

# ***Reversible* Steinverklebung**

Betrachtung unvernetzender Methacrylate  
im Kontext einer restauratorischen Klebung

## **Anhang**

## 8 Anhang

### 8.1 Strukturformeln zum Chemismus von MMA

Ergänzend zum Abschnitt 3 *Naturwissenschaftliche Grundlagen der Methylmethacrylate* erfolgt die Darstellung des für die vorliegende Arbeit relevanten Chemismus in Form von chemischen Strukturformeln.

#### Synthese der Monomere (→Abschnitt 3.1)

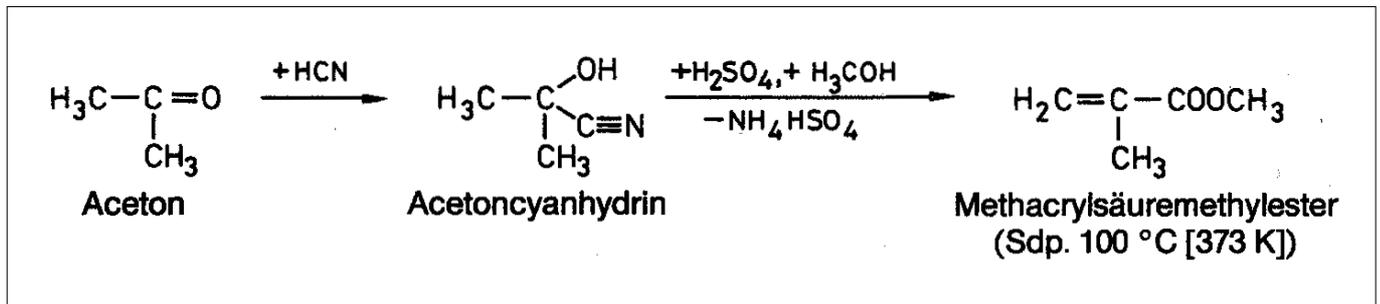


Abb. A01: Hydrolyse und Dehydratisierung von Acetoncyan mit Schwefelsäure zu Methacrylsäure und gleichzeitige Veresterung mit Methanol (Quelle: BEYER/WALTER (2004); S. 256)

#### Polymerisation von MMA (→Abschnitt 3.2)

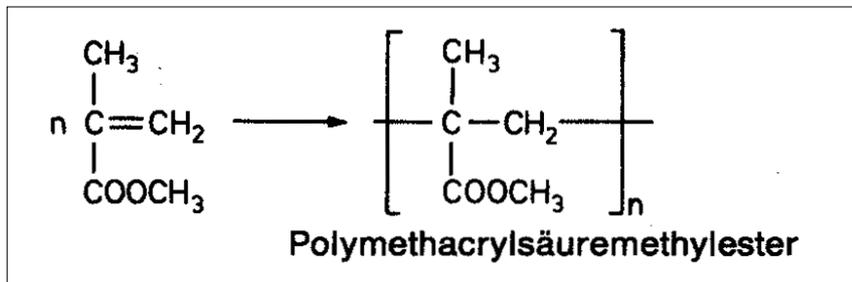


Abb. A02: Methacrylsäuremethylester → Polymethacrylsäuremethylester (Quelle: BEYER/WALTER (2004); S. 256)

#### Radikalkettenpolymerisation (→Abschnitt 3.2)

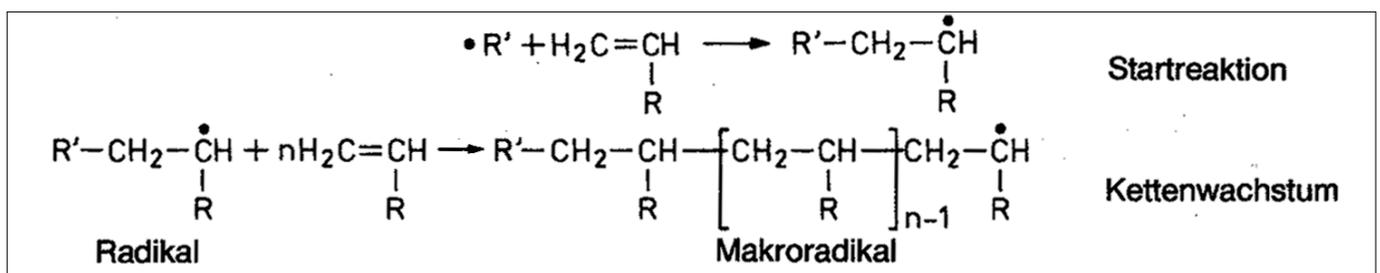


Abb. A03: Mechanismus der Radikalkettenpolymerisation (Quelle: BEYER/WALTER (2004); S. 80)

