	t (°C)	m_t nach Anlage Blatt 13	k Tabelle Spalte 14	k' $\approx m_t \cdot k$	m_t nach Anlage Blatt 14	k Tabelle Spalte 14	k' $\approx m_t \cdot k$	m_t nach Anlage Blatt 15	k Tabelle Spalte 14
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
20	1,000	0,80	0,80	1,000	0,80	0,80	1,000	0,80	0,80
40	0,965	0,80	0,75	0,957	0,80	0,75	1,026	0,80	0,75
60	1,037	0,80	0,70	1,015	0,80	0,70	1,020	0,80	0,70
80	0,999	0,80	0,65	0,913	0,80	0,65	0,949	0,80	0,65

Tabelle 48
PUR-HS Füllbauweise
Übersicht der Korrekturbeiwerte für die „Knitterformel“

System	4.5.3.1 (vgl. Anl. Bl. 16) PUR-HS/GF-UP $Y_{K,So11} = 40 \text{ kg/m}^3$ $\bar{Y}_K \approx 44 \text{ kg/m}^3$			4.5.3.2 (vgl. Anl. Bl. 17) PUR-HS/GF-UP $Y_{K,So11} = 70 \text{ kg/m}^3$ $\bar{Y}_K \approx 79 \text{ kg/m}^3$			4.5.3.3 (vgl. Anl. Bl. 18) PUR-HS/GF-UP $Y_{K,So11} = 100 \text{ kg/m}^3$ $\bar{Y}_K \approx 110 \text{ kg/m}^3$		
	t (°C)	m_t nach Anlage Blatt 16	k Tabelle Spalte 14	k' $\approx m_t \cdot k$	m_t nach Anlage Blatt 17	k Tabelle Spalte 14	k' $\approx m_t \cdot k$	m_t nach Anlage Blatt 18	k Tabelle Spalte 14
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
20	1,000	0,80	0,80	1,000	0,70	0,70	1,000	0,60	0,60
40	0,856	0,70	0,60	0,943	0,70	0,65	0,950	0,60	0,55
60	0,760	0,50	0,40	0,807	0,40	0,30	0,535	0,30	0,15
80	0,682	0,40	0,20	0,783	0,20	0,15	0,593	0,20	0,10

Tabelle 49
PUR-HS Füllbauweise
Übersicht der Korrekturbeiwerte für die „Knitterformel“

System	4.5.6.1 (vgl. Anl. Bl. 24) PUR-HS/GF-UP $Y_{K,So11} = 40 \text{ kg/m}^3$ $\bar{Y}_K \approx 40 \text{ kg/m}^3$			4.5.6.2 (vgl. Anl. Bl. 25) PUR-HS/GF-UP $Y_{K,So11} = 70 \text{ kg/m}^3$ $\bar{Y}_K \approx 78 \text{ kg/m}^3$			System	4.6.1.1 (vgl. Anl. Bl. 28) UP-LB/A1 $Y_{K,So11} = 260 \text{ kg/m}^3$ $\bar{Y}_K \approx 263 \text{ kg/m}^3$			4.6.1.2 (vgl. Anl. Bl. 29) UP-LB/GF-UP $Y_{K,So11} = 260 \text{ kg/m}^3$ $\bar{Y}_K \approx 267 \text{ kg/m}^3$		
	t (°C)	m_t nach Anlage Blatt 24	k Tabelle Spalte 14	k' $\approx m_t \cdot k$	m_t nach Anlage Blatt 25	k Tabelle Spalte 14		k' $\approx m_t \cdot k$	t (°C)	m_t nach Anlage Blatt 28	k Tabelle Spalte 14	k' $\approx m_t \cdot k$	m_t nach Anlage Blatt 29
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	1	2	3
20	1,000	0,50	0,50	1,000	0,40	0,50	20	1,000	0,10	0,10	1,000	0,05	0,05
40	0,903	0,50	0,45	0,936	0,30	0,30	40	0,644	0,20	0,10	0,608	0,10	0,05
60	0,666	0,40	0,30	0,696	0,30	0,25	60	0,507	0,20	0,10	0,383	0,10	0,035
80	0,634	0,30	0,20	0,712	0,30	0,20	80	0,426	0,20	0,09	0,283	0,10	0,025

Tabelle 50
PUR-HS Hüllbauweise
Übersicht der Korrekturbeiwerte für die „Knitterformel“

Tabelle 51
UP-LB Füllbauweise
Übersicht der Korrekturbeiwerte für die „Knitterformel“

8. Qualitative Betrachtungen

Für die dauerhafte "Brauchbarkeit" (vgl. Paragraph 23, BauO NRW) erscheinen, abgesehen von den mechanischen Kennwerten, die unmittelbar in die statische Berechnung eingehen, folgende zwei Kriterien besonders wichtig:

a) die Haftung zwischen Deckschicht und Kern

Es erscheint selbstverständlich, daß die Verbindungsfuge zwischen Deckschicht und Stützkern mindestens die gleiche Festigkeit wie der Stützkern selbst aufweisen sollte.

Als Kriterium für die Güte der Verbindungsfuge werden die Bruchcharakteristiken für die Stirnabzugversuche in den Anlagen Bl. 1-31 verwendet. Darin bedeuten

D = Bruch in der Verbindungsfuge,

K = Bruch im Stützkern.

In den nachstehenden Tabellen, Spalte 5, Stirnabzugversuch, bedeuten:

- +++ gute Haftung
(100% der Brüche im Stützkern)
- ++ befriedigende Haftung
(> 50 % der Brüche im Stützkern)
- + mäßige Haftung
(< 50 % der Brüche im Stützkern)
- 0 ungenügende Haftung
(100 % der Brüche in der Verbindungsfuge)

b) die "Vorbeulempfindlichkeit"

Die Vorbeulempfindlichkeit, also die Neigung einer Sandwichkonstruktion zum Stützkernbruch senkrecht zu den Deckschichten, ist einmal von der Größe der Vorbeule selbst (vgl. Ziff. 5.7), zum anderen aber von der Bruchdehnung des betreffenden Stützkernmaterials abhängig.

Grundsätzlich kann gesagt werden, daß spröde Stützkernwerkstoffe (also ϵ_K gering) nur in Verbindung mit sehr ebenen Deckschichten verwendet werden sollten.

Aus Ziff. 5.7 ist zu erkennen, daß metallische Deckschichten diesbezüglich günstiger sind als GF-UP-Deckschichten.

Bezogen auf die kritische Länge einer Knitterwelle wurden bei GF-UP "Vorbeulen" gemessen, die 5 bis 10 mal größer als bei metallischen Deckschichten waren.

Um eine Tendenz anzudeuten, wird hier als einziges Kriterium (es gibt natürlich mehrere) für die Vorbeulempfindlichkeit der Sandwichkonstruktionen die Bruchdehnung (ϵ_{zBK}) des Stützkernes festgelegt.

In den nachfolgenden Tabellen, Spalte 6, Biegeversuche, bedeuten:

- +++ geringe Vorbeulempfindlichkeit
($1,5 \% < \epsilon_{zBK}$)
- ++ mittlere Vorbeulempfindlichkeit
($0,5 \% < \epsilon_{zBK} < 1,5 \%$)
- + große Vorbeulempfindlichkeit
($0,25 \% < \epsilon_{zBK} < 0,5 \%$)
- 0 sehr große Vorbeulempfindlichkeit
($\epsilon_{zBK} < 0,25 \%$)

1	2	3	4	5	6
System	Herstellung	Verankerung	t (°C)	Stirnabzugversuch	Biegeversuch
4.1.1.1 PH-LB/GF-UP $\gamma_{K,Soll} =$ 250kg/m ³ $\gamma_K \approx$ 230kg/m ³ (vgl.Anl.Bl.1)	Füllbauweise	Aufräumen der nicht ausgehärteten Deckschichtinnenseite	20 40 60 80	++ ++ + ++	0 0 0 0
4.1.1.2 PH-LB/GF-UP $\gamma_{K,Soll} =$ 450kg/m ³ $\gamma_K \approx$ 462kg/m ³ (vgl.Anl.Bl.2)	"	"	20 40 60 80	++ + +++ +++	0 0 0 0
4.2.1.1 PIR-LB/St $\gamma_{K,Soll} =$ 250kg/m ³ $\gamma_K \approx$ 167kg/m ³ (vgl.Anl.Bl.3)	"	Haftvermittler EC 1357 (3M-Company)	20 40 60 80	+++ +++ +++ +++	+ + ++ ++
4.2.1.2 PIR-LB/Al $\gamma_{K,Soll} =$ 250kg/m ³ $\gamma_K \approx$ 160kg/m ³ (vgl.Anl.Bl.4)	"	"	20 40 60 80	+++ +++ +++ +++	++ + ++ ++
4.2.1.3 PIR-LB/GF-UP $\gamma_{K,Soll} =$ 250kg/m ³ $\gamma_K \approx$ 203kg/m ³ (vgl.Anl.Bl.5)	"	schaumseitig aufgeraut	20 40 60 80	+++ +++ + 0	≈ ++ ++ + +
4.2.1.4 PIR-LB/AZ $\gamma_{K,Soll} =$ 250kg/m ³ $\gamma_K \approx$ 155kg/m ³ (vgl.Anl.Bl.6)	"	schaumseitig entstaubt	20 40 60 80	++	

Tabelle 52
Qualitative Übersicht der Sandwichsysteme

1	2	3	4	5	6
System	Herstellung	Verankerung	t (°C)	Stirnabzugversuch	Biegeversuch
4.3.1.1 PS-HS/Al $\gamma_{K,Soll} =$ 30 kg/m ³ $\gamma_K \approx$ 14 kg/m ³ (vgl.Anl.Bl. 7)	Hüllbauweise	PUR-Kleber handelsüblich	20 40 60 80	+ + 0 0	+++ +++ +++ +++
4.3.1.2 PS-HS/GF-UP $\gamma_{K,Soll} =$ 30 kg/m ³ $\gamma_K \approx$ 18 kg/m ³ (vgl.Anl.Bl. 8)	"	"	20 40 60 80	0 0 0 0	+++ ++ ++ ++
4.4.1.1 PS-LB/Al $\gamma_{K,Soll} =$ 600kg/m ³ $\gamma_K \approx$ 353kg/m ³ (vgl.Anl.Bl. 9)	Hüllbauweise	PUR-Kleber	20 40 60 80	+ 0 0 0	0 0 0 0
4.5.1.1 PUR-HS/St $\gamma_{K,Soll} =$ 40kg/m ³ $\gamma_K \approx$ 41kg/m ³ (vgl.Anl.Bl.10)	Füllbauweise	Haftvermittler EC 1357 (3M-Company)	20 40 60 80	+ 0 0 +	+++ +++ +++ +++
4.5.1.2 PUR-HS/St $\gamma_{K,Soll} =$ 70kg/m ³ $\gamma_K \approx$ 72kg/m ³ (vgl.Anl.Bl.11)	"	"	20 40 60 80	+ ++ ++ ++	+++ +++ +++ +++
4.5.1.3 PUR-HS/St $\gamma_{K,Soll} =$ 100kg/m ³ $\gamma_K \approx$ 96kg/m ³ (vgl.Anl.Bl.12)	"	"	20 40 60 80	+ ++ +++ +++	+++ +++ +++ +++

Tabelle 53
Qualitative Übersicht der Sandwichsysteme

1	2	3	4	5	6
System	Herstellung	Verankerung	t (°C)	Stirnabzugversuch	Biegeversuch
4.5.2.1 PUR-HS/Al $\gamma_{K,Soll} = 40\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 43\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.13)	"	"	20 40 60 80	+ + + +++	+++ +++ +++ +++
4.5.2.2 PUR-HS/Al $\gamma_{K,Soll} = 70\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 76\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.14)	"	"	20 40 60 80	+++ 0 ++ ++	+++ +++ +++ +++
4.5.2.3 PUR-HS/Al $\gamma_{K,Soll} = 100\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 106\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.15)	Füllbauweise	Haftvermittler EC 1357 (3M-Company)	20 40 60 80	+ + 0 0	+++ +++ +++ +++
4.5.3.1 PUR-HS/GF-UP $\gamma_{K,Soll} = 40\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 44\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.16)	"	schaumseitig aufgerauht	20 40 60 80	++ + 0 0	+++ +++ ++ ++
4.5.3.2 PUR-HS/GF-UP $\gamma_{K,Soll} = 70\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 79\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.17)	"	"	20 40 60 80	+ + 0 0	+++ +++ ++ ++
4.5.3.3 PUR-HS/GF-UP $\gamma_{K,Soll} = 100\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 110\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.18)	"	"	20 40 60 80	++ + 0 0	+++ +++ + +

Tabelle 54
Qualitative Übersicht der Sandwichsysteme

1	2	3	4	5	6
System	Herstellung	Verankerung	t (°C)	Stirnabzugversuch	Biegeversuch
4.5.4.1 PUR-HS/AZ $\gamma_{K,Soll} = 40\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 42\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.19)	"	schaumseitig entstaubt	20 40 60 80	0 0	+++ +++ +++ +++
4.5.4.2 PUR-HS/AZ $\gamma_{K,Soll} = 70\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 76\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.20)	"	"	20 40 60 80	0 0	+++ +++ +++ +++
4.5.4.3 PUR-HS/AZ $\gamma_{K,Soll} = 100\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 99\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.21)	Füllbauweise	schaumseitig entstaubt	20 40 60 80	0	+
4.5.5.1 PUR-HS/SAN	vgl. Anlage Bl. 22 und 23				
4.5.5.2 PUR-HS/SAN					
4.5.6.1 PUR-HS/GF-UP $\gamma_{K,Soll} = 40\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 40\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.24)	Hüllbauweise	Anpressen der noch nicht ausgehärteten Deckschichten	20 40 60 80	+++ +++ +++ +++	++ ++ +++ +++
4.5.6.2 PUR-HS/GF-UP $\gamma_{K,Soll} = 70\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 78\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.25)	"	"	20 40 60 80	++ +++ +++ +++	++ ++ +++ +++

Tabelle 55
Qualitative Übersicht der Sandwichsysteme

1	2	3	4	5	6
System	Herstellung	Verankerung	t (°C)	Stirnabzugversuch	Biegeversuch
4.5.7.1 PUR-HS/GG 163 $\gamma_{K,Soll} = 100\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 107\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.26)	Depot	-	20 40 60 80	++	
4.5.7.2 PUR-HS/GG 400 $\gamma_{K,Soll} = 100\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 106\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.27)	Depot	-	20 40 60 80	++	
4.6.1.1 UP-LB/Al $\gamma_{K,Soll} = 260\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 263\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.28)	Füllbauweise	Randzonenarmierung 225 g/m ²	20 40 60 80	+++ ++ +++ ++	0 0 0 0
4.6.1.2 UP-LB/GF-UP $\gamma_{K,Soll} = 260\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 267\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.29)	"	"	20 40 60 80	+++ +++ +++ +++	0 0 0 0
4.6.1.3 UP-LB/AZ $\gamma_{K,Soll} = 260\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 256\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.30)	"	"	20 40 60 80	+++	0 0 0 0
4.6.1.4 UP-LB/Matte $\gamma_{K,Soll} = 260\text{kg/m}^3$ $\bar{\gamma}_K \approx 268\text{kg/m}^3$ (vgl.Anl.Bl.31)	Depot	-	20 40 60 80	+ + ++ +++	0 0 0 0

Tabelle 56
Qualitative Übersicht der Sandwichsysteme

Literatur

- (1) Kunststoffhandbuch, Band VII, Polyurethane
Carl Hanser Verlag, München 1966, S. 504-557,
S. 590-655
- (2) Hoppe, P.:
Harter Polyurethanhartschaumstoff für Fahrzeug-
konstruktionen
Kunststoffe, Heft 10/67, S. 742-749
- (3) Langlie, C.:
Tragfähigkeitsprobleme ausgeschäumter GFK-Hohl-
profile bei Kurzzeitbelastung
Diss. TU Berlin 1971, D 83
- (4) G.S. Gough, C.F. Elam and N.D. De Bruyne:
The Stabilisation of a Thin Sheet by a Continuous
Supporting Medium
J. Royal Aero. Soc., January 1940, pp. 12-43
- (5) Williams, D.:
Sandwich Construction - A Practical Approach for
the Use of Designers
RAE Report No. Structures 2 and R. and M. 2466
- (6) Plantema, F.J.:
Sandwich Construction - The Bending and Buckling
of Sandwich Beams, Plates and Shells
John Wiley and Sons, Inc., New York, London,
Sidney 1966
- (7) Reissner, E.:
Finite Deflections of Sandwich Plates
I. Aero. Sci., July 1948, pp. 443-440
- (8) Gerard, G.:
Linear Bending Theory of Isotropic Sandwich
Plates by an Order-of-Magnitude Analysis
I. Appl. Mech., March 1952, pp. 13-15
- (9) van der Neul:
Die Stabilität geschichteter Streifen
Nationaal Luchtvaart-Laboratorium, Amsterdam
NLL Report S. 284, 1943
- (10) van Wijngaarden, A.:
The Elastic Stability of Flat Sandwich Plates
NLL Report, 13, pp. 37-56, 1947
- (11) Wan, C.C.:
Face Buckling and Core Strength Requirements
in Sandwich Construction
I. Aero. Sci., Sept. 1947, pp. 531-539
- (12) Howard, H.B.:
A Note on Initial Irregularities in Sandwich
Construction
Aero Res. Council, Report 10371, Febr. 1947
and Amendment, April 1947