## Übertragungsregler (→Abschnitt 3.2.1.5)

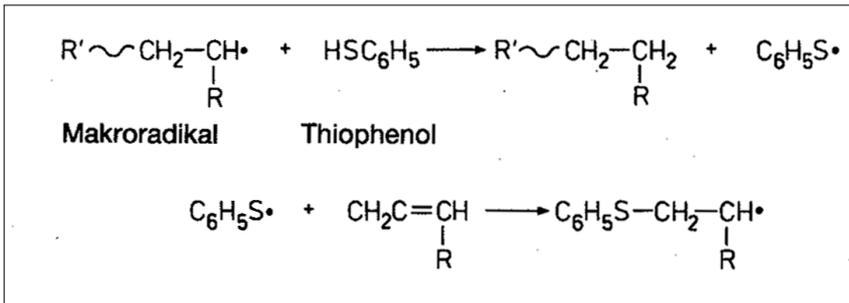


Abb. A04: Wirkungsweise der Übertragungsregler bei der Kettenübertragung am Beispiel des Thiophenols (Quelle: BEYER/WALTER (2004); S. 80)

## Abbruchreaktionen (→Abschnitt 3.2.1.2)

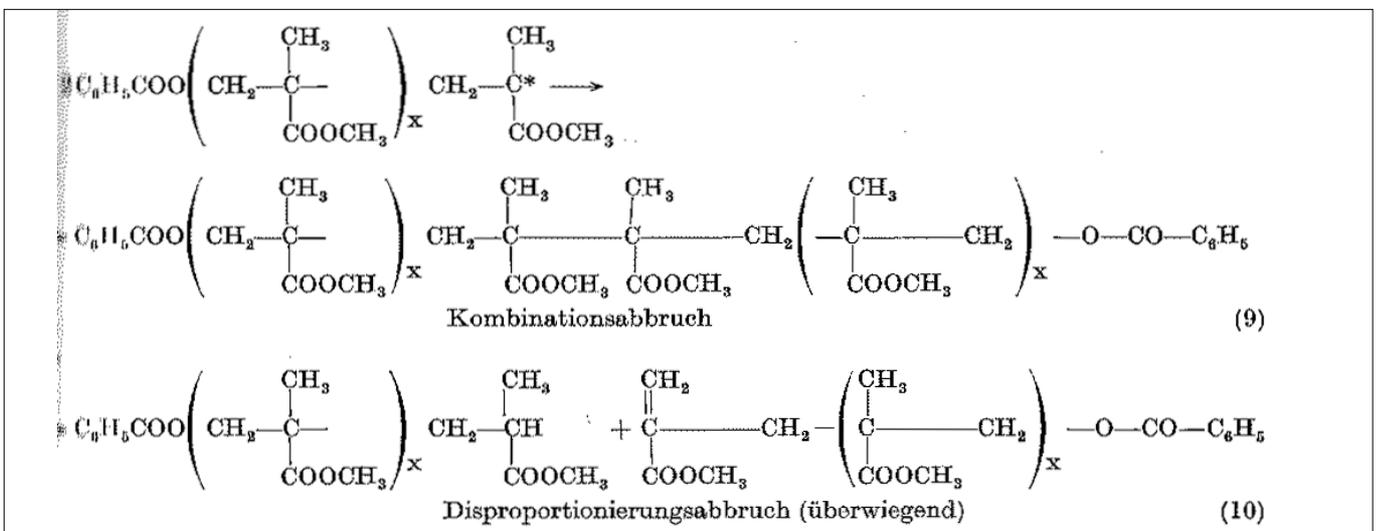


Abb. A05: chemische Umsetzungen bei den Abbruchreaktionen (Quelle: TROMMSDORFF (1975); S. 27)

## 8.2 Ergänzende Informationen zu den Untersuchungsmethoden

Ergänzende Informationen, Abbildungen und Messprotokolle zu den Untersuchungsmethoden  
Abschnitt 5 *Empirischer Teil*:

### 8.2.1 Messung des Temperaturverlaufs während der Polymerisation

#### Versuchsaufbau (→Abschnitt 5.3.1.1)

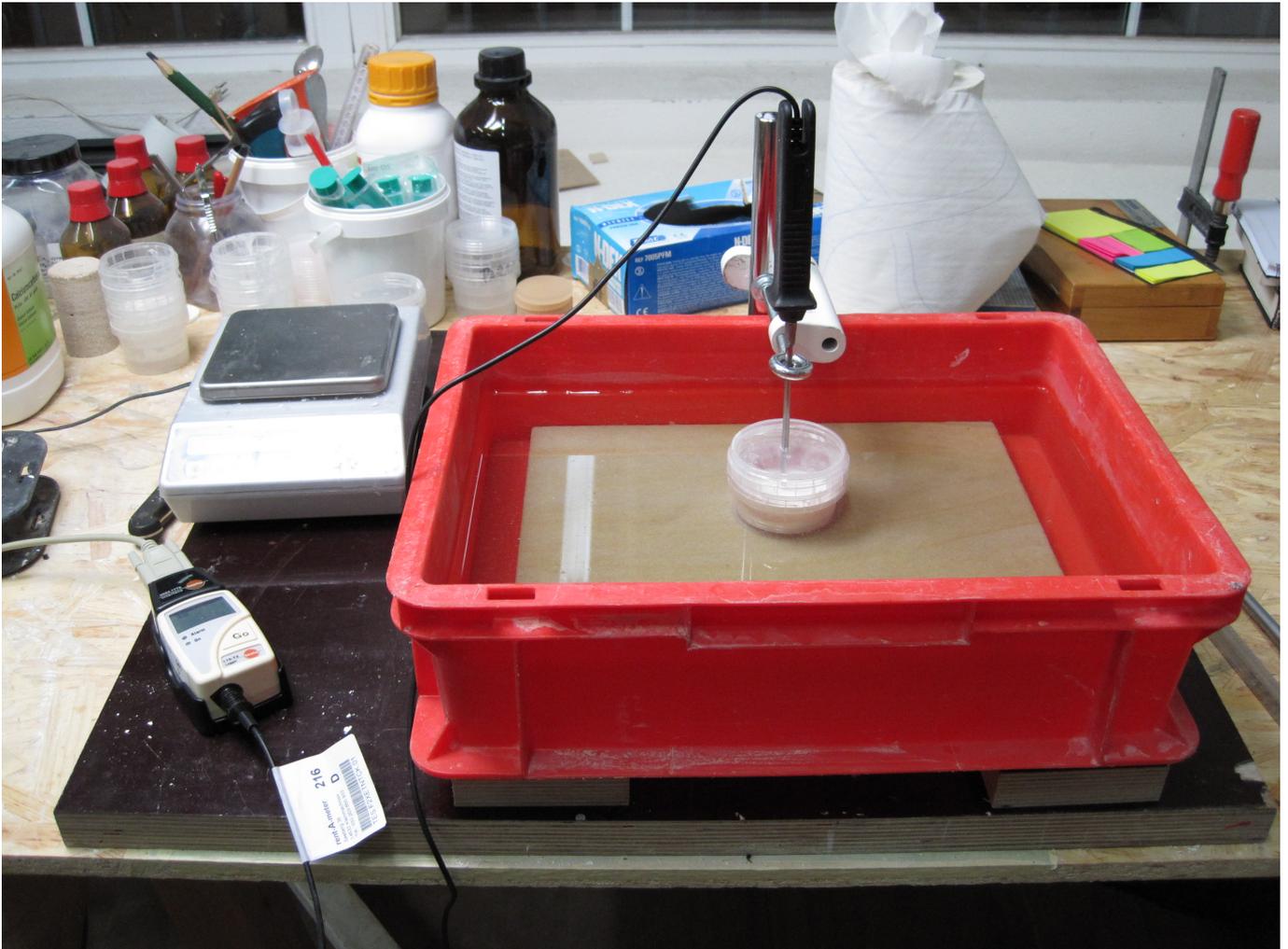


Abb. A06: Versuchsaufbau zur Messung des Temperaturverlaufs der Polymerisation

**Messprotokoll (→Abschnitt 5.4.1.1)**

## Protokoll der Messung des Temperaturverlaufs während der Polymerisation

Minuten	K01	K01/T	K02	K02/T
00,00	22,00	21,50	20,40	19,60
01,00	23,20	22,80	20,40	19,70
02,00	24,50	23,90	20,40	19,70
03,00	26,00	25,10	20,30	19,70
04,00	27,60	26,40	20,30	20,10
05,00	29,40	27,80	20,20	20,40
06,00	31,30	29,30	20,20	20,90
07,00	33,20	31,00	20,20	21,20
08,00	35,20	32,70	20,10	21,60
09,00	37,40	34,40	20,10	21,90
10,00	39,70	36,20	20,00	22,30
11,00	42,10	38,20	20,00	22,70
12,00	44,60	40,20	19,90	23,00
13,00	47,60	41,60	19,90	23,40
14,00	51,00	42,90	19,80	23,70
15,00	55,40	43,60	19,80	24,10
16,00	60,60	44,00	19,80	24,40
17,00	64,20	43,60	19,70	24,80
18,00	64,40	43,10	19,70	25,20
19,00	63,10	42,40	19,70	25,50
20,00	61,80	41,60	19,70	25,90
21,00	60,60	40,90	19,60	26,20
22,00	59,40	40,10	19,70	26,60
23,00	58,10	39,40	19,70	26,90
24,00	56,40	38,70	19,70	27,40
25,00	54,50	38,10	19,80	27,80
26,00	52,40	37,50	19,80	28,10
27,00	50,30	36,80	19,90	28,60
28,00	48,20	36,00	20,00	28,90
29,00	46,10	35,20	20,10	29,40
30,00	44,20	34,40	20,30	29,90
31,00	42,40	33,50	20,50	30,30
32,00	40,70	32,50	20,70	30,90
33,00	39,10	31,70	21,00	31,50
34,00	37,60	30,90	21,30	32,10
35,00	36,10	30,10	21,60	32,70
36,00	34,90	29,40	22,00	33,40
37,00	33,70	28,70	22,30	34,30
38,00	32,60	28,00	22,80	35,10
39,00	31,60	27,40	23,10	36,20
40,00	30,60	26,80	23,50	37,60
41,00	29,80	26,30	23,90	39,20
42,00	28,90	25,80	24,30	41,20
43,00	28,20	25,30	24,70	44,10
44,00	27,50	24,90	25,10	49,00
45,00	26,90	24,50	25,50	60,40
46,00	26,30	24,20	25,90	77,10
47,00	25,80	23,80	26,40	81,30
48,00	25,30	23,50	26,80	80,30

Minuten	K01	K01/T	K02	K02/T
49,00	24,90	23,20	27,20	79,20
50,00		23,00	27,70	77,70
51,00		22,70	28,20	75,80
52,00			28,80	74,00
53,00			29,30	72,20
54,00			30,00	70,00
55,00			30,80	67,40
56,00			31,70	64,60
57,00			32,70	61,70
58,00			34,00	58,80
59,00			35,50	56,00
60,00			37,90	53,30
61,00			41,60	50,70
62,00			50,10	48,40
63,00			87,90	45,90
64,00			97,00	44,20
65,00			96,00	42,30
66,00			94,40	40,60
67,00			92,40	39,00
68,00			90,50	37,50
69,00			88,40	36,00
70,00			86,10	34,80
71,00			83,10	33,60
72,00			79,80	32,50
73,00			76,30	31,50
74,00			72,70	30,50
75,00			69,20	29,60
76,00			65,60	28,80
77,00			62,20	28,10
78,00			58,90	27,40
79,00			55,90	26,80
80,00			53,00	26,10
81,00			50,30	25,60
82,00			47,80	25,10
83,00			45,50	24,60
84,00			43,40	24,20
85,00			41,50	23,80
86,00			39,70	23,50
87,00			38,00	23,10
88,00			36,50	
89,00			35,00	
90,00			33,80	
91,00			32,60	