- (13) Yussuf, S.:
Face Wrinkling and Core Strength in Sandwich
Construction
I. Roy. Aero. Soc., March 1960, pp. 164-167
- (14) Reutter, F.:
Über die Stabilität dreischichtiger Stäbe und
Platten, deren mittlere, aus einem Leichtstoff
bestehende Schicht, einen in Dickenrichtung
veränderlichen Elastizitätsmodul hat
ZAMM, Jan. und Mai 1948, ff. 1-12 und 132-148
- (15) Barwell, F.T and Ridell, I.R.:
The Wrinkling of Sandwich Struts
R. and M. Report 2143, 1946
- (16) Goodier, I.N.:
Some Observations on Elastic Stability
Proc. 1st U.S. National Congress
Appl. Mech. pp 193-202, 1951
- (17) Goodier, I.N. and Hsu, C.S.:
Nonsinusoidal Buckling Modes of Sandwich Plates
I. Aero, Sci., Aug. 1954, pp. 525-532
- (18) Goodier, I.N.:
Cylindrical Buckling of Sandwich Plates
I. Appl. Mech., Dec. 1946, pp. A 253-260
- (19) Goodier, I.N. and Neou, I.N.:
The Evaluation of Theoretical Critical
Compression in Sandwich Plates
I. Aero, Sci., Oct. 1951, pp. 649-656
- (20) Hoff, N.J. and Mautner, S.E.:
The Buckling of Sandwich-Type Panels
Journal of the Institute of Aeronautical
Sciences, Vol. 12, 1945
- (21) Yusuff, S.:
Theory of Wrinkling in Sandwich Construction
Journal of the Royal Aeronautical Society,
January 1955
- (22) Yusuff, S.:
Face Wrinkling and Core Strength in Sandwich
Construction
Journal of the Royal Aeronautical Society,
March 1960

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse										Blatt: 1									
Kernmaterial: PH - LEICHTBETON (Blähglas 10/30) $\gamma_{k, \text{Soll}} = 250 \text{ kg/m}^3$										Deckenschichtmaterial: GF - UP									
Temp.	ε _{zB}	σ _{zB}	Zug- u. Bruchversuche I Deckenschicht			Versuche am Decksch.-Mat.			Biegeversuche			Erläuterungen							
			σ _{zB}	Bruch	σ _{GB}	Bruch	F _{zK}	E _{zK}	t	E _{HD}	E _{HD}		h	b	M _B	Bruch	f _B		
kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	mm	N	mm				
20°C	1	213	0,238	K I	196,6	—	—	0,80	53,2	7759	140,2	194,5	1727	0	3	6,6			
	2	213	0,244	K I	150,3	—	—	0,83	136,4	8847	139,7	195,2	1535	0	3	5,2			
	3	241	0,229	K I	169,8	—	—	0,93	63,1	5544	139,5	194,8	1276	0	3	4,0			
	4	241	0,198	D I	188,3	—	—	0,85	47,1	7416	—	—	—	—	—	—			
	5	241	0,237	D I	152,2	—	—	1,20	114,0	6796	—	—	—	—	—	—			
	6	241	0,237	D I	152,2	—	—	1,50	109,0	6645	—	—	—	—	—	—			
	7	241	0,237	D I	152,2	—	—	1,87	85,8	6254	—	—	—	—	—	—			
	8	241	0,237	D I	152,2	—	—	1,70	82,7	6711	—	—	—	—	—	—			
	9	241	0,237	D I	152,2	—	—	1,03	707,3	—	—	—	—	—	—	—			
	10	241	0,237	D I	152,2	—	—	1,19	86,0	7005	139,8	194,8	1513	0	3	5,3			
40°C	1	224	0,252	K	166,2	—	—	1,13	83,0	7114	141,0	194,6	1473	0	3	6,6			
	2	224	0,184	D	126,5	—	—	0,90	79,1	6173	141,1	194,7	1502	0	3	7,8			
	3	251	0,170	D	114,4	—	—	0,97	72,7	5732	140,8	195,1	1468	0	3	7,1			
	4	251	0,263	K	155,7	—	—	0,90	107,2	7152	—	—	—	—	—	—			
	5	251	0,263	K	155,7	—	—	1,57	86,6	5181	—	—	—	—	—	—			
	6	251	0,263	K	155,7	—	—	1,63	78,1	4514	—	—	—	—	—	—			
	7	251	0,255	K	127,6	—	—	1,50	75,7	4453	—	—	—	—	—	—			
	8	251	0,255	K	127,6	—	—	1,63	75,5	4011	—	—	—	—	—	—			
	9	251	0,255	K	127,6	—	—	1,28	82,2	5541	141,0	194,8	1481	0	3	7,2			
	10	251	0,255	K	127,6	—	—	0,83	37,3	3627	139,2	195,1	1129	0	3	8,1			
60°C	1	227	0,092	D	148,9	—	—	1,00	28,6	3475	139,1	194,6	1176	0	3	7,3			
	2	248	0,060	D I	85,1	—	—	1,07	51,0	3561	138,8	195,3	—	—	—	—			
	3	248	0,162	D	147,4	—	—	0,63	23,2	5790	—	—	—	—	—	—			
	4	248	0,220	K	194,3	—	—	1,60	46,0	3313	—	—	—	—	—	—			
	5	248	0,220	K	194,3	—	—	1,50	45,2	3323	—	—	—	—	—	—			
	6	248	0,220	K	194,3	—	—	0,80	40,3	3704	—	—	—	—	—	—			
	7	248	0,220	K	194,3	—	—	1,37	26,9	3987	—	—	—	—	—	—			
	8	248	0,153	K/D	162,2	—	—	1,10	37,3	3847	139	195	1152	0	3	7,7			
	9	248	0,245	K	190,4	—	—	0,90	27,1	2132	138,9	194,9	471	0	3	4,1			
	10	248	0,245	K	190,4	—	—	1,33	20,4	3082	139,1	194,2	379	0	3	3,0			
80°C	1	216	0,013	D	57,4	—	—	0,93	12,3	2806	139,4	194,7	254	0	3	1,9			
	2	216	0,042	D	57,4	—	—	0,83	13,7	2937	—	—	—	—	—	—			
	3	242	0,206	K	158,4	—	—	1,30	16,7	2227	—	—	—	—	—	—			
	4	242	0,193	K	161,1	—	—	1,20	14,6	2278	—	—	—	—	—	—			
	5	242	0,193	K	161,1	—	—	1,30	15,4	2162	—	—	—	—	—	—			
	6	242	0,193	K	161,1	—	—	1,50	18,7	2418	—	—	—	—	—	—			
	7	242	0,140	K/D	141,7	—	—	1,16	16,0	2559	139,1	194,6	368	0	3	3,0			
	8	242	0,140	K/D	141,7	—	—	1,16	16,0	2559	139,1	194,6	368	0	3	3,0			
	9	242	0,140	K/D	141,7	—	—	1,16	16,0	2559	139,1	194,6	368	0	3	3,0			
	10	242	0,140	K/D	141,7	—	—	1,16	16,0	2559	139,1	194,6	368	0	3	3,0			

Erläuterungen
 Bruch:
 K = Bruch i. Kern
 D = Bruch am Übergang Kern/Deckenschicht
 o = Br. i. ogedrückter Deckschicht
 u = Br. i. ungedr. Deckschicht
 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20%
 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20%
 3 = Ausbeulen (Ab-lasen) der Deck-schicht
 4 = Einbeulen (Ein-brechen i. d. Kern) der Deckschicht
 5 = Bruch der Deck-schicht durch Werkstoffversag

+) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat.
 o) = Versuchsab-bruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat.
 *) = Versuchsab-bruch wegen zu großer Durchbiegungen
 LVK = Last-Verformungskurve

Beobachtungen
 Abzugversuche: Bruch im Kern oder am Übergang K/D. Einzelne größere Blasen in den Bruchflächen.
 Biegeversuche: Plötzlicher Bruch durch Ausbeulen der gedrückten Deck-schicht nach Knistern und Ribbildung im Zugbereich des Kerns.
 Sonstiges: Unregelmäßige Deckschicht-dicken.
 Abzugversuche: Bruch im Kern oder am Übergang K/D. Größere Streuung der Ergebnisse.
 Biegeversuche: Wie bei t = 20°C, geringere Streuung der Ergebnisse.
 Sonstiges: Wie bei t = 20°C
 Abzugversuche: Bruch im Kern oder am Übergang K/D. Sehr große Streuung der Ergebnisse.
 Biegeversuche: Plötzlicher Bruch durch Ausbeulen der gedrückten Deck-schicht. Bei Versuch 3: Fehlstelle, Beulbildung sofort.
 Sonstiges: Wie bei t = 20°C
 Abzugversuche: Wie bei t = 60°C
 Biegeversuche: Versagen durch Wellenbildung in gedrückter Deckschicht. Druck vom Kern allein aufgenommen. Bruch erst bei höherer Last.
 Sonstiges: Wie bei t = 20°C

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse										Blatt: 2		Kernmaterial: PH - LEICHTBETON (Blähton 10/20) $\gamma_{k, \text{Soll}} = 450 \text{ kg/m}^3$		Füllbauweise					
Zug- u. Druckversuche I. Deckschicht										Versuche am Decksch.-Mat		Biegeversuche		Beobachtungen		Erläuterungen			
Temp.	5 9	γ_k kg/m ³	σ_{zB} N/mm ²	Bruch	σ_{dB} N/mm ²	Bruch	$E_z K$ N/mm ²	$E_d K$ N/mm ²	f	δ_{jBD} N/mm ²	E_{dD} N/mm ²	h	b	M _B Nm	Bruch	f _B mm	f _g mm	f _{Soll} = 1 mm	$\gamma_{k, \text{Soll}} = 450 \text{ kg/m}^3$
20°C	1	447	0,201	K	218,2							140,8	195,4	840	o 3	2,5		Bruch überwiegend im Kern. Große Streuung der Ergebnisse. Unterschiedliches Versagen. Bei Vers. 1 u. 2 Ausbeulen d. gedrückten Deckschicht, bei Versuch 3 Reißen der gezogenen Deckschicht. Bei Biegeversuch 2 geht Beu- lung von Feinstelle aus. Bruch im Kern oder am Übergang K/D. Größere Streuung der Er- gebnisse. Wie bei t = 20°C Wie bei t = 20°C Bruch nur im Kern. Bruch nur durch Reißen der unteren Deckschicht. Bruch nur im Kern. Große Streuung. Unterschiedliches Versagen. Versuch 1: Reißen der gezo- genen Deckschicht. Versuch 2: Ausbeulen der ge- drückten Deckschicht. LVK=Last-Verfor- mungskurve	
	2	447	0,168	K	234,2							141,1	195,1	391	o 3	1,0			
	3	447	0,113	D	180,8							142,2	195,2	1562	u 5	5,6			
	4	496	0,237	K	207,4														
	5	473	0,198	K	270,0														
	6	472	0,183	K	222,1	(182,6)			~ 1,2	~ 86	~ 7000	141,4	195,2	931	o 4/3/5	3,0			
	7	458	0,252	K	420,0							140,3	195,2	1371	o 3	6,0			
	8	488	0,166	D	251,4							140,9	195,4	1202	o 3	5,5			
	9	451	0,196	K	235,9							139,4	195,1	1402	u 5	8,4			
	10	466	0,197	K/D	270,4	(224,0)			~ 1,2	~ 82	~ 5500	140,2	195,2	1325	o 4/3/5	6,6			
40°C	1	465	0,271	K	217,3							139,5	195,1	1264	u 5	7,6			
	2	449	0,309	K	233,4							141,3	194,8	1249	u 5	6,8			
	3	464	0,265	K	211,4							140,9	194,9	1316	u 5	7,6			
	4	464	0,306	K	198,6														
	5	459	0,289	K	215,7	(137,7)			~ 1,2	~ 37	~ 3800	140,6	194,9	1276	u 5	7,3			
	6	450	0,369	K	289,1							139,6	194,6	1071	u 5	10,6			
	7	450	0,309	K	267,7							140,7	194,1	870	o 3	6,6			
	8	488	0,246	K	268,1														
	9	424	0,276	K	203,9	(537,6)													
	10	454	0,273	K	237,2	(130,7)			~ 1,2	~ 16	~ 2600	140,1	194,3	970	o 4/3/5	8,6			
60°C	1	464	0,296	K	218,2							139,5	195,1	1264	u 5	7,6			
	2	465	0,271	K	217,3							141,3	194,8	1249	u 5	6,8			
	3	449	0,309	K	233,4							140,9	194,9	1316	u 5	7,6			
	4	464	0,265	K	211,4														
	5	464	0,306	K	198,6														
	6	459	0,289	K	215,7	(137,7)			~ 1,2	~ 37	~ 3800	140,6	194,9	1276	u 5	7,3			
	7	450	0,369	K	289,1							139,6	194,6	1071	u 5	10,6			
	8	488	0,246	K	268,1							140,7	194,1	870	o 3	6,6			
	9	424	0,276	K	203,9	(537,6)													
	10	454	0,273	K	237,2	(130,7)			~ 1,2	~ 16	~ 2600	140,1	194,3	970	o 4/3/5	8,6			
80°C	1	464	0,296	K	218,2							139,5	195,1	1264	u 5	7,6			
	2	465	0,271	K	217,3							141,3	194,8	1249	u 5	6,8			
	3	449	0,309	K	233,4							140,9	194,9	1316	u 5	7,6			
	4	464	0,265	K	211,4														
	5	464	0,306	K	198,6														
	6	459	0,289	K	215,7	(137,7)			~ 1,2	~ 37	~ 3800	140,6	194,9	1276	u 5	7,3			
	7	450	0,369	K	289,1							139,6	194,6	1071	u 5	10,6			
	8	488	0,246	K	268,1							140,7	194,1	870	o 3	6,6			
	9	424	0,276	K	203,9	(537,6)													
	10	454	0,273	K	237,2	(130,7)			~ 1,2	~ 16	~ 2600	140,1	194,3	970	o 4/3/5	8,6			

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Blatt: 3

Kernmaterial: P I R - L E I C H T B E T O N (Blähglas)

$\gamma_{k, Soll} = 250$ kg/m³

Deckschichtmaterial: S T A H L St 37

$f_{Soll} = 0,7$ mm

Füllbauweise

Temp.	E	S	T	Zug - u. Druckversuche ⊥ Deckschicht		Versuche am Decksch.-Mat		Biegeversuche				Beobachtungen	Erläuterungen		
				σ_{zB} N/mm ²	Bruch	σ_{dB} N/mm ²	Bruch	E_{zK} N/mm ²	E_{dK} N/mm ²	f mm	δ_{dB0} N/mm ²			E_{d0} N/mm ²	h mm
20°C	1	176,8	0,272	K 1	—	104,0	—	—	—	50,1	194,8	1614	—	3,8	Abzugversuche: Bruch nur im Kern. Einige Blasen in den Bruchflächen. Schäumrohr in Probe 5. Biegeversuche: Schäumrohr in Probenmitte parallel Biegeachse. Plötzlicher Bruch durch Ausbeulen der gedrückten Deckschicht meist über Schäumrohr. Sonstiges: Deckschicht-E-Modul i. Biegevers.nach DIN 50151 best. $\gamma_K < \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Bruch nur im Kern. Schäumrohr in Probe 5. Große Streuung d. E-Werte. Biegeversuche: Schäumrohr in Nähe der Einspannstellen parallel Biegeachse. Plötzl. Bruch durch Ausbeulen der gedrückten Deckschicht über Schäumrohr. Sonstiges: $\gamma_K < \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Schäumrohr in allen Proben. Bruch im Kern am Rohr. Zahlreiche Blasen in Bruchflächen. Biegeversuche: Proben ohne Schäumrohre. Bruch durch plötzl. Ausbeulen der gedrückten Deckschicht mit Stauchungen im Blech. Sonstiges: $\gamma_K < \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Schäumrohr in allen Proben. Bruch im Kern. Große Streuung der E-Werte. Biegeversuche: Proben ohne Schäumrohre. Bruch durch plötzliches Ausbeulen der gedrückten Deckschicht. Sonstiges: $\gamma_K < \gamma_{K, Soll}$. Bei Biegeversuch 1 Versagen der Einspannung (Klebung).
	2	176,8	0,272	K 1	—	104,0	—	—	—	50,1	194,8	1614	—	3,8	
	3	176,8	0,290	K 1	—	107,9	—	—	—	50,0	194,8	1548	0 3	3,6	
	4	176,8	0,314	K 1	—	108,9	—	—	—	50,4	194,9	1555	0 3	3,1	
	5	176,8	0,336	K 1	—	69,4	—	—	—	—	—	—	—	—	
	6	176,8	0,296	K 1	—	112,5	—	—	—	—	—	—	—	—	
	7	176,8	0,308	K 1	—	122,5	—	—	—	—	—	—	—	—	
	8	176,8	0,256	K 1	—	95,0	—	—	—	—	—	—	—	—	
	9	176,8	0,298	K 1	—	101,5	—	—	—	—	—	—	—	—	
	10	176,8	0,229	K	—	85,8	—	—	—	—	—	—	—	—	
40°C	1	177,6	0,251	K 1	—	127,5	—	—	—	50,7	195,1	1981	0 3	1,7	
	2	177,6	0,266	K	—	105,0	—	—	—	50,6	195,3	1885	0 3	1,6	
	3	177,6	0,278	K	—	63,4	—	—	—	50,3	195,0	1971	0 3	1,3	
	4	177,6	0,249	K	—	55,6	—	—	—	—	—	—	—	—	
	5	177,6	0,188	K 2	—	40,1	—	—	—	—	—	—	—	—	
	6	177,6	0,218	K 2	—	26,8	—	—	—	—	—	—	—	—	
	7	177,6	0,277	K 2	—	54,4	—	—	—	—	—	—	—	—	
	8	177,6	0,277	K 2	—	32,4	—	—	—	—	—	—	—	—	
	9	177,6	0,222	K 2	—	31,9	—	—	—	—	—	—	—	—	
	10	177,6	0,256	K 2	—	37,1	—	—	—	—	—	—	—	—	
60°C	1	179,9	0,204	K	—	32,0	—	—	—	50,3	195,0	2061	0 3	2,1	
	2	179,9	0,180	K	—	34,9	—	—	—	—	—	—	—	—	
	3	179,9	0,209	K	—	44,9	—	—	—	—	—	—	—	—	
	4	179,9	0,170,8	K	—	24,2	—	—	—	—	—	—	—	—	
	5	179,9	0,216	K	—	17,9	—	—	—	—	—	—	—	—	
	6	179,9	0,165	K	—	14,1	—	—	—	—	—	—	—	—	
	7	179,9	0,194	K	—	30,8	—	—	—	—	—	—	—	—	
	8	179,9	0,194	K	—	33,5	—	—	—	—	—	—	—	—	
	9	179,9	0,194	K	—	30,8	—	—	—	—	—	—	—	—	
	10	179,9	0,194	K	—	33,5	—	—	—	—	—	—	—	—	

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse										Blatt: 4		Kernmaterial: PIR - LEICHTBETON (Blähglas)		Deckenschichtmaterial: ALUMINIUM AL Mg Si0,5 F 22		Beobachtungen		Erläuterungen	
Temp.	ε	γ _k	Zug- u. Druckversuche I. Deckenschicht			Versuche am Decksch.-Mat.			Biegeversuche					f _{soil} = 1 mm	γ _{k,soil} = 250 kg/m ³	Füllbauweise			
			σ _{zB}	Bruch	σ _{zB}	Bruch	E _{zK}	E _{dK}	f	σ _{dBD}	E _{dD}	h	b				M _B	Bruch	f _B
		kg/m ³	N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²	mm	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	mm	Nm	mm				
20°C	1	157	0,327	K 1	31,1						50,2	195,0	1797		(14,4)	Schäumrohr in allen Proben. Bruch nur im Kern nahe Schäum- rohr. Zahlreiche Blasen in Bruchflächen. Biegeversuche: Versuch 1: Versuchsabbruch, da f infolge Fließen der Decksch. zu groß. Bruch der anderen d. Ausbeulen der gedrückten Deck- schicht z.T. nach Fließen. Sonstiges: γ _k << γ _{k, Soll} Abzugversuche: Bruch nur im Kern. Schäum- rohr in Probe 5. Biegeversuche: Schäumrohr in Nähe der Einspann- stellen parallel zur Biegeschiff- plötzl. Bruch durch Ausbeulen der gedr. Decksch. überwiegend am Rohr (teilweise Fließen). Sonstiges: γ _k < γ _{k, Soll} Abzugversuche: Wie bei t = 20° C Biegeversuche: Proben ohne Schäumrohr. Plötzl. Bruch durch Ausbeu- len der gedrückten Deck- schicht z.T. nach Fließen. Sonstiges: γ _k << γ _{k, Soll} Abzugversuche: Schäumrohr in allen Proben. Bruch nur im Kern. Biegeversuche: Wie bei t = 60° C f _t =0,50 m Sonstiges: γ _k << γ _{k, Soll}	Bruch: K = Bruch i. Kern D = Bruch am Über- gang Kern/Deck- schicht o = Br i. ogedrückter Deckschicht u = Br i. unt. gezogen. Deckschicht 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruch- fläche < 20 % 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruch- fläche > 20 % 3 = Ausbeulen (Ab- lösen) der Deck- schicht 4 = Einbeulen (Ein- brechen i. d. Kern) der Deckschicht 5 = Bruch der Deck- schicht durch Werkstoffversag. *) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat. o) = Versuchsab- bruch nach län- gerem Fließen d. Deckschicht- mat. *) = Versuchsab- bruch wegen zu großer Durch- biegungen LVK=Last-Verfor- mungskurve		
	2	192,9	0,315	K	82,9						50,5	195,2	1462		2,6				
	3	196,3	0,292	K	73,5						50,3	195,1	1573		2,8				
	4	191,9	0,282	K	103,5						50,0	195,0	1658		4,1				
	5	193,7	0,296	K	84,4	(119,4)					50,3	195,1	1564		3,2				
	6	192,9	0,193	K	15,8						50,5	195,1	6,3		25,7				
	7	161,9	0,291	K	24,4						50,0	195,0	1654		4,6				
	8	167,5	0,257	K	29,4						50,0	195,2	1638		4,6				
	9	102,5	0,254	K	34,2						50,2	195,0	1743		3,1				
	10	144,0	0,240	K	31,3	(43,6)					50,1	195,1	1945		4,1				
40°C	1	157	0,327	K 1	31,1						50,2	195,0	1797		(14,4)				
	2	192,9	0,315	K	82,9						50,5	195,2	1462		2,6				
	3	196,3	0,292	K	73,5						50,3	195,1	1573		2,8				
	4	191,9	0,282	K	103,5						50,0	195,0	1658		4,1				
	5	193,7	0,296	K	84,4	(119,4)					50,3	195,1	1564		3,2				
	6	192,9	0,193	K	15,8						50,5	195,1	6,3		25,7				
	7	161,9	0,291	K	24,4						50,0	195,0	1654		4,6				
	8	167,5	0,257	K	29,4						50,0	195,2	1638		4,6				
	9	102,5	0,254	K	34,2						50,2	195,0	1743		3,1				
	10	144,0	0,240	K	31,3	(43,6)					50,1	195,1	1945		4,1				
60°C	1	157	0,327	K 1	31,1						50,2	195,0	1797		(14,4)				
	2	192,9	0,315	K	82,9						50,5	195,2	1462		2,6				
	3	196,3	0,292	K	73,5						50,3	195,1	1573		2,8				
	4	191,9	0,282	K	103,5						50,0	195,0	1658		4,1				
	5	193,7	0,296	K	84,4	(119,4)					50,3	195,1	1564		3,2				
	6	192,9	0,193	K	15,8						50,5	195,1	6,3		25,7				
	7	161,9	0,291	K	24,4						50,0	195,0	1654		4,6				
	8	167,5	0,257	K	29,4						50,0	195,2	1638		4,6				
	9	102,5	0,254	K	34,2						50,2	195,0	1743		3,1				
	10	144,0	0,240	K	31,3	(43,6)					50,1	195,1	1945		4,1				
80°C	1	157	0,327	K 1	31,1						50,2	195,0	1797		(14,4)				
	2	192,9	0,315	K	82,9						50,5	195,2	1462		2,6				
	3	196,3	0,292	K	73,5						50,3	195,1	1573		2,8				
	4	191,9	0,282	K	103,5						50,0	195,0	1658		4,1				
	5	193,7	0,296	K	84,4	(119,4)					50,3	195,1	1564		3,2				
	6	192,9	0,193	K	15,8						50,5	195,1	6,3		25,7				
	7	161,9	0,291	K	24,4						50,0	195,0	1654		4,6				
	8	167,5	0,257	K	29,4						50,0	195,2	1638		4,6				
	9	102,5	0,254	K	34,2						50,2	195,0	1743		3,1				
	10	144,0	0,240	K	31,3	(43,6)					50,1	195,1	1945		4,1				

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse										Blatt: 7		Kernmaterial: PS - HARTSCHHAUM		Deckschichtmaterial: ALUMINIUM Al Mg Si0,5 F 22		$\gamma_{k, Soll} = 30$ kg/m ³		Erläuterungen				
Temp.	γ_k kg/m ³	Zug- u Druckversuche I. Deckschicht										Versuche am Decksch.-Mat				Biegeversuche				Beobachtungen	Erläuterungen	
		σ_{zB} N/mm ²	Bruch	σ_{dB} N/mm ²	Bruch	E_{zK} N/mm ²	E_{dK} N/mm ²	t mm	σ_{gBD} N/mm ²	E_{dD} N/mm ²	h mm	b mm	M_B Nm	Bruch	f_B mm							
20°C	1	0,168	K	6,01	0,97	67157	51,4	195,0	554,3	0	4	0,5									Bruch: K = Bruch i. Kern D = Bruch am Übergang Kern/Deckschicht o = Br i. o gedrückter Deckschicht u = Br i. unt. gezogenen Deckschicht 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20% 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20% 3 = Ausbeulen (Ab-lösen) der Deckschicht 4 = Einbeulen (Einbrechen i. d. Kern) der Deckschicht 5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag +)= Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat. o)= Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat. *)= Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen LVK = Last-Verformungskurve	
	2	0,107	D	5,20	0,99	67271	51,5	195,4	564,1	0	4	1,0										
	3	0,091	D	7,58	0,99	67456	51,6	195,1	537,6	0	4	0,6										
	4	0,087	D	5,93	0,97	67118																
	5	0,115	D	3,84	0,97	68137																
	6	0,114	D	5,83	(1,75)	67612	51,5	195,2	552,3	0	4	0,7										
	7	0,132	K	5,42	1,1	0,9	52,4	195,5	705,3	0	4	1,0										
	8	0,111	D	5,32			51,8	195,6	635,7	0	4	0,6										
	9	0,103	D	5,68			51,5	195,2	576,8	0	4	0,7										
	10	0,107	D	6,47	3,27																	
40°C	1	0,120	D/K	5,84	(3,27)		51,9	195,4	639,6	0	4	0,8										
	2	0,127	D	6,26			51,2	194,8	767,1	0	4	1,3										
	3	0,047	D	5,95			52,0	195,2	730,8	0	4	0,8										
	4	0,036	D	4,14			51,6	195,1	645,5	0	4	1,0										
	5	0,038	D	3,70																		
	6	0,100	D	5,83	1,48																	
	7	0,070	D	5,18	(1,48)		51,6	195,0	714,2	0	4	1,0										
	8	0,089	D	5,67			50,9	195,0	570,9	0	4	0,7										
	9	0,067	D	4,13			51,4	195,1	603,3	0	4	0,7										
	10	0,063	D	2,50			51,5	194,7	544,5	0	4	0,6										
60°C	1	0,050	D	2,65	1,04																	
	2	0,059	D	1,83																		
	3	0,066	D	3,36	(1,04)		51,3	194,9	572,9	0	4	0,7										
	4	0,062	D	2,59			51,5	194,7	544,5	0	4	0,6										
	5	0,066	D	3,36																		
	6	0,066	D	3,36																		
	7	0,066	D	3,36																		
	8	0,066	D	3,36																		
	9	0,066	D	3,36																		
	10	0,066	D	3,36																		

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Kernmaterial : P S - L E I C H T B E T O N
 Deckschichtmaterial : A L U M I N I U M

$\gamma_{K, Soll} = 600 \text{ kg/m}^3$
 $f_{Soll} = 1 \text{ mm}$

Hilfbaubeise

Temp.	Eigenschaften	Zug - u. Druckversuche I Deckschicht				Versuche am Decksch.-Mat				Biegeversuche				Beobachtungen	Erläuterungen
		σ_{zB} N/mm ²	Bruch	σ_{dB} N/mm ²	Bruch	E_{zK} N/mm ²	E_{dK} N/mm ²	f mm	δ_{dB0} N/mm ²	E_{d0} N/mm ²	h mm	b mm	M_B N.m		
20°C	1	342	K	0,236	—	142,7	—	0,81	72755	79,4	194,0	2515	+	2,0	Bruch überwiegend am Übergang K/D. Große Streuung der Ergebnisse. Deckschichtdicke $t = 1,1 \text{ mm}$. Bruch nach Fließerscheinungen in den Deckschichten durch Ausbeulen oder Zugversagen. Sonstiges: Deckschicht-E-Modul im Biegeversuch nach DIN 50151 bestimmt. $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Bruch nur am Übergang K/D. Große Streuung der Ergebnisse. Biegeversuche: Wie bei $t = 20^\circ \text{C}$ $l_f = 0,50 \text{ m}$ Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Wie bei $t = 20^\circ \text{C}$ $l_f = 0,50 \text{ m}$ Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Wie bei $t = 40^\circ \text{C}$. Deckschichtdicke $t = 0,85 \text{ mm}$. Bruch nach Fließerscheinungen in den Deckschichten durch Ausbeulen. Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Deckschichtdicke $t = 0,9 \text{ mm}$. Bruch nach Fließerscheinungen in den Deckschichten durch Ausbeulen oder Zugversagen. Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$. Bei Biegeversuch 3 Versagen der Einspannung (Klebung).
	2	344	D	0,057	—	126,0	—	0,81	72820	79,5	194,8	2564	o/u	5	
	3	342	D	0,129	—	146,1	—	0,81	73084	79,5	194,7	2761	u	5	
	4	364	D	0,170	—	113,7	—	0,81	71965	79,7	194,6	2416	+	5	
	5	364	D	0,238	—	165,1	—	0,81	72828	79,7	194,6	2416	+	5	
	6	347	D	0,148	—	109,5	—	0,81	73913	79,9	194,8	2685	u	5	
	7	347	D	0,148	—	109,5	—	0,81	72372	79,9	194,8	2685	u	5	
	8	347	D	0,148	—	109,5	—	0,81	72372	79,9	194,8	2685	u	5	
	9	347	D	0,148	—	109,5	—	0,81	72372	79,9	194,8	2685	u	5	
	10	347	D	0,148	—	109,5	—	0,81	72372	79,9	194,8	2685	u	5	
40°C	1	347	D	0,107	—	132,0	(164,9)	0,81	72820	79,9	194,8	2676	u	5	Bruch überwiegend am Übergang K/D. Große Streuung der Ergebnisse. Deckschichtdicke $t = 1,1 \text{ mm}$. Bruch nach Fließerscheinungen in den Deckschichten durch Ausbeulen oder Zugversagen. Sonstiges: Deckschicht-E-Modul im Biegeversuch nach DIN 50151 bestimmt. $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Bruch nur am Übergang K/D. Große Streuung der Ergebnisse. Biegeversuche: Wie bei $t = 20^\circ \text{C}$ $l_f = 0,50 \text{ m}$ Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Wie bei $t = 20^\circ \text{C}$ $l_f = 0,50 \text{ m}$ Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Wie bei $t = 40^\circ \text{C}$. Deckschichtdicke $t = 0,85 \text{ mm}$. Bruch nach Fließerscheinungen in den Deckschichten durch Ausbeulen. Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Deckschichtdicke $t = 0,9 \text{ mm}$. Bruch nach Fließerscheinungen in den Deckschichten durch Ausbeulen oder Zugversagen. Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$. Bei Biegeversuch 3 Versagen der Einspannung (Klebung).
	2	395	D	0,235	—	259,9	—	0,81	72820	80,1	195,1	2243	+	3/5	
	3	395	D	0,184	—	189,5	—	0,81	72820	79,7	194,8	2639	u	5	
	4	366	D	0,165	—	188,5	—	0,81	72820	80,2	194,9	2704	+	3/5	
	5	366	D	0,165	—	188,5	—	0,81	72820	80,2	194,9	2704	+	3/5	
	6	366	D	0,121	—	65,4	—	0,81	72820	80,1	195,1	2243	+	3/5	
	7	353	D	0,157	—	79,5	—	0,81	72820	79,9	194,9	2237	+	3/5	
	8	353	D	0,157	—	79,5	—	0,81	72820	79,9	194,9	2237	+	3/5	
	9	353	D	0,157	—	79,5	—	0,81	72820	79,9	194,9	2237	+	3/5	
	10	353	D	0,157	—	79,5	—	0,81	72820	79,9	194,9	2237	+	3/5	
60°C	1	372	D	0,173	—	156,6	(99,3)	0,81	72820	80,0	195,1	2246	+	3/5	Bruch überwiegend am Übergang K/D. Große Streuung der Ergebnisse. Deckschichtdicke $t = 1,1 \text{ mm}$. Bruch nach Fließerscheinungen in den Deckschichten durch Ausbeulen oder Zugversagen. Sonstiges: Deckschicht-E-Modul im Biegeversuch nach DIN 50151 bestimmt. $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Bruch nur am Übergang K/D. Große Streuung der Ergebnisse. Biegeversuche: Wie bei $t = 20^\circ \text{C}$ $l_f = 0,50 \text{ m}$ Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Wie bei $t = 20^\circ \text{C}$ $l_f = 0,50 \text{ m}$ Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Wie bei $t = 40^\circ \text{C}$. Deckschichtdicke $t = 0,85 \text{ mm}$. Bruch nach Fließerscheinungen in den Deckschichten durch Ausbeulen. Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Deckschichtdicke $t = 0,9 \text{ mm}$. Bruch nach Fließerscheinungen in den Deckschichten durch Ausbeulen oder Zugversagen. Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$. Bei Biegeversuch 3 Versagen der Einspannung (Klebung).
	2	338	D	0,119	—	73,9	—	0,81	72820	80,1	195,1	2246	+	3/5	
	3	338	D	0,099	—	69,6	—	0,81	72820	80,4	194,8	2346	+	3/5	
	4	354	D	0,110	—	67,0	—	0,81	72820	79,9	194,7	(-1904)	Einsp	(1,8)	
	5	354	D	0,110	—	67,0	—	0,81	72820	79,9	194,7	(-1904)	Einsp	(1,8)	
	6	354	D	0,105	—	67,1	—	0,81	72820	79,9	194,9	2390	u	5	
	7	341	D	0,101	—	85,2	—	0,81	72820	80,4	194,8	2346	+	3/5	
	8	341	D	0,101	—	85,2	—	0,81	72820	80,4	194,8	2346	+	3/5	
	9	341	D	0,101	—	85,2	—	0,81	72820	80,4	194,8	2346	+	3/5	
	10	341	D	0,101	—	85,2	—	0,81	72820	80,4	194,8	2346	+	3/5	
80°C	1	344	D	0,107	—	72,6	(54,4)	0,81	72820	80,2	194,9	2312	o/u	5	Bruch überwiegend am Übergang K/D. Große Streuung der Ergebnisse. Deckschichtdicke $t = 1,1 \text{ mm}$. Bruch nach Fließerscheinungen in den Deckschichten durch Ausbeulen oder Zugversagen. Sonstiges: Deckschicht-E-Modul im Biegeversuch nach DIN 50151 bestimmt. $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Bruch nur am Übergang K/D. Große Streuung der Ergebnisse. Biegeversuche: Wie bei $t = 20^\circ \text{C}$ $l_f = 0,50 \text{ m}$ Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Wie bei $t = 20^\circ \text{C}$ $l_f = 0,50 \text{ m}$ Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Wie bei $t = 40^\circ \text{C}$. Deckschichtdicke $t = 0,85 \text{ mm}$. Bruch nach Fließerscheinungen in den Deckschichten durch Ausbeulen. Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$ Abzugversuche: Deckschichtdicke $t = 0,9 \text{ mm}$. Bruch nach Fließerscheinungen in den Deckschichten durch Ausbeulen oder Zugversagen. Sonstiges: $\gamma_K \ll \gamma_{K, Soll}$. Bei Biegeversuch 3 Versagen der Einspannung (Klebung).
	2	344	D	0,107	—	72,6	(54,4)	0,81	72820	80,2	194,9	2312	o/u	5	
	3	344	D	0,107	—	72,6	(54,4)	0,81	72820	80,2	194,9	2312	o/u	5	
	4	344	D	0,107	—	72,6	(54,4)	0,81	72820	80,2	194,9	2312	o/u	5	
	5	344	D	0,107	—	72,6	(54,4)	0,81	72820	80,2	194,9	2312	o/u	5	
	6	344	D	0,107	—	72,6	(54,4)	0,81	72820	80,2	194,9	2312	o/u	5	
	7	344	D	0,107	—	72,6	(54,4)	0,81	72820	80,2	194,9	2312	o/u	5	
	8	344	D	0,107	—	72,6	(54,4)	0,81	72820	80,2	194,9	2312	o/u	5	
	9	344	D	0,107	—	72,6	(54,4)	0,81	72820	80,2	194,9	2312	o/u	5	
	10	344	D	0,107	—	72,6	(54,4)	0,81	72820	80,2	194,9	2312	o/u	5	