## 8.2.2 Messung der Löslichkeit in Abhängigkeit der Zeit

### Versuchsaufbau (→Abschnitt 5.3.2)



Abb. A07: Versuchsaufbau zu Ermittlung der Löslichkeit in Abhängigkeit der Zeit

### Messprotokoll (→Abschnitt 5.4.2)

Messprotokoll: Untersuchung der Löslichkeit in Abhängigkeit von der Zeit					
Entnahme der Probekörper (min)	K01 (g)	K01/T (g)		K02 (g)	K02/T (g)
005	9,28	9,01	8,82	9,25	9,25
010	9,23	8,52	8,54	9,19	9,12
015	9,17	8,01	8,25	9,15	9,06
020	9,12	7,47	7,87	9,11	9,02
025	8,98	6,88	7,52	9,08	8,96
030	8,94	6,38	7,07	9,07	8,93
045	8,88	5,08	5,94	9,02	8,84
060	8,55	4,15	4,83	9,00	8,73
090	7,98		3,09	8,94	8,47
120	7,23			8,89	8,29
150	6,28			8,78	8,01
180	5,53			8,70	7,78
	K01	K01/T		K02	K02/T
Lösemittel	Aceton	Aceton	Aceton	Aceton	Aceton
Temp./rel. Luftft.	20 °C	20 °C	21 °C	20 °C	20 °C
Gew. Probekörper	6,67 g	6,64 g	6,28 g	6,62 g	6,62 g
Gew. Installation	9,27 g	9,24 g	8,88 g	9,20 g	9,18 g
Gew. Aufhängung	2,60 g	2,60 g	2,60 g	2,58 g	2,56 g

## 8.2.3 Festigkeitsmessungen

## Übersicht über die Ergebnisse der Festigkeitsmessungen (→Abschnitt 5.4.3)

Gegenüberstellung der Messergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen									
Prüfung	Zugfestigkeitsprüfung		biaxiale Biegezugprüfung				Haftzugprüfung (F <sub>maxZug</sub> )		
Kennwert [Einheit]	Zugspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul [kN/mm <sup>2</sup> ]	Biegezugspannung [N/mm <sup>2</sup> ]		E-Modul [kN/mm <sup>2</sup> ]		Haftzugspannung [N/mm <sup>2</sup> ]		
Prüftemperatur	23°C		22°C				22°C		
Bemerkung	Klebstoff	Klebstoff	Klebstoff	Klebstoff "getempert"	Klebstoff	Klebstoff "getempert"	Klebstoff im Verbund mit Edelstahl- stempeln	Klebstoff im Verbund mit Naga- Sandstein	Klebstoff im Verbund mit Naga- Sandstein "getempert"
K01 P01	21,51	3,8	34,08	31,11	3,28	2,66	1,35	>1,19	>1,57
K01 P02	24,19	3,8	24,61	31,60	1,85	2,58	1,09	>0,52	>1,56
K01 P03	24,00	3,9	36,48	41,04	2,97	3,14	1,33	>0,64	>1,57
K01 P04	24,31	4,0	33,29	32,83	2,68	2,47	1,16	>0,52	>1,82
K01 P05	25,22	4,0	24,93	†2,49	1,78	†1,33		>0,55	>1,13
Mittelwert	23,85	3,9	30,68	34,15	2,51	2,71	1,23	>0,68	>1,53
K01/T P01	25,84	3,7	39,68	37,26	2,86	1,85	0,83	>1,58	>1,45
K01/T P02	25,43	3,7	30,83	34,12	2,38	2,37	0,89	>1,39	>1,32
K01/T P03	21,66	3,7	35,50	33,62	2,48	2,14	0,80	†0,48	>1,75
K01/T P04	19,75	3,4	39,18	†23,55	2,70	†2,22	†1,68	>1,19	†0,80
K01/T P05	27,75	3,5	38,69	36,34	2,42	2,20		>1,90	>1,70
Mittelwert	24,09	3,6	36,18	35,34	2,57	2,14	0,84	>1,52	>1,56
K02 P01	17,81	3,4	33,08	51,17	2,46	2,42	†0,22	†0,18	0,34
K02 P02	20,93	3,5	†8,48	23,19	†1,93	2,30	1,20	0,69	0,47
K02 P03	22,49	3,7	41,55	60,24	2,36	3,61	1,27	0,58	0,44
K02 P04	17,63	3,6	44,15	23,56	2,77	3,17	1,00	0,46	0,32
K02 P05	24,10	4,0		60,00		3,75			0,58
Mittelwert	20,59	3,64	39,59	43,63	2,53	3,05	1,16	0,58	0,43
K02/T P01	†	†	11,21	23,15	1,98	3,19	1,17	0,40	1,20
K02/T P02	11,67	3,5	24,64	19,09	1,67	2,80	0,96	†1,29	1,06
K02/T P03	†	†	18,81	20,66	2,81	3,44	0,94	0,46	0,53
K02/T P04	9,82	3,5	11,97	22,84	1,94	2,65		0,75	0,59
K02/T P05	8,72	3,5	39,70	21,79	2,70	2,57		0,70	1,01
Mittelwert	10,07	3,5	21,27	21,51	2,22	2,93	1,02	0,64	0,88