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse										Blatt: 10		Kernmaterial: PUR - HARTSCHAUM		Deckenschichtmaterial: STAHL St 37		$\lambda_{k, \text{Soil}} = 40 \text{ kg/m}^3$ $f_{\text{Soil}} = 0,7 \text{ mm}$		Füllbauweise	
Temp.	Temp. λ_k	Zug - u. Druckversuche \perp Deckenschicht		Versuche am Decksch.-Mat.		Biegeversuche						Beobachtungen	Erläuterungen						
		σ_{zB}	Bruch	σ_{dB}	Bruch	E_{zK}	E_{dK}	f	σ_{dB0}	E_{d0}	h			b	M_b	Bruch	f_b		
	kg/m ³	N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²	N/mm ²	mm	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	Nm		mm				
20°C	1	42,8	D 2	0,113	—	—	—	0,57	189911	50,2	194,9	—	667	o 4	2,4				
	2	41,1	D 2	0,176	D 2	8,36	—	0,57	196648	49,8	194,5	o 4	684	o 4	2,9				
	3	40,5	D 1	0,168	D 2	8,86	—	0,57	198087	50,1	194,6	o 4	650	o 4	2,9				
	4	40,4	D 1	0,235	D 1	9,38	—	0,56	191072	50,5	194,4	o 4	628	o 4	2,3				
	5	40,4	K 1	0,289	K 1	8,61	—	0,57	191424	—	—	—	—	—	—				
	6	40,6	D 1	0,241	D 1	8,60	—	0,57	199327	—	—	—	—	—	—				
	7	40,5	D 1	0,250	D 1	8,79	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
	8	40,6	D	0,244	D	7,98	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
	9	40,6	D	0,199	D	7,88	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
	10	40,6	D	0,199	D	7,88	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
40°C	1	41,1	D 1/2	0,213	D 1/2	8,55	—	0,57	194411	50,1	194,6	o 4	657	o 4	2,6				
	2	41,1	D 2	0,143	D 2	5,94	—	0,7%	2,1%	0,6%	0,1%	3,6%	4,7%	o 4	1,8				
	3	40,0	D 2	0,174	D 2	4,86	—	—	—	50,1	194,8	o 4	572	o 4	2,2				
	4	40,0	D 2	0,235	D 2	6,88	—	—	—	50,0	195,1	o 4	616	o 4	1,9				
	5	40,0	D 2	0,198	D 2	7,22	—	—	—	50,2	194,4	o 4	626	o 4	1,9				
	6	41,3	D 2	0,220	D 2	7,57	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
	7	41,3	D 2	0,129	D 2	7,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
	8	41,3	D	0,057	D	4,70	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
	9	41,3	D	0,057	D	4,70	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
	10	41,3	D	0,057	D	4,70	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
60°C	1	42,8	D 2	0,175	D 2	6,28	(4,91)	—	—	50,1	194,8	o 4	605	o 4	2,0				
	2	42,2	D	0,227	D	7,46	—	—	—	0,2%	0,2%	4,7%	618	o 4	0,8				
	3	44,0	D 1	0,209	D 1	8,04	—	—	—	49,9	195,2	o 4	699	o 4	0,8				
	4	44,0	D 1	0,209	D 1	8,25	—	—	—	49,7	195,2	o 4	699	o 4	0,8				
	5	44,0	D 1	0,188	D 1	8,70	—	—	—	49,9	195,2	o 4	601	o 4	0,5				
	6	42,1	D 2	0,176	D 2	8,09	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
	7	42,1	D 2	0,176	D 2	8,09	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
	8	42,1	D 2	0,176	D 2	8,09	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
	9	42,1	D 2	0,176	D 2	8,09	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
	10	42,1	D 2	0,176	D 2	8,09	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
80°C	1	42,8	D 1	0,188	D 1	8,11	(5,17)	—	—	49,8	195,2	o 4	640	o 4	0,7				
	2	40,5	D	0,140	D	5,5%	—	—	—	0,2%	0%	8,2%	546	o 4	0,6				
	3	40,5	D	0,180	D	7,49	—	—	—	50,6	194,3	o 4	546	o 4	0,7				
	4	40,4	K 1	0,206	K 1	8,10	—	—	—	50,5	194,9	o 4	542	o 4	0,7				
	5	40,4	D	0,175	D	7,84	—	—	—	50,3	194,9	o 4	582	o 4	0,5				
	6	40,6	D 1	0,189	D 1	8,53	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
	7	40,5	D	0,178	D	7,73	(4,14)	—	—	—	—	—	—	—	—				
	8	40,5	D	0,178	D	7,73	(4,14)	—	—	—	—	—	—	—	—				
	9	40,5	D	0,178	D	7,73	(4,14)	—	—	—	—	—	—	—	—				
	10	40,5	D	0,178	D	7,73	(4,14)	—	—	—	—	—	—	—	—				

Bruch:
 K = Bruch i. Kern
 D = Bruch am Übergang Kern/Deckenschicht
 o = Br. i. o gedrückter Deckschicht
 u = Br. i. unt. gezogen Deckschicht
 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20%
 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20%
 3 = Ausbeulen (Ab-lösen) der Deck-schicht
 4 = Einbeulen (Ein-brechen i. d. Kern) der Deckschicht
 5 = Bruch der Deck-schicht durch Werkstoffversag
 *) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat.
 o) = Versuchsab-bruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat.
 *) = Versuchsab-bruch wegen zu großer Durchbiegungen
 LVK = Last-Verformungskurve

Temp.	ε ₃	γ _k kg/m ³	Zug- u. Druckversuche 1. Deckschicht										Versuche am Decksch.-Mat					Biegeversuche					Beobachtungen	Erläuterungen
			σ _{zB} N/mm ²	Bruch	σ _{dB} N/mm ²	Bruch	E _{zK} N/mm ²	E _{dK} N/mm ²	t mm	δ _{BD} N/mm ²	E _{dD} N/mm ²	h mm	b mm	M _B Nm	Bruch	f _B mm								
20°C	1	74	0,274	D	22,2	20,4	20,2	18,7	19,000	49,4	195,9	1352	o 3/4	4,6										
	2	74,4	0,699	K 1	21,7	22,2	20,7	(18,7)	50,0	195,1	1247	o 4	4,0											
	3	75,1	0,633	K 1	20,7	21,7	20,9	18,4	48,9	195,1	1010	o 4	3,5											
	4	75,1	0,658	K 1	20,7	21,7	20,9	18,4	49,0	194,9	1010	o 3	3,7											
	5	75,1	0,551	D 1	19,9	21,5	21,5	18,4																
	6	75,1	0,424	D 1	19,3	21,5	21,5	18,4																
	7	75,1	0,514	D 2	19,8	21,5	21,5	18,4																
	8	75,1	0,507	D 1	19,1	21,5	21,5	18,4																
	9	75,1	0,439	D	19,6	21,5	21,5	18,4																
	10	75,1	0,534	D 1	20,3	21,5	21,5	18,7	19,000	49,4	195,9	1352	o 3/4	4,6										
40°C	1	74	0,274	D	22,2	20,4	20,2	18,7	19,000	49,4	195,9	1352	o 3/4	4,6										
	2	74,4	0,578	K 1	21,7	22,2	20,7	(18,7)	50,0	195,1	1247	o 4	4,0											
	3	75,1	0,568	K 1	20,7	21,7	20,9	18,4	48,9	195,1	1010	o 4	3,5											
	4	75,1	0,549	K 2	21,7	21,7	20,9	18,4	49,0	194,9	1010	o 3	3,7											
	5	75,1	0,520	K 1	20,9	21,5	21,5	18,4																
	6	75,1	0,482	K 2	21,5	21,5	21,5	18,4																
	7	75,1	0,461	K 1	20,3	21,5	21,5	18,4																
	8	75,1	0,429	D 1	21,4	21,4	21,4	18,4																
	9	75,1	0,517	K 1	21,1	21,4	21,4	18,4																
	10	75,1	0,439	D 1	21,4	21,4	21,4	18,4																
60°C	1	71,2	0,463	K 1	21,0	21,4	21,0	(18,4)	49,3	195,0	1264	o 3/4	3,7											
	2	72,1	0,509	K 1	22,0	21,4	22,0	18,4	50,1	195,0	1359	o 4	1,4											
	3	72,1	0,482	K 1	12,8	21,4	22,0	18,4	49,2	195,1	1169	o 4	1,2											
	4	72,1	0,517	K 1	15,3	21,4	22,0	18,4	49,0	194,9	1254	o 3	1,5											
	5	72,1	0,482	K 1	12,8	21,4	22,0	18,4																
	6	72,1	0,517	K 1	15,3	21,4	22,0	18,4																
	7	72,1	0,482	K 1	12,8	21,4	22,0	18,4																
	8	72,1	0,517	K 1	15,3	21,4	22,0	18,4																
	9	72,1	0,482	K 1	12,8	21,4	22,0	18,4																
	10	72,1	0,517	K 1	15,3	21,4	22,0	18,4																
80°C	1	66,6	0,419	K 1	16,4	17,1	16,4	(13,1)	49,4	195,0	1261	o 3/4	1,4											
	2	66,6	0,417	K 1	17,6	17,1	17,6	13,1	50,1	195,0	1070	o 4	1,3											
	3	66,6	0,307	K 2	16,0	17,1	17,6	13,1	49,4	194,9	1143	o 4	1,4											
	4	66,6	0,417	K 1	17,6	17,1	17,6	13,1	49,1	195,0	1126	o 4	1,2											
	5	66,6	0,307	K 2	16,0	17,1	17,6	13,1																
	6	66,6	0,417	K 1	17,6	17,1	17,6	13,1																
	7	66,6	0,417	K 1	17,6	17,1	17,6	13,1																
	8	66,6	0,417	K 1	17,6	17,1	17,6	13,1																
	9	66,6	0,417	K 1	17,6	17,1	17,6	13,1																
	10	66,6	0,417	K 1	17,6	17,1	17,6	13,1																

Bruch:
 K = Bruch i. Kern
 D = Bruch am Übergang Kern/Deckschicht
 o = Br. i. o.gedrückter Deckschicht
 u = Br. i. unt.gezogenen Deckschicht
 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20%
 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20%
 3 = Ausbeulen (Ab-lösen) der Deckschicht
 4 = Einbeulen (Einbrechen i. d. Kern) der Deckschicht
 5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag.
 *) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat.
 o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat.
 *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen
 LVK = Last-Verformungskurve

BAM - Vh 02205										Kernmaterial: PUR - HARTSCHAUM										Füllbauweise									
Zusammenstellung der Versuchsergebnisse										Blatt: 12										7 _{k, Soll} = 100 kg/m ³ f _{Soll} = 0,7 mm									
Temp.	ε ₃	γ _k	Zug - u. Druckversuche ⊥ Deckschicht			Versuche am Decksch.-Mat			Biegeversuche						Beobachtungen	Erläuterungen													
			σ _{ZB}	Bruch	σ _{dB}	Bruch	E _{ZK}	E _{DK}	t	σ _{dB0}	E _{d0}	h	b	M _B			Bruch	f _B											
	kg/m ³		N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	N/mm ²	mm	mm	mm	Nm	mm													
20°C	1	~ 98	0,320	D 1	27,2							50,0	195,1	2026	0 3	6,6													
	2		0,555	D 1	29,0							50,3	194,9	2104	0 3	6,6													
	3		0,414	D	29,9							49,6	194,5	1999	0 3	6,5													
	4		0,358	D	28,8																								
	5		0,770	D	30,4																								
	6		0,788	K	31,1																								
	7		0,918	K	31,2																								
	8		0,440	D	30,2																								
	9		0,464	D	30,1																								
	10																												
40°C	1	~ 98	0,560	D	(0,603)	29,8	(28,3)	~ 0,6				50,0	194,8	2043	0 3	6,6													
	2		0,678	K 1	27,4	4,2 %						50,2	195,3	1772	0 3	4,7													
	3		0,794	K 1	28,7							50,0	195,0	1768	0 3	4,6													
	4		0,619	K 1	29,1							49,7	194,9	1633	0 3	3,9													
	5		0,705	K 1	28,4																								
	6		0,717	K 1	30,3																								
	7		0,669	K 1	29,1																								
	8		0,670	D 1	30,0																								
	9		0,645	D 2	29,1																								
	10																												
60°C	1	~ 97,4	0,680	K 1	29,0	(24,9)						50,0	195,1	1725	0 3	4,4													
	2		0,525	K 1	25,5	3,1 %						49,9	195,1	1553	0 3	1,5													
	3		0,611	K 1	26,3							49,7	195,1	1631	0 3	1,5													
	4		0,571	K 1	25,2							49,9	195,2	1664	0 3	1,7													
	5		0,582	K 1	25,6																								
	6		0,655	K 1	25,9																								
	7																												
	8		0,650																										
	9																												
	10																												
80°C	1	~ 96,0	0,589	K 1	25,7	(19,2)						49,8	195,1	1616	0 3	1,6													
	2		0,538	K 1	1,6 %							50,5	195,0	1295	0 3	1,2													
	3		0,520	K 1	23,9							50,3	195,0	1301	0 3	1,4													
	4		0,498	K 1	24,3							50,7	194,9	1409	0 4	1,3													
	5		0,427	K 2	22,8																								
	6		0,582	K 1	25,7																								
	7																												
	8		0,513	K 1	24,2	(19,2)						50,5	195,0	1315	0 3/4	1,3													
	9		0,431		4,3 %							50,3	194,9	1315	0 3/4	1,3													
	10																												

Bruch:
 K = Bruch i. Kern
 D = Bruch am Übergang Kern/Deckschicht
 o = Br. i. o.gedrückter Deckschicht
 u = Br. i. unt.gezogen. Deckschicht
 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20 %
 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20 %
 3 = Ausbeulen (Ab-lösen) der Deckschicht
 4 = Einbeulen (Einbrechen i. Kern) der Deckschicht
 5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag.
 *) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat.
 o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat.
 *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen
 LVK = Last-Verformungskurve

Beobachtungen
 Abzugversuche: Bruch überwiegend am Übergang K/D. Vereinzelt Blasen in Bruchflächen. Große Streuung der Ergebnisse.
 Biegeversuche: Bruch durch plötzlichliches Ausbeulen der gedrückten Deckschicht.
 l_f = 0,75 m
 Sonstiges:
 Abzugversuche: Bruch überwiegend im Kern. Einzelne Blasen in Bruchflächen.
 Biegeversuche: Wie bei t = 20° C
 l_f = 0,75 m
 Sonstiges:
 Abzugversuche: Bruch nur im Kern. Einzelne Blasen in Bruchflächen.
 Biegeversuche: Wie bei t = 20° C
 l_f = 0,50 m
 Sonstiges:
 Abzugversuche: Bruch nur im Kern. Einzelne, gelegentlich auch zahlreiche Blasen in Bruchflächen.
 Biegeversuche: Bruch durch plötzlichliches Ausbeulen oder Einbeulen der gedrückten Deckschicht.
 l_f = 0,50 m
 Sonstiges:

Temp.	γk	Zug - u. Druckversuche I. Deckschicht		Versuche am Decksch.-Mat.		Biegeversuche					Beobachtungen	Erläuterungen			
		σzB	Bruch	σdB	Bruch	EzK	EdK	f	σdB0	EdD			h	b	Mg
	kg/m ³	N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²	N/mm ²	mm	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	Nm	mm	mm
20°C	~ 43	0,210	D 2	8,48		0,8	69141	50,1	194,7	669,0	0 3/4	~ 4,2			
	γ 10,2%	0,185	D 2	7,80		%	1,1%	0,1%	0,1%	3,5%	0 4	3,7			
		0,235	K 2	8,42				49,9	194,8	668,1	0 4	3,7			
		0,254	D 2	8,18				49,9	194,7	672,0	0 3	3,9			
		0,226	D 2	8,40				49,9	195,4	672,0	0 4	4,1			
		0,218	D 2	8,37											
		0,224	K 2	8,02											
		0,217	K 2	8,29											
		0,199	K 1	7,43											
		0,180	D	7,51											
40°C	~ 44	0,215	D/12	8,04				49,9	195,0	671,0	0 3/4	3,9			
	γ 11,0%	0,207	D 2	8,7		%		0,6%	0,2%	0,3%	0 4	3,1%			
		0,207	D 2	9,05				50,1	195,0	684,7	0 4	1,4			
		0,192	D 2	9,08				49,6	195,2	681,8	0 4	1,9			
		0,210	D 2	9,25				49,5	195,0	701,4	0 4	1,2			
		0,217	K 2	8,76											
		0,226	K 2	8,56											
		4,40													
		~ 43,2	0,210	D/12	8,95	(4,40)			49,7	195,1	689,0	0 4	1,5		
	γ 8,7%	0,166	K 1	7,71		%		0,6%	0,1%	1,5%	0 4	21,0%			
	0,181	K 1	9,49				49,9	195,1	616,1	0 4	1,4				
	0,192	K 1	8,35				49,6	194,8	652,4	0 4	1,5				
	0,194	K 1	7,96				50,0	195,2	(-400,2) Einsp.	0 4					
	0,210	K 1	7,85												
	~ 40,6	0,188	K 1	8,47	(4,35)			49,8	195,2	651,4	0 4	1,4			
γ 0,9%	0,7			7,8	%		0,1%	0,1%	5,3%	0 4	11,2%				

*) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat.
 o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat.
 *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen
 LVK-Last-Verformungskurve
 Bei Biegeversuch 3: Versagen der Einspannung (Klebung).
 Biegeversuche: Wie bei t = 20°C
 l_f = 0,75 m
 Sonstiges:
 Abzugversuche: Wie bei t = 40°C
 l_f = 0,50m
 Sonstiges:
 Biegeversuche: Bruch durch plötzliches Einbeulen der gedrückten Deckschicht.
 l_f = 0,50m
 Sonstiges:
 Abzugversuche: Bruch nur im Kern. Einzelne Blasen in Bruchflächen.
 Biegeversuche: Plötzlicher Bruch durch Einbeulen der gedrückten Deckschicht.
 l_f = 0,50m
 Sonstiges:
 Bei Biegeversuch 3: Versagen der Einspannung (Klebung).

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse										Kernmaterial: PUR - HARTSCHAUM										Füllbauweise									
Blatt: 15										Deckschichtmaterial: ALUMINIUM AL Mg Si 0,5 F 22										$\gamma_{k, \text{Soll}} = 100 \text{ kg/m}^3$ $f_{\text{Soll}} = 1 \text{ mm}$									
Temp.	E	E	E	Zug - u. Druckversuche I. Deckschicht					Versuche am Decksch.-Mat					Biegeversuche					Beobachtungen	Erläuterungen									
				σ_{zB}	Bruch	σ_{dB}	Bruch	E_{zK}	E_{dK}	f	δ_{dB}	E_{dD}	b	M_b	Bruch	f_B													
	kg/m ³	N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²	mm	N/mm ²	N/mm ²	mm	Nm	mm	Nm	mm	Nm														
20°C	1	103	0,719	D	28,75	0,8	~ 69000	50,2	194,9	1727	0 3/4	13,0																	
	2	104,5	0,561	D	30,29			50,6	194,8	1499	0 3	7,3																	
	3	104,5	0,665	D	28,38			50,6	195,0	1519	0 3	8,0																	
	4	108,1	0,784	K	29,08			50,4	195,1	1591	0 3	8,8																	
	5	109,3	0,589	D	28,72																								
	6	109,3	0,724	D	27,25																								
	7	109,3	0,738	K	21,91																								
	8	109,3	0,788	K	30,66																								
	9	109,3	0,689	D/K	29,45																								
	10	109,3	0,388	D	28,65																								
40°C	1	104,5	0,557	D	30,16			50,1	195,1	1580	0 3	4,9																	
	2	104,5	0,519	D	28,20			50,4	194,8	1515	0 3	3,9																	
	3	108,1	0,527	D	29,35																								
	4	109,3	0,568	D	29,75																								
	5	109,3	0,512	D	29,22			50,2	195,0	1548	0 3	4,4																	
	6	109,3	0,458	D	27,38			50,2	195,1	1515	0 3	3,9																	
	7	108,7	0,416	D	26,25																								
	8	109,8	0,337	D	23,47			50,0	195,0	1377	0 4	3,2																	
	9	109,8	0,446	D	27,17			50,2	195,3	1433	0 3	3,1																	
	10	111,8	0,422	D	26,69																								
80°C	1	110,1	0,416	D	26,19			50,1	195,1	1466	0 3/4	3,2																	
	2	114,5	0,315	D	21,53			50,2	195,3	1433	0 3	3,1																	
	3	114,5	0,315	D	21,53																								
	4	114,5	0,315	D	21,53																								
	5	114,5	0,315	D	21,53																								
	6	114,5	0,315	D	21,53																								
	7	114,5	0,315	D	21,53																								
	8	114,5	0,315	D	21,53																								
	9	114,5	0,315	D	21,53																								
	10	114,5	0,315	D	21,53																								

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Temp.	Versuch	γ_k kg/m ³	Zug- u. Druckversuche I. Deckschicht			Versuche am Decksch.-Mat.			Biegeversuche				Beobachtungen	Erläuterungen		
			σ_{zB} N/mm ²	Bruch	E_{zK} N/mm ²	E_{dK} N/mm ²	f mm	σ_{dB} N/mm ²	ϵ %	ϵ_{dB} N/mm ²	ϵ %	E_{dD} N/mm ²			h mm	b mm
20°C	1	43,5	0,207	D 2	7,67	7977	1,91	169	50,2	194,8	835,8	0 3	15,3	Bruch z.T. am Übergang K/D, überwiegend jedoch im Kern. Zahlreiche Blasen in Bruchflächen. Bruch durch plötzlichliches Ausbeulen der gedrückten Deckschicht. Leichte Wellenbildung vorher erkennbar. Sonstiges: Abzugversuche: Bruch überwiegend im Kern. Zahlreiche Blasen in Bruchflächen. Biegeversuche: Bruch durch plötzlichliches Ein- oder Ausbeulen der gedrückten Deckschicht. Leichte Wellenbildung vorher erkennbar. Sonstiges: Abzugversuche: Bruch überwiegend im Kern. Zahlreiche Blasen in Bruchflächen. Biegeversuche: Bruch durch plötzlichliches Ein- oder Ausbeulen der gedrückten Deckschicht. Leichte Wellenbildung vorher erkennbar. Sonstiges:	Bruch: K = Bruch i. Kern D = Bruch am Übergang Kern/Deckschicht o = Br. i. gedrückter Deckschicht u = Br. i. ungedr. Deckschicht 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20 % 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20 % 3 = Ausbeulen (Ab-lösen) der Deckschicht 4 = Einbeulen (Einbrechen i. Kern) der Deckschicht 5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag *) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat. o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat. *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen LWK = Last-Verformungskurve	
	2	43,44	0,284	D 2	9,98	6131	1,92	-	50,0	194,8	808,2	0 3	16,9			
	3	43,5	0,265	D 2	9,54	7990	1,93	-	49,8	194,6	778,9	0 3	14,9			
	4	43,5	0,267	K 2	9,08	8588	2,00	147	-	-	-	-	-			-
	5	43,5	0,264	K 2	9,15	9202	1,82	188	-	-	-	-	-			-
	6	43,5	0,277	K 2	9,24	6077	2,00	151	-	-	-	-	-			-
	7	43,5	0,278	K 2	9,32	6482	1,93	169	-	-	-	-	-			-
	8	43,5	0,268	K 2	8,45	6642	2,03	171	-	-	-	-	-			-
	9	43,5	0,246	K 2	8,17	-	-	-	-	-	-	-	-			-
	10	43,5	0,252	K 2	8,85	7386	1,94	166	-	50,0	194,7	807,4	0 3			15,7
40°C	1	43,5	0,241	K 2	7,68	6921	1,94	121	50,0	194,8	591,5	0 4	14,0	Bruch z.T. am Übergang K/D, überwiegend jedoch im Kern. Zahlreiche Blasen in Bruchflächen. Bruch durch plötzlichliches Ein- oder Ausbeulen der gedrückten Deckschicht. Leichte Wellenbildung vorher erkennbar. Sonstiges: Abzugversuche: Bruch nur am Übergang K/D. Zahlreiche Blasen in Bruchflächen. Sehr große Streuung der Ergebnisse. Biegeversuche: Bruch durch plötzlichliches Ausbeulen der gedrückten Deckschicht. Große Streuung des Bruchmoments. Sonstiges: Versagensursache: Haftvermittler nicht wärmebeständig.	Bruch: K = Bruch i. Kern D = Bruch am Übergang Kern/Deckschicht o = Br. i. gedrückter Deckschicht u = Br. i. ungedr. Deckschicht 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20 % 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20 % 3 = Ausbeulen (Ab-lösen) der Deckschicht 4 = Einbeulen (Einbrechen i. Kern) der Deckschicht 5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag *) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat. o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat. *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen LWK = Last-Verformungskurve	
	2	43,44	0,212	K 2	7,66	5599	1,92	149	50,0	194,7	630,8	0 3	15,4			
	3	43,5	0,239	K 2	6,45	6624	1,89	147	49,7	194,9	629,8	0 3	16,2			
	4	44,24	0,213	K 2	7,06	5505	1,91	125	-	-	-	-	-			-
	5	44,24	0,225	K 2	7,70	5897	2,00	131	-	-	-	-	-			-
	6	44,24	0,213	K 2	8,52	5994	2,04	124	-	-	-	-	-			-
	7	44,24	0,213	K 2	8,52	5630	1,93	113	-	-	-	-	-			-
	8	44,24	0,253	K 2	8,60	6450	1,93	119	-	-	-	-	-			-
	9	44,24	0,227	D 2	8,12	-	-	-	-	-	-	-	-			-
	10	43,5	0,228	K 2	7,73	6077	1,95	129	-	49,8	194,8	617,0	0 3/4			15,2
60°C	1	43,5	0,023	D 1	-	8,7	2,00	60	50,1	194,9	482,7	0 3	5,8	Bruch z.T. am Übergang K/D, überwiegend jedoch im Kern. Zahlreiche Blasen in Bruchflächen. Sehr große Streuung der Ergebnisse. Bruch durch plötzlichliches Ausbeulen der gedrückten Deckschicht. Große Streuung des Bruchmoments. Sonstiges: Versagensursache: Haftvermittler nicht wärmebeständig.	Bruch: K = Bruch i. Kern D = Bruch am Übergang Kern/Deckschicht o = Br. i. gedrückter Deckschicht u = Br. i. ungedr. Deckschicht 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20 % 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20 % 3 = Ausbeulen (Ab-lösen) der Deckschicht 4 = Einbeulen (Einbrechen i. Kern) der Deckschicht 5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag *) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat. o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat. *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen LWK = Last-Verformungskurve	
	2	43,60	0,110	D 1	8,35	3617	2,08	67	50,0	195,0	293,3	0 3	4,5			
	3	44,0	0,137	D 1	8,43	4131	2,02	72	49,7	195,0	384,6	0 3	5,1			
	4	44,44	0,144	D 1	8,18	2849	2,03	62	-	-	-	-	-			-
	5	44,44	0,144	D 1	8,18	3471	2,09	61	-	-	-	-	-			-
	6	44,44	0,144	D 1	8,18	4034	2,03	69	-	-	-	-	-			-
	7	44,44	0,149	D 2	7,87	4501	2,09	66	-	-	-	-	-			-
	8	44,44	0,149	D 2	7,87	4258	2,05	68	-	-	-	-	-			-
	9	44,44	0,149	D 2	7,87	-	-	-	-	-	-	-	-			-
	10	44,2	0,113	D 1	8,21	3761	2,05	66	-	49,9	195,0	386,5	0 3			5,1
80°C	1	43,5	0,061	D	6,38	3487	2,11	29	50,0	194,9	290,4	0 3	4,1	Bruch z.T. am Übergang K/D, überwiegend jedoch im Kern. Zahlreiche Blasen in Bruchflächen. Sehr große Streuung der Ergebnisse. Bruch durch plötzlichliches Ausbeulen der gedrückten Deckschicht. Große Streuung der Ergebnisse. Sonstiges: Versagensursache: Haftvermittler nicht wärmebeständig.	Bruch: K = Bruch i. Kern D = Bruch am Übergang Kern/Deckschicht o = Br. i. gedrückter Deckschicht u = Br. i. ungedr. Deckschicht 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20 % 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20 % 3 = Ausbeulen (Ab-lösen) der Deckschicht 4 = Einbeulen (Einbrechen i. Kern) der Deckschicht 5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag *) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat. o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat. *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen LWK = Last-Verformungskurve	
	2	44,0	0,067	D	6,77	4313	2,09	49	49,6	194,9	132,4	0 3	2,1			
	3	44,0	0,067	D	6,77	4363	2,15	56	49,9	194,9	401,2	0 3	6,7			
	4	44,1	0,072	D	6,32	3858	1,95	43	50,0	195,1	408,1	0 3	6,4			
	5	44,1	0,068	D	6,90	3940	2,06	42	-	-	-	-	-			-
	6	44,1	0,068	D	6,90	3021	2,05	43	-	-	-	-	-			-
	7	44,1	0,050	D	8,03	3077	1,99	54	-	-	-	-	-			-
	8	44,1	0,050	D	8,03	4902	2,04	49	-	-	-	-	-			-
	9	44,1	0,050	D	8,03	-	-	-	-	-	-	-	-			-
	10	43,8	0,064	D	6,88	3870	2,06	47	-	49,9	194,9	308,0	0 3			4,8

Temp	S ₁ S ₂ S ₃	γ _k kg/m ³	Zug- u. Druckversuche I Deckschicht										Versuche am Decksch.-Mat										Biegeversuche	Beobachtungen	Erläuterungen
			σ _{zB} N/mm ²	Bruch	σ _{dB} N/mm ²	Bruch	E _{zK} N/mm ²	E _{dK} N/mm ²	t mm	δ _{BD} N/mm ²	E _{GD} N/mm ²	h mm	b mm	M _B Nm	Bruch	f _B mm									
20°C	1	~ 79	0,538	3/K 1		~ 21,84	~ 7400	~ 2,0	~ 166	~ 7400	50,1	195,0	1301	o/1 3	> 26,7										
	2	82,7	0,477	D 1		22,16																			
	3		0,479	D 1		21,66																			
	4	80,8	0,595	K 1		22,69																			
	5		0,562	K 1		21,65																			
	6		0,567	D 1		22,05																			
	7		0,423	K 1		17,12																			
	8	74,7	0,356	D 1		21,52																			
	9																								
	10																								
40°C	1	79,4	0,489	D/K 1		22,02	~ 6100	~ 2,0	~ 129	~ 6100	49,6	195,1	1276	o/4 4	15,6										
	2	53,3	0,196	D 1		19,61																			
	3	76,4	0,270	D 1		23,05																			
	4		0,213	D 1		23,79																			
	5	78,3	0,323	D 1		22,67																			
	6		0,252	D 1		21,38																			
	7																								
	8	76,7																							
	9																								
	10																								
60°C	1	77,1	0,271	D 1		22,10	~ 3800	~ 2,0	~ 66	~ 3800	50,0	195,1	559	o 3	5,4										
	2	13,3	0,076	D		16,66																			
	3	80,2	0,154	D		21,95																			
	4		0,162	D		23,08																			
	5	81,4	0,187	D		22,68																			
	6		0,199	D		19,88																			
	7																								
	8	82,2																							
	9																								
	10																								
80°C	1	81,3	0,155	D		20,85	~ 3900	~ 2,0	~ 47	~ 3900	49,6	194,9	237	o 3	3,9										
	2	1,2	0,11	D		12,7																			
	3																								
	4																								
	5																								
	6																								
	7																								
	8																								
	9																								
	10																								

Temp.	Zug- u. Druckversuche I. Deckschicht										Versuche am Decksch.-Mat.				Biegeversuche					Beobachtungen	Erläuterungen
	γ_k kg/m ³	σ_{zB} N/mm ²	Bruch	σ_{dB} N/mm ²	Bruch	E_{zK} N/mm ²	E_{dK} N/mm ²	t mm	σ_{dB0} N/mm ²	E_{d0} N/mm ²	h mm	b mm	M_B Nm	Bruch	f_B mm						
20°C	1	105	0,890	K 1	(0,724)	30,95	(33,30)	2,0	166	7400	50,4	195,2	>1436	u 5	51,1						
	2	110,6	0,665	D 1		32,94				50,1	194,9	1432	o 3	16,1							
	3	108,7	0,785	K 1		36,60				49,7	194,9	1412	u 5	16,9							
	4	106,9	0,835	K 1		28,07				50,5	194,9	1474	o 4	19,0							
	5	115,1	0,090	D		28,07															
	6	115,0	0,101	D		32,55															
	7	116,1	0,094	D		32,08	27,57														
	8	115,4	0,085	D		29,45															
	9	115,4	0,070	D		32,67															
	10	115,4	0,062	D		31,56	(27,57)	2,0	129	6160	50,1	194,9	1439	o/u 5	17,3						
40°C	1	105	0,890	K 1	(0,724)	30,95	(33,30)	2,0	166	7400	50,4	195,2	>1436	u 5	51,1						
	2	110,6	0,665	D 1		32,94				50,1	194,9	1432	o 3	16,1							
	3	108,7	0,785	K 1		36,60				49,7	194,9	1412	u 5	16,9							
	4	106,9	0,835	K 1		28,07				50,5	194,9	1474	o 4	19,0							
	5	115,1	0,090	D		28,07															
	6	115,0	0,101	D		32,55															
	7	116,1	0,094	D		32,08	27,57														
	8	115,4	0,085	D		29,45															
	9	115,4	0,070	D		32,67															
	10	115,4	0,062	D		31,56	(27,57)	2,0	129	6160	50,1	194,9	1439	o/u 5	17,3						
60°C	1	105	0,890	K 1	(0,724)	30,95	(33,30)	2,0	166	7400	50,4	195,2	>1436	u 5	51,1						
	2	110,6	0,665	D 1		32,94				50,1	194,9	1432	o 3	16,1							
	3	108,7	0,785	K 1		36,60				49,7	194,9	1412	u 5	16,9							
	4	106,9	0,835	K 1		28,07				50,5	194,9	1474	o 4	19,0							
	5	115,1	0,090	D		28,07															
	6	115,0	0,101	D		32,55															
	7	116,1	0,094	D		32,08	27,57														
	8	115,4	0,085	D		29,45															
	9	115,4	0,070	D		32,67															
	10	115,4	0,062	D		31,56	(27,57)	2,0	129	6160	50,1	194,9	1439	o/u 5	17,3						
80°C	1	105	0,890	K 1	(0,724)	30,95	(33,30)	2,0	166	7400	50,4	195,2	>1436	u 5	51,1						
	2	110,6	0,665	D 1		32,94				50,1	194,9	1432	o 3	16,1							
	3	108,7	0,785	K 1		36,60				49,7	194,9	1412	u 5	16,9							
	4	106,9	0,835	K 1		28,07				50,5	194,9	1474	o 4	19,0							
	5	115,1	0,090	D		28,07															
	6	115,0	0,101	D		32,55															
	7	116,1	0,094	D		32,08	27,57														
	8	115,4	0,085	D		29,45															
	9	115,4	0,070	D		32,67															
	10	115,4	0,062	D		31,56	(27,57)	2,0	129	6160	50,1	194,9	1439	o/u 5	17,3						

Bruch:
 K = Bruch im Kern
 D = Bruch am Übergang Kern/Deckschicht
 o = Br. i. o gedrückter Deckschicht
 u = Br. i. unt. gezogenen Deckschicht
 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20%
 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20%
 3 = Ausbeulen (Ab-lösen) der Deckschicht
 4 = Einbeulen (Einbrechen i. d. Kern) der Deckschicht
 5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag.
 +) = Beurteilung nach Fließen d. Deckschichtmat.
 o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat.
 *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen
 LVK = Last-Verformungskurve

Bruch im Kern oder am Übergang K/D. Einzelne Blasen in Bruchflächen. Erhebliche Streuung der Ergebnisse.
 Bruch plötzlich durch Ein- bzw. Ausbeulen der gedrückten oder Reißens der gezogenen Deckschicht.
 Bruch nur am Übergang K/D. Erhebliche Streuung der Ergebnisse.
 Relativ langsames Ausbeulen der gedrückten Deckschicht infolge Versagens des Haftmittlers.
 Bruch nur am Übergang K/D. Haftvermittler versagt. Große Streuung der Ergebnisse.
 Langsames Abheben der gedrückten Deckschicht infolge Versagens des Haftmittlers.
 Haftvermittler "zieht Fäden".

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse										Kernmaterial: PUR - HARTSCHAUM										Füllbauweise	
Blatt: 19										Deckenschichtmaterial: ASBESTZEMENT											
Temp.	Versuchs-Nr.	γ_k	Zug- u. Druckversuche I. Deckenschicht				Versuche am Decksch.-Mat				Biegeversuche						Beobachtungen	Erläuterungen			
			σ_{zB}	Bruch	σ_{dB}	Bruch	E_{zK}	E_{dK}	f	σ_{dB0}	E_{dD}	h	b	M_B	Bruch	f_B					
		kg/m ³	N/mm ²	D 1	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	N/mm ²	mm	mm	mm	Nm	u	mm						
20°C	1	41,9	0,177	D 1		(5,30)	5,5		(15000)	51,4	195,1	872,6	u 5	3,2							
	2	42,1	0,175	D 1		8,95				51,1	195,5	708,3	u 5	1,6							
	3	42,9	0,176	D 2		9,82															
	4	42,9	0,176	D 2		10,12															
	5	42,9	0,176	D 2		9,64															
	6	42,2	0,177	D 1		8,97															
	7	42,2	0,177	D 1		3,64															
	8	42,2	0,177	D 1		6,78															
	9	42,2	0,177	D 1		6,67															
	10	42,2	0,177	D 1		8,23															
40°C	1	42,9	0,176	D 2		10,0															
	2	42,9	0,176	D 2		8,43															
	3	42,9	0,176	D 2		17,2															
	4	42,9	0,176	D 2																	
	5	42,9	0,176	D 2																	
	6	42,9	0,176	D 2																	
	7	42,9	0,176	D 2																	
	8	42,9	0,176	D 2																	
	9	42,9	0,176	D 2																	
	10	42,9	0,176	D 2																	
60°C	1	42,9	0,176	D 2		8,43															
	2	42,9	0,176	D 2		17,2															
	3	42,9	0,176	D 2																	
	4	42,9	0,176	D 2																	
	5	42,9	0,176	D 2																	
	6	42,9	0,176	D 2																	
	7	42,9	0,176	D 2																	
	8	42,9	0,176	D 2																	
	9	42,9	0,176	D 2																	
	10	42,9	0,176	D 2																	
80°C	1	42,9	0,176	D 2																	
	2	42,9	0,176	D 2																	
	3	42,9	0,176	D 2																	
	4	42,9	0,176	D 2																	
	5	42,9	0,176	D 2																	
	6	42,9	0,176	D 2																	
	7	42,9	0,176	D 2																	
	8	42,9	0,176	D 2																	
	9	42,9	0,176	D 2																	
	10	42,9	0,176	D 2																	

$\gamma_{k, \text{Soll}} = 40$ kg/m³
 $f_{\text{Soll}} = 6$ mm

Beobachtungen:
 Bruch am Übergang K/D. Erhebliche Streuung der Ergebnisse. Einzelne Blasen in Bruchflächen.
 Biegeversuche: Bruch durch plötzlichliches Reißen der gezogenen Deckschicht.
 $l_f = 0,75$ m
 Sonstiges: E_{dD} nach Firmenprospekt

Abzugversuche:
 Da bei diesen Biegeversuchen und weiteren Testversuchen stets die gezogene Deckschicht zu Bruch ging und in keinem Falle Deckschichtmittlern erreicht werden konnte, wurde die Versuchsreihe abgebrochen.
 $l_f = 0,50$ m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Sonstiges:
 Abzugversuche:
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Sonstiges:
 Abzugversuche:
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Sonstiges:
 Abzugversuche:
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Sonstiges:
 Abzugversuche:
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Sonstiges:
 Abzugversuche:
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Sonstiges:
 Abzugversuche:
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Sonstiges:
 Abzugversuche:
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Sonstiges:
 Abzugversuche:
 Sonstiges:

*) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat.
 o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat.
 *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen
 LVK = Last-Verformungskurve

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse										Kernmaterial: PUR - HARTSCHAUM										Deckenschichtmaterial: ASBESTZEMENT									
Blatt: 20										70 kg/m ³										f _{soil} = 6 mm									
Temp.	γ _k	Zug- u. Druckversuche I. Deckenschicht		Versuche am Decksch.-Mat.		Biegeversuche				Beobachtungen	Erläuterungen																		
		σ _{zB}	Bruch	σ _{dB}	Bruch	E _{zK}	E _{dK}	t	σ _{dB0}			E _{d0}	h	b	M _B	Bruch	f _B												
	kg/m ³	N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²		mm	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	mm	Nm	mm	mm													
20°C	1	76,9	D 2	22,51	(17,65)	5,5	50,5	195,2	577,8	575,8	50,4	194,9	573,9	u 5	1,6		Abzugversuche: Bruch am Übergang K/D. Zahlreiche Blasen in Bruchflächen. Große Streuung der Ergebnisse. Biegeversuche: Bruch durch plötzliches Reißen der gezogenen Deckenschicht. l _f = 0,75 m Sonstiges: E _d nach Firmenprospekt.												
	2	74,5	D 2	17,22																									
	3	75,1	D 2	18,71																									
	4	76,8	D 2	25,36																									
	5	77,8	D 2	25,93																									
	6	77,8	D 2	22,13																									
	7	76,9	D 2	22,51	(17,65)	5,5	50,5	195,2	577,8	575,8	50,4	194,9	573,9	u 5	1,6														
	8	74,5	D 2	17,22																									
	9	75,1	D 2	18,71																									
	10	76,8	D 2	25,36																									
40°C	1	73,0	D 2	16,12													Abzugversuche: Da bei diesen Biegeversuchen und weiteren Testversuchen stets die gezogene Deckenschicht zu Bruch ging und in keinem Falle Deckschichtmittlern erreicht werden konnte, wurde die Versuchsstreife abgebrochen. Biegeversuche: l _f = 0,50 m Sonstiges:												
	2	74,5	D 2	17,22																									
	3	75,1	D 2	18,71																									
	4	76,8	D 2	25,36																									
	5	77,8	D 2	25,93																									
	6	77,8	D 2	22,13																									
	7	76,9	D 2	22,51	(17,65)	5,5	50,5	195,2	577,8	575,8	50,4	194,9	573,9	u 5	1,6														
	8	74,5	D 2	17,22																									
	9	75,1	D 2	18,71																									
	10	76,8	D 2	25,36																									
60°C	1	73,0	D 2	16,12													Abzugversuche: l _f = m Biegeversuche: l _f = m Sonstiges:												
	2	74,5	D 2	17,22																									
	3	75,1	D 2	18,71																									
	4	76,8	D 2	25,36																									
	5	77,8	D 2	25,93																									
	6	77,8	D 2	22,13																									
	7	76,9	D 2	22,51	(17,65)	5,5	50,5	195,2	577,8	575,8	50,4	194,9	573,9	u 5	1,6														
	8	74,5	D 2	17,22																									
	9	75,1	D 2	18,71																									
	10	76,8	D 2	25,36																									
80°C	1	73,0	D 2	16,12													Abzugversuche: l _f = m Biegeversuche: l _f = m Sonstiges:												
	2	74,5	D 2	17,22																									
	3	75,1	D 2	18,71																									
	4	76,8	D 2	25,36																									
	5	77,8	D 2	25,93																									
	6	77,8	D 2	22,13																									
	7	76,9	D 2	22,51	(17,65)	5,5	50,5	195,2	577,8	575,8	50,4	194,9	573,9	u 5	1,6														
	8	74,5	D 2	17,22																									
	9	75,1	D 2	18,71																									
	10	76,8	D 2	25,36																									

BAM - Vh 02205

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Blatt: 20

Kernmaterial: PUR - HARTSCHAUM

Deckenschichtmaterial: ASBESTZEMENT

70 kg/m³

f_{soil} = 6 mm

Abzugversuche: Bruch am Übergang K/D. Zahlreiche Blasen in Bruchflächen. Große Streuung der Ergebnisse.

Biegeversuche: Bruch durch plötzliches Reißen der gezogenen Deckenschicht. l_f = 0,75 m

Sonstiges: E_d nach Firmenprospekt.

20°C

40°C

60°C

80°C

Abzugversuche: Da bei diesen Biegeversuchen und weiteren Testversuchen stets die gezogene Deckenschicht zu Bruch ging und in keinem Falle Deckschichtmittlern erreicht werden konnte, wurde die Versuchsstreife abgebrochen.

Biegeversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

70°C

80°C

90°C

100°C

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

90°C

100°C

110°C

120°C

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

110°C

120°C

130°C

140°C

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

120°C

130°C

140°C

150°C

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

130°C

140°C

150°C

160°C

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

140°C

150°C

160°C

170°C

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

150°C

160°C

170°C

180°C

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

160°C

170°C

180°C

190°C

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

170°C

180°C

190°C

200°C

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

180°C

190°C

200°C

210°C

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

190°C

200°C

210°C

220°C

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

200°C

210°C

220°C

230°C

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

Sonstiges:

Abzugversuche: l_f = m

210°C

220°C

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Blatt: 21

Kernmaterial: PUR - HARTSCHAUM
 Deckschichtmaterial: ASBESTZEMENT

$\gamma_{k, \text{Soll}} = 100 \text{ kg/m}^3$
 $f_{\text{Soll}} = 6 \text{ mm}$

Füllbauweise

Temp.

Temp.	Kategorie	γ_k kg/m ³	Zug- u. Druckversuche I Deckschicht		Versuche am Decksch.-Mat.		Biegeversuche					Beobachtungen	Erläuterungen		
			σ_{zB} N/mm ²	Bruch	σ_{dB} N/mm ²	Bruch	E_{zK} N/mm ²	E_{dK} N/mm ²	t mm	σ_{dB0} N/mm ²	E_{d0} N/mm ²			h mm	b mm
20°C	1	99,0	0,459	D 2	31,94						50,4	194,8	716,1	u 5	2,1
	2	98,6	0,698	D 2	31,49						50,6	194,9	866,2	u 5	1,7
	3	99,8	0,737	D 2	31,73						51,2	195,1	703,4	u 5	2,2
	4														
	5														
	6														
	7														
	8														
	9														
	10														
	I	99,0	0,645	D 2	32,43	(25,72)	5,5				59,7	194,9	762,2	u 5	2,0
	I	97,3	0,523	D 2	21,1						0,8	0,1	13,9		13,2
40°C	1														
	2														
	3														
	4														
	5														
	6														
	7														
	8														
	9														
	10														
60°C	1														
	2														
	3														
	4														
	5														
	6														
	7														
	8														
	9														
	10														
80°C	1														
	2														
	3														
	4														
	5														
	6														
	7														
	8														
	9														
	10														

Abzugversuche: Da bei diesen Biegeversuchen und weiteren Testversuchen stets die gezogene Deckschicht zu Bruch ging und in keinem Falle Deckschichtknittern erreicht werden konnte, wurde die Versuchsreihe abgebrochen.

Biegeversuche: $l_f = 0,75 \text{ m}$

Sonstiges: Ed nach Firmenprospekt

Abzugversuche:

Biegeversuche: $l_f = \text{m}$

Sonstiges:

Abzugversuche:

Biegeversuche: $l_f = \text{m}$

Sonstiges:

Abzugversuche:

Biegeversuche: $l_f = \text{m}$

Sonstiges:

Abzugversuche:

Biegeversuche: $l_f = \text{m}$

Sonstiges:

Abzugversuche:

Biegeversuche: $l_f = \text{m}$

Sonstiges:

Bruch:
 K = Bruch i. Kern
 D = Bruch am Übergang Kern/Deckschicht
 o = Br. i. o.gedrückter Deckschicht
 u = Br. i. unt.gezogen. Deckschicht
 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20%
 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20%
 3 = Ausbeulen (Ablosen) der Deckschicht
 4 = Einbeulen (Einbrechen i.d. Kern) der Deckschicht
 5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag

*) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat.
 o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat.
 *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen
 LVK - Last-Verformungskurve

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Blatt: 23

Kernmaterial: PUR - HARTSCHAUM
 Deckschichtmaterial: SAN (Iaran S)

γ_k soll = 80 kg/m³
 $f_{soll} = 2,5$ mm

Füllbauweise

Temp.	Versuch	γ_k kg/m ³	Zug- u. Druckversuche ⊥ Deckschicht		Versuche am Decksch.-Mat.			Biegeversuche				Beobachtungen	Erläuterungen				
			σ_{zB} N/mm ²	Bruch	σ_{dB} N/mm ²	Bruch	E_{zK} N/mm ²	E_{dK} N/mm ²	f mm	σ_{dB0} N/mm ²	E_{dD} N/mm ²			h mm	b mm	M_B Nm	Bruch
20°C	1														Abzugversuche: Da alle durchgeführten Biegeversuche stets wegen zu großer Durchbiegung abgebrochen werden mußten und nie ein Deckschichtversagen beobachtet wurde, ist die Versuchsreihe abgebrochen worden. Biegeversuche: $f_f = 0,50$ m Sonstiges:	Bruch: K = Bruch i. Kern D = Bruch am Übergang Kern/Deckschicht o = Br. i. o.gedrückter Deckschicht u = Br. i. unt.gezogen. Deckschicht 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20 % 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20 % 3 = Ausbeulen (Ab-lösen) der Deckschicht 4 = Einbeulen (Einbrechen i.d.Kern) der Deckschicht 5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag *) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat. o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat. *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen LVK = Last-Verformungskurve	
	2																
	3																
	4																
	5																
	6																
	7																
	8																
	9																
	10																
40°C	1														Abzugversuche: Biegeversuche: $f_f =$ m Sonstiges:		
	2																
	3																
	4																
	5																
	6																
	7																
	8																
	9																
	10																
60°C	1														Abzugversuche: Biegeversuche: $f_f =$ m Sonstiges:		
	2																
	3																
	4																
	5																
	6																
	7																
	8																
	9																
	10																
80°C	1														Abzugversuche: Biegeversuche: $f_f =$ m Sonstiges:		
	2																
	3																
	4																
	5																
	6																
	7																
	8																
	9																
	10																

Temp.		Zusammenstellung der Versuchsergebnisse										Blatt: 24		Kernmaterial: PUR - HARTSCHAUM		Deckschichtmaterial: GF - UP		40 kg/m ³		Hüllbauweise	
		Zug- u. Druckversuche I. Deckschicht					Versuche am Decksch.-Mat					Biegeversuche					Beobachtungen		Erläuterungen		
γ _k	γ _k	σ _{zB}	Bruch	σ _{dB}	Bruch	E _{zK}	E _{dK}	t	σ _{dB0}	E _{d0}	h	b	M _B	Bruch	f _B						
kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	Nm	o 3	mm						
20°C																					
1	39,8	0,529	K	23,8	—	23,8	—	—	—	—	51,4	194,9	1014	o 3	17,0						
2	39,8	0,539	K	24,8	—	24,8	—	—	—	—	52,3	194,9	1168	o 3	20,2						
3	39,8	0,551	K	25,2	—	25,2	—	—	—	—	52,4	194,6	1139	o 3	19,0						
4	39,8	0,529	K	25,2	—	25,2	—	—	—	—											
5	39,1	0,541	K	23,3	—	23,3	—	—	—	—											
6	39,1	0,512	K	23,3	—	23,3	—	—	—	—											
7	40,5	0,503	K	23,1	—	23,1	—	—	—	—											
8	40,5	0,504	K	22,1	—	22,1	—	—	—	—											
9	40,5	0,504	K	22,1	—	22,1	—	—	—	—											
10	40,5	0,504	K	22,1	—	22,1	—	—	—	—											
1	39,8	0,526	K	23,6	—	23,6	(19,0)	≈ 2,0	≈ 166	≈ 7400	52,0	194,8	1108	o 3	18,7						
2	39,8	0,539	K	22,4	—	22,4	—	—	—	—	51,4	195,0	813	o 3	7,4						
3	40,9	0,194	K	20,8	—	20,8	—	—	—	—	51,8	195,0	771	o 3	6,8						
4	40,3	0,409	K	22,8	—	22,8	—	—	—	—	52,0	195,0	896	o 3	7,8						
5	40,3	0,260	K	22,6	—	22,6	15,7	—	—	—											
6	40,3	0,224	K	23,1	—	23,1	—	—	—	—											
7	40,5	0,224	K	23,1	—	23,1	—	—	—	—											
8	40,5	0,224	K	23,1	—	23,1	—	—	—	—											
9	40,5	0,224	K	23,1	—	23,1	—	—	—	—											
10	40,5	0,224	K	23,1	—	23,1	—	—	—	—											
1	40,6	0,305	K	22,3	—	22,3	(15,7)	≈ 2,0	≈ 129	≈ 6100	51,7	195,0	827	o 3	7,3						
2	39,6	0,267	K	14,3	—	14,3	—	—	—	—	50,7	195,1	483	o 4	6,4						
3	39,6	0,434	K	20,3	—	20,3	—	—	—	—	51,0	195,1	519	o 3	6,4						
4	40,5	0,362	K	18,9	—	18,9	—	—	—	—	50,6	195,0	529	o 4	6,4						
5	40,5	0,057	K	—	—	—	—	—	—	—											
6	40,5	0,287	K	18,3	—	18,3	—	—	—	—											
7	40,5	0,287	K	18,3	—	18,3	—	—	—	—											
8	39,8	0,287	K	18,3	—	18,3	—	—	—	—											
9	39,8	0,287	K	18,3	—	18,3	—	—	—	—											
10	39,8	0,287	K	18,3	—	18,3	—	—	—	—											
1	40,0	0,285	K	17,9	—	17,9	(7,4)	≈ 2,0	≈ 66	≈ 3800	50,8	195,1	513	o 3/4	6,4						
2	39,6	0,270	K	14,9	—	14,9	—	—	—	—	48,9	195,0	495	o 3	7,1						
3	39,6	0,394	K	15,6	—	15,6	—	—	—	—	49,1	194,9	515	o 4	8,1						
4	40,0	0,387	K	17,1	—	17,1	—	—	—	—	49,1	195,0	473	o 3	8,1						
5	40,0	0,371	K	17,2	—	17,2	—	—	—	—											
6	40,0	0,354	K	16,9	—	16,9	—	—	—	—											
7	39,7	0,347	K	16,4	—	16,4	(14,3)	≈ 2,0	≈ 47	≈ 3900	49,0	195,0	404	o 3/4	7,8						
8	39,4	0,347	K	16,4	—	16,4	—	—	—	—	49,0	195,0	404	o 3/4	7,8						
9	39,4	0,347	K	16,4	—	16,4	—	—	—	—	49,0	195,0	404	o 3/4	7,8						
10	39,4	0,347	K	16,4	—	16,4	—	—	—	—	49,0	195,0	404	o 3/4	7,8						

Bruch:
K = Bruch i. Kern
0 = Bruch am Übergang Kern/Deckschicht
o = Br. i. ogedrückter Deckschicht
u = Br. i. unt.gezogen. Deckschicht
1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20%
2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20%
3 = Ausbeulen (Ab-lösen) i. der Deckschicht
4 = Einbeulen (Einbrechen i. d. Kern) der Deckschicht
5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag

+)= Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat.
o)= Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat.
*)= Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen

LVK = Last-Verformungskurve

Beobachtungen:
Abzugversuche: Bruch nur im Kern. Geringe Streuung der Ergebnisse.
Biegeversuche: Bruch durch plötzliches Ablösen der gedrückten Deckschicht. Vorher Knistern und leichte Wellenbildung.
Sonstiges:
Abzugversuche: Bruch nur im Kern. Große Streuung der Zugfestigkeiten.
Biegeversuche: Bruch durch plötzliches Ablösen der gedrückten Deckschicht.
Sonstiges:
Abzugversuche: Wie bei t = 40° C
Biegeversuche: Bruch durch plötzliches Einbrechen (neben Holzkeil) oder Ablösen der gedrückten Deckschicht.
Sonstiges:
Abzugversuche: Bruch nur im Kern. Weniger große Streuung der Ergebnisse.
Biegeversuche: Bruch durch plötzliches Einbrechen oder Ablösen der gedrückten Deckschicht.
Sonstiges:

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse										Kernmaterial: PUR - HARTSCHAUM		$\lambda_{k, \text{Soll}} = 70 \text{ kg/m}^3$		Hüllbauweise		
Blatt: 25										Deckenschichtmaterial: GF - UP		$f_{\text{Soll}} = 2 \text{ mm}$				
Temp.	ρ_k kg/m ³	Zug - u. Druckversuche I. Deckschicht				Versuche am Decksch.-Mat.				Biegeversuche				Beobachtungen	Erläuterungen	
		σ_{zB} N/mm ²	Bruch	σ_{dB} N/mm ²	Bruch	E_{zK} N/mm ²	E_{dK} N/mm ²	f mm	σ_{dB0} N/mm ²	F_{d0} N/mm ²	h mm	b mm	M_B Nm			Bruch
20°C	1	0,655	K	64,2	—	—	—	—	—	49,0	194,9	1279	0	3	32,0	Abzugversuche: Bruch im Kern oder am Übergang K/D. Sehr große Streuung der Ergebnisse. Biegeversuche: Bruch durch Abplatzen der gedrückten Deckschicht auf ganzer Probenlänge mit Knall. Sonstiges: Bei Biegeversuch 3 war im Kern ein ca. 7 cm langer Ris parallel zur Deckschicht. Abzugversuche: Bruch überwiegend im Kern. Sehr große Streuung der Zugfestigkeit. Biegeversuche: Bruch durch plötzliches Ablösen der gedrückten Deckschicht. Sonstiges: Bei Biegeversuchen 1 und 4: Versagen der Einspannung (Klebung). Abzugversuche: Bruch nur im Kern. 5 von 9 Proben durch große Fehlstellen ausgefallen. Biegeversuche: Sämtliche Biegeproben hatten im Kern größere Fehlstellen (Risse). Versuchswerte nicht repräsentativ! Sonstiges: Die ganze Platte war von äußerlich nicht erkennbaren Kernrissen durchzogen. Abzugversuche: Bruch nur im Kern. Relativ geringe Streuung. Biegeversuche: Bruch durch plötzliches Ausbeulen der gedrückten Deckschicht. Sonstiges: Bei Biegeversuch 1: Versagen der Einspannung (Klebung).
	2	0,785	K	52,5	—	—	—	—	—	49,2	194,7	1318	0	3	32,5	
	3	0,873	K	60,5	—	—	—	—	—	49,0	194,9	900	0	3	20,0	
	4	0,238	D	42,2	—	—	—	—	—	49,0	194,9	965	0	3	22,3	
	5	0,408	D	48,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	6	0,267	D	37,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	8	0,198	D	36,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	9	74,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
40°C	1	0,515	D/K	48,7	(44,7)	—	—	—	—	49,1	194,9	1115	0	3	27,0	
	2	0,709	K	48,5	—	—	—	—	—	49,2	194,8	834	0	3	25,1	
	3	0,879	K	50,9	—	—	—	—	—	49,8	195,0	1253	0	3	14,5	
	4	0,857	K	47,3	—	—	—	—	—	49,5	195,2	552	0	3	5,0	
	5	0,120	D	(21,6)	—	—	—	—	—	49,2	195,2	859	0	3	10,1	
	6	0,888	K	47,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	8	77,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
60°C	1	0,691	K	48,6	(41,4)	—	—	—	—	49,5	195,1	875	0	3	9,4	
	2	0,729	K	44,1	—	—	—	—	—	50,1	195,0	(827)	0	3	11,5	
	3	0,689	K	37,7	—	—	—	—	—	49,1	195,1	(371)	0	3	1,4	
	4	—	—	—	—	—	—	—	—	51,3	194,6	(768)	0	3	12,2	
	5	—	—	—	—	—	—	—	—	50,9	195,1	(821)	0	3	10,2	
	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	9	0,722	K	36,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
80°C	1	0,713	K	39,5	(35,3)	—	—	—	—	50,4	195,0	(672)	—	—	(76,8)	
	2	0,650	K	38,7	—	—	—	—	—	50,3	194,9	—	—	—	—	
	3	0,711	K	39,4	—	—	—	—	—	51,2	194,8	958	0	3	14,5	
	4	0,712	K	39,7	—	—	—	—	—	51,4	194,9	874	0	3	12,2	
	5	0,702	K	41,0	—	—	—	—	—	50,6	194,9	885	0	3	13,9	
	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	8	0,739	K	42,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	9	82,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
11	0,703	K	40,3	(36,5)	—	—	—	—	51,1	194,9	905	0	3	13,5		
12	0,650	K	41,1	—	—	—	—	—	50,8	194,9	5,1	—	—	8,8		

B A M - Vn 02205										Kernmaterial: PUR - H A R T S C H A U M										$\lambda_{k,soil} = 100 \text{ kg/m}^3$									
Zusammenstellung der Versuchsergebnisse										Blatt: 26										Deckschichtmaterial: M A T T E G G 163 V D 2007									
Temp.	Temp. t_{amb}	λ_k	Zug- u. Druckversuche I Deckschicht				Versuche am Decksch.-Mat.				Biegeversuche						Beobachtungen	Erläuterungen											
			σ_{zB}	Bruch	σ_{dB}	Bruch	E_{zK}	Bruch	E_{dK}	t	σ_{dB0}	E_{d0}	h	b	M_B	Bruch			f_B										
		kg/m ³	N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²	N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²	mm	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	Nm		mm									
20°C	1		0,574	K 1			16,89																						
	2		0,504	K 1			14,68																						
	3		0,465	K 1			14,96																						
	4		0,485	D 1			15,29																						
	5		0,377	D 1			13,80																						
	6		0,278	D 2			12,64																						
	7			0,356	D 1			13,42																					
	8			0,287	D 1			14,86																					
	9																												
	10																												
40°C	1	107	0,416	D/K 1			14,82	(13,42)																					
	2		0,358				8,4																						
	3																												
	4																												
	5																												
	6																												
	7																												
	8																												
	9																												
	10																												
60°C	1																												
	2																												
	3																												
	4																												
	5																												
	6																												
	7																												
	8																												
	9																												
	10																												
80°C	1																												
	2																												
	3																												
	4																												
	5																												
	6																												
	7																												
	8																												
	9																												
	10																												

Bruch:
 K = Bruch i. Kern
 D = Bruch am Übergang kern/Deckschicht
 o = Br. i. gedrückter Deckschicht
 u = Br. i. ungedr. Deckschicht
 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20 %
 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20 %
 3 = Ausbeulen (Ab-lösen) der Deckschicht
 4 = Einbeulen (Einbrechen i. d. Kern) der Deckschicht
 5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag.

+) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat.
 o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat.
 *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen
 LVK = Last-Verformungskurve

Abzugversuche:
 Bei den Biegeversuchen konnten selbst bei extrem großen Probenverformungen kein Deckschichtkern erreicht werden.
 Biegeversuche:
 $l_f = 0,50 \text{ m}$
 Gebrochen.
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 $l_f = \text{ m}$
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 $l_f = \text{ m}$
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 $l_f = \text{ m}$
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 $l_f = \text{ m}$
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 $l_f = \text{ m}$
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 $l_f = \text{ m}$
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 $l_f = \text{ m}$
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 $l_f = \text{ m}$
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 $l_f = \text{ m}$
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 $l_f = \text{ m}$
 Sonstiges:

Temp.	ε ₅	γ _k kg/m ³	Zug- u. Druckversuche I. Deckschicht			Versuche am Decksch.-Mat.			Biegeversuche				Beobachtungen	Erläuterungen		
			σ _{zB} N/mm ²	Bruch	σ _{dB} N/mm ²	Bruch	E _{zK} N/mm ²	E _{dK} N/mm ²	f mm	σ _{fBD} N/mm ²	E _{dD} N/mm ²	h mm			b mm	M _B Nm
20°C	1		0,543	D 1											Bei den Biegeversuchen konnte selbst bei extrem großen Probenverformungen kein Deckschichtmittlern erreicht werden. Die Versuchsreihe wurde abgebrochen. Sonstiges:	Bruch: K = Bruch i. Kern D = Bruch am Übergang Kern/Deckschicht o = Br. i. gedrückter Deckschicht u = Br. i. ungedr. Deckschicht 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20 % 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20 % 3 = Ausbeulen (Ab-lösen) der Deckschicht 4 = Einbeulen (Einbrechen i.d. Kern) der Deckschicht 5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag
	2		0,497	D 1												
	3		0,507	D 2												
	4		0,582	D 1												
	5		0,658	D 1												
	6		0,550	K 1												
	7			0,700	K 1		26,74									
	8			0,686	K 1		21,16									
	9															
	10															
40°C	1	106	0,585	D/K 1			25,39								Abzugversuche: Biegeversuche: l _f = m Sonstiges:	*) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat. o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat. *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen LVK = Last-Verformungskurve
	2															
	3															
	4															
	5															
	6															
	7															
	8															
	9															
	10															
60°C	1														Abzugversuche: Biegeversuche: l _f = m Sonstiges:	*) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat. o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat. *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen LVK = Last-Verformungskurve
	2															
	3															
	4															
	5															
	6															
	7															
	8															
	9															
	10															
80°C	1														Abzugversuche: Biegeversuche: l _f = m Sonstiges:	*) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat. o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat. *) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen LVK = Last-Verformungskurve
	2															
	3															
	4															
	5															
	6															
	7															
	8															
	9															
	10															

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse										Kernmaterial: U P - L E I C H T B E T O N (Blähglas 10/30) $\gamma_{k, \text{Soll}} = 260 \text{ kg/m}^3$										Füllbauweise									
Blatt: 28										Deckenschichtmaterial: A L U M I N I U M A l M g S i O, 5 F 22										$f_{\text{Soll}} = 0,8 \text{ mm}$									
Temp.	Versuchs-Nr.	Zug- u. Druckversuche I. Deckschicht				Versuche am Decksch.-Mat.				Biegeversuche				Beobachtungen	Erläuterungen														
		σ_{zK}	Bruch	σ_{dB}	Bruch	E_{zK}	E_{dK}	f	σ_{dB0}	E_{d0}	h	b	M_B			Bruch	f_B												
	γ_k	N/mm ²	—	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	Nm	—	mm															
20°C	1	258	K	0,336	—	367,8	0,95	70728	148,2	194,4	>4119	o	>4,1	Bruch im Kern.	Kein Bruch erreicht. Versuchsabbruch nach Fließerscheinungen in den Deckschichten und Rissebildung im Kern. Deckschicht-E-Modul im Biegeversuch nach DIN 50151 bestimmt. Bruch überwiegend im Kern. Sehr große Streuung der Ergebnisse. Fließerscheinungen in den Deckschichten, Rissebildung im Kern. Ausbeulen nur im Versuch 2, sonst Abbruch.														
	2	258	K	0,300	—	391,1	0,95	69986	148,2	195,3	>4013	o	>4,0																
	3	255	K	0,322	—	258,6	0,96	68273	148,3	194,7	>4050	o	>4,7																
	4	255	K	0,271	—	—	0,96	70056	—	—	—	—	—																
	5	250	K	0,276	—	241,6	0,96	70122	—	—	—	—	—																
	6	254	K	0,301	K	314,8	0,96	69033	148,2	194,8	>4061	o	>4,6																
	7	254	K	0,108	D	24,4	0,7	1,3	0,7	0,2	0,2	0	0																
	8	261	K	0,276	K	199,7	—	—	148,2	195,0	>3985	o	>5,2																
	9	271	K	0,289	K	173,5	—	—	150,3	195,1	3629	+	3																
	10	271	K	0,273	K	177,6	136,1	—	148,3	195,1	>4036	o	>4,7																
40°C	1	262	K	0,247	—	162,7	—	—	148,9	195,1	>3953	o/a	3	>4,4	Fließerscheinungen in den Deckschichten, Rissebildung im Kern. Ausbeulen nur im Versuch 2, sonst Abbruch.														
	2	288	K	0,173	—	92,9	—	—	148,5	194,3	3301	+	3	1,4															
	3	288	K	0,268	—	121,4	—	—	148,5	194,2	3199	+	3	2,2															
	4	297	K	0,284	—	137,2	—	—	148,9	194,3	3537	+	3	3,4															
	5	297	K	0,271	—	127,5	59,2	—	—	—	—	—	—	—															
	6	254	K	0,150	—	88,7	—	—	—	—	—	—	—	—															
	7	280	K	0,230	K	113,6	(59,2)	—	148,6	194,3	3346	+	3	2,3															
	8	280	K	0,189	D	81,4	—	—	149,9	193,9	3040	+	3	2,5															
	9	263	K	0,207	—	85,7	—	—	149,7	193,8	2987	+	3	2,1															
	10	275	K	0,221	—	96,3	—	—	149,6	194,0	3216	+	3	2,9															
80°C	1	275	K	0,204	—	96,5	51,6	—	—	—	—	—	—	—	Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat. Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen LVK-Last-Verformungskurve														
	2	240	K	0,186	—	78,2	—	—	—	—	—	—	—																
	3	259	K	0,201	—	87,6	51,6	—	149,7	193,9	3081	+	3	2,5															
	4	259	K	0,186	—	96,5	—	—	149,7	193,9	3081	+	3	2,5															
	5	259	K	0,186	—	96,5	—	—	149,7	193,9	3081	+	3	2,5															
	6	259	K	0,186	—	96,5	—	—	149,7	193,9	3081	+	3	2,5															
	7	259	K	0,186	—	96,5	—	—	149,7	193,9	3081	+	3	2,5															
	8	259	K	0,186	—	96,5	—	—	149,7	193,9	3081	+	3	2,5															
	9	259	K	0,186	—	96,5	—	—	149,7	193,9	3081	+	3	2,5															
	10	259	K	0,186	—	96,5	—	—	149,7	193,9	3081	+	3	2,5															

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Temp.	Kernmaterial	Deckenschichtmaterial	Zug - u Druckversuche I. Deckschicht		Versuche am Decksch.-Mat.		Biegeversuche					Beobachtungen	Erläuterungen		
			σ _{zB}	Bruch	σ _{DB}	Bruch	E _{zK.}	E _{DK}	t	σ _{DBD}	E _{dD}			h	b
	γ _k		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	mm	Nm		mm
20°C	1	256	0,369	K	287,4	1,95	74,5	4100	149,8	194,5	2315	0	5	7,2	<p>Bruch: K = Bruch i. Kern D = Bruch am Übergang Kern/Deckschicht o = Br i. ogedrückter Deckschicht u = Br i. untgezogen Deckschicht</p> <p>1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20% 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20% 3 = Ausbeulen (Ab-lösen) der Deckschicht 4 = Einbeulen (Einbrechen i.d. Kern) der Deckschicht 5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag</p> <p>*) = Beulerscheinung nach Fließen d. Deckschichtmat.</p> <p>o) = Versuchsabbruch nach längerem Fließen d. Deckschichtmat.</p> <p>*) = Versuchsabbruch wegen zu großer Durchbiegungen</p> <p>LWK = Last-Verformungskurve</p>
	2	242	0,377	D	292,4	1,83	78,2	4149	152,4	195,2	3708	u	5	7,4	
	3	273	0,343	D	347,1	1,80	66,5	4007	153,7	195,0	3846	u	5	6,8	
	4	280	0,411	D	319,6	1,83	32,0	5200	151,2	195,9	3245	u	5	6,4	
	5	281	0,439	K	485,9	1,52	80,0	4987							
	6	283	0,437	K	444,8	1,95	69,9	4107							
	7	285	0,474	K	541,4	1,83	47,1	4998							
	8	290	0,491	K	389,2	1,65	73,7	4755							
	9	290	0,422	K	442,9	1,85	-	4806							
	10	277	0,418	K	394,7	1,82	65,2	4245	151,8	195,1	3434	u	5	7,0	
40°C	1	260	0,334	D	191,7	1,88	74,0	4098	152,9	195,2	2952	o	3	9,0	
	2	242	0,298	K	124,5	1,80	49,2	3578	151,5	195,2	3718	u	5	9,7	
	3	247	0,291	K	137,9	1,70	79,6	4979	154,4	195,3	3581	o	3	10,1	
	4	255	0,307	K	153,9	1,80	52,6	3570	151,7	194,9	3522	u	5	10,2	
	5	263	0,343	K	166,7	1,97	63,6	3666							
	6	273	0,391	K	213,4	1,93	60,7	3335							
	7	269	0,395	K	229,9	1,90	59,2	3926							
	8	277	0,421	K	302,4	2,02	55,7	4290							
	9	273	0,419	K	270,0	1,73	71,9	4044							
	10	262	0,351	K	198,9	1,72	32,1	3739	152,6	195,2	3443	o/u	3/5	10,0	
60°C	1	224	0,277	K	64,5	1,95	33,8	2272	151,5	195,3	1652	o	3	7,8	
	2	262	0,292	K	108,6	1,90	18,0	1904	154,7	195,3	2056	o	3	8,4	
	3	275	0,366	K	130,5	1,75	15,8	1820	154,3	195,2	1918	o	3	7,4	
	4	265	0,348	K	140,1	1,57	14,4	1575	152,2	193,7	2035	o	3	7,8	
	5	265	0,328	K	135,8	1,32	22,1	2059							
	6	261	0,340	K	133,8	1,70	24,8	2240							
	7	268	0,323	K	149,2	1,67	27,9	2317							
	8	267	0,345	K	178,0	1,60	35,3	2708							
	9	266	0,359	K	183,4	1,77	27,4	2157							
	10	263	0,331	K	136,0	1,70	32,9	2428	153,2	194,9	1910	o	3	7,9	
80°C	1	242	0,212	K	40,6	1,57	13,4	1942	150,0	194,6	1204	o	5	6,0	
	2	267	0,236	K	68,1	1,50	9,7	1945	150,0	194,7	1203	o	3/5	5,8	
	3	273	0,278	K	96,4	1,63	10,9	1941	150,0	195,0	1182	o	3/5	6,5	
	4	268	0,277	K	86,3	1,23	10,3	1555	149,0	195,1	1122	o	3/5	6,7	
	5	262	0,284	K	82,3	1,68	10,2	2117							
	6	270	0,278	K	93,2	1,55	13,1	2131							
	7	277	0,300	K	106,3	1,68	8,1	1633							
	8	281	0,324	K	114,3	1,47	14,5	2251							
	9	280	0,314	K	119,9	1,70	17,0	2213							
	10	269	0,278	K	89,8	1,59	11,8	1982	149,7	194,8	1178	o	3/5	6,3	

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Blatt: 30

Kernmaterial: U P - L E I C H T B E T O N (Blähglas 10/30) $\gamma_{k,soil} = 260 \text{ kg/m}^3$
 Deckschichtmaterial: A S B E S T Z E M E N T $f_{Soll} = 5 \text{ mm}$

Füllbauweise

Temp.	γ _k	Zug- u. Druckversuche I Deckschicht			Versuche am Decksch.-Mat.			Biegeversuche			Beobachtungen	Erläuterungen			
		σ _{zB}	Bruch	σ _{dB}	Bruch	E _{zK}	E _{dK}	t	σ _{dBD}	E _{dD}			h	b	M _B
	kg/m ³	N/mm ²	—	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	Nm	—	mm	
20°C	1	238	K	0,270	—	—	—	—	—	152,2	194,3	2865	u 5	0,3	
	2	250	K	0,309	—	—	—	—	—	151,1	194,5	2893	u 5	—	
	3	260	K	0,367	—	—	—	—	—	150,6	195,0	2708	u 5	0,6	
	4	266	K	0,388	—	—	—	—	—	152,5	194,6	3718	u 5	1,0	
	5	266	K	0,355	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	6	256	K	0,338	—	—	—	—	—	151,6	194,6	3046	u 5	0,6	
	7	257	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
	8	257	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
	9	257	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
	10	257	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
40°C	1														
	2														
	3														
	4														
	5														
	6														
	7														
	8														
	9														
	10														
60°C	1														
	2														
	3														
	4														
	5														
	6														
	7														
	8														
	9														
	10														
80°C	1														
	2														
	3														
	4														
	5														
	6														
	7														
	8														
	9														
	10														

Bruch:
 K = Bruch i. Kern
 0 = Bruch am Übergang Kern/Deckschicht
 o = Br. i.o.gedrückter Deckschicht
 u = Br. i.unt.gezogen. Deckschicht
 1 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche < 20 %
 2 = Fehlstellen (z.B. Blasen) i. Bruchfläche > 20 %
 3 = Ausbeulen (Ab-lösen) der Deckschicht
 4 = Einbeulen (Einbrechen i.d.Kern) der Deckschicht
 5 = Bruch der Deckschicht durch Werkstoffversag.

Abzugversuche:
 Da bei diesen und allen weiteren Biegeversuchen stets die gezogene Deckschicht zu Bruch ging und in keinem Falle Deckschichtmittlern erreicht werden konnte, wurde die Versuchsreihe abgebrochen.
 Biegeversuche:
 l_f = 0,75 m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Abzugversuche:
 Biegeversuche:
 l_f = m
 Sonstiges:

Temp.	Zug - u. Druckversuche I. Deckschicht										Versuche am Decksch.-Mat				Biegeversuche				Beobachtungen	Depotverfahren
	γ_k kg/m ³	σ_{zB}	Bruch	σ_{dB}	Bruch	E_{zK}	E_{dK}	t	δ_{dB}	E_{dD}	h	b	Mg	Bruch	f_B					
20°C	1	265	0,282	D	2,4,7						149,3	194,6	853	u 5	4,9					
	2	272	0,421	K	343,2	237,0					150,0	195,0	1001	u 5	6,6					
	3	271	0,425	D	285,1	250,8					149,8	195,1	883	u 5	7,2					
	4	272	0,418	K	341,0	214,5					149,2	195,0	893	u 5	7,2					
	5	267	0,390	D	258,2															
	6	269	0,387	D/K	292,4	234,1					149,6	194,9	907	u 5	6,5					
	7	269	0,387	D	167,7	7,8					151,4	195,0	1011	u 5	6,5					
	8	261	0,379	K	200,4						149,5	195,3	999	u 5	6,0					
	9	279	0,415	D	246,1						150,3	195,0	1287	u 5	8,5					
	10	286	0,459	D	238,7						149,5	195,1	(1823)	o 3/5	(8,3)					
40°C	1	286	0,434	D	235,9															
	2	284	0,483	K	241,2															
	3	280	0,388	D	268,1															
	4	275	0,367	K	301,1															
	5	275	0,399	D/K	234,3	(= 155)					150,2	195,1	1099	u 5	6,3					
	6	254	0,266	D	97,8						150,6	195,2	1033	o 3/5	9,1					
	7	250	0,244	D	99,5						150,7	194,9	961	o 3/5	7,2					
	8	263	0,303	D	133,4	119,6					151,0	194,9	990	o 3/5	7,6					
	9	268	0,355	K	147,2	107,4					151,0	194,9	1073	u 5	9,7					
	10	277	0,336	K	173,5															
60°C	1	280	0,323	K	208,7	67,2														
	2	278	0,353	D	183,9															
	3	275	0,357	K	173,3															
	4	270	0,325	D/K	153,2	98,1					150,6	195,0	1034	o 3/5	8,4					
	5	274	0,341	D	24,5	28,0					150,5	194,8	739	o 3/5	8,3					
	6	284	0,184	K	35,3						150,5	194,9	665	o 3/5	6,8					
	7	281	0,229	K	51,1						150,7	194,4	650	o 3/5	5,5					
	8	250	0,249	K	63,2						150,0	194,9	621	o 3/5	8,0					
	9	257	0,244	K	76,7															
	10	260	0,268	K	84,2															
80°C	1	262	0,282	K	97,3															
	2	271	0,305	K	124,8															
	3	273	0,298	K	127,1															
	4	260	0,271	K	114,7															
	5	265	0,259	K	86,0	(= 79)					150,4	194,7	669	o 3/5	7,2					
	6	260	0,271	K	38,0						150,2	194,3	7,5	o 3/5	17,9					