### 8.2.3.1 Messung der biaxialen Biegezugfestigkeit an der FH POTSDAM

#### Beschreibung des Messverfahrens der biaxialen Biegezugprüfung (→Abschnitt 5.3.3.1)

Als biaxiale Biegezugfestigkeit bezeichnet man die maximal erreichte Biegespannung, die auf Prüfkörperscheiben (in der Regel Bohrkernscheiben) mit Hilfe von ringförmigen Stempeln unterschiedlicher Durchmesser ausgeübt wird. Die Prüfkörper sollten im Idealfall einen Durchmesser von 50 mm und eine Dicke von 5 mm haben, können jedoch auch kleiner sein. Wichtig bei Veränderungen im Durchmesser der Probe ist das Beibehalten des Verhältnisses von Durchmesser zu Dicke von 10/1. Durch die eingeleitete Last auf den Probekörper entstehen Zugspannungen, die bei Überlastung zum Bruch führen. Das *typische* Bruchbild für diese Kraftereinwirkung besteht aus radialstrahlenförmig angeordneten Rissen.<sup>1</sup>

Die für den Versuch notwendige Apparatur besteht aus einer beweglichen Traverse, von der die Kraftereinwirkung ausgeht. Ein Wegaufnehmer, der im Standzylinder des Gerätes integriert ist, misst die Dehnung der Scheibe bis zum Bruch. Am Computer werden die Messwerte protokolliert und tabellarisch sowie in einem Diagramm (Spannungs-Dehnungs-Linie) wiedergegeben.

Die Berechnung der biaxialen Biegezugfestigkeit erfolgt mit folgender Gleichung:

$$\sigma_{bz} = 3 F / 4\pi h^2 [ 2 (1+\nu) \ln (a/b) + (1-\nu) (a^2-b^2 / R^2) ]$$

$\sigma_{bz}$ :	biaxiale Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
F:	Prüflast (maximale Biegespannung) [N]
h:	Dicke des Prüfkörpers [mm]
$\nu$ :	Querkontraktionszahl
a:	Radius des unteren Belastungsringes [mm]
b:	Radius des oberen Belastungsringes [mm]
R:	Radius des Prüfkörpers [mm]

Neben der biaxialen Biegezugfestigkeit lässt sich außerdem der statische E-Modul berechnen. Es handelt sich hierbei um eine Kerngröße für die lastbezogene Verformbarkeit von Baustoffen, die durch das Verhältnis von Belastung zu elastischer Verformung gekennzeichnet ist. Je niedriger der Wert des statischen E-Moduls ist, desto elastischer ist das Material. Der statische E-Modul berechnet sich aus folgender Formel:<sup>2</sup>

<sup>1</sup> KOZUB (unveröffentlichtes Skript)

<sup>2</sup> zitiert nach KOZUB: Naturwissenschaftliche Untersuchungen in der Steinkonservierung - vgl. WITTMANN, F. H.; PRIMM, P.: Mesures de l'effet consolidant d'un produit de traitement de la pierre, Vth International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lausanne, 25.-27.09.1985, S. 788-789

$$E = 1,5 F/f_0 h^3 (1-\nu^2) [b^2 \ln(b/a) + (a^2-b^2)(3+\nu)]/2(1+\nu)]$$

- E: statischer E-Modul [kN/mm<sup>2</sup>]  
 F: Prüflast (maximale Biegespannung) [N]  
 f<sub>0</sub>: Durchbiegung in Plattenmitte [mm]  
 h: Dicke des Prüfkörpers [mm]  
 ν: Querdehnungszahl  
 a: Radius des unterlagernden Belastungsringes [mm]  
 b: Radius des auflagernden Belastungsringes [mm]

Die Formel für die Berechnung des E-Moduls basiert auf der Arbeit von WITTMANN und PRIMM. Es muss davon ausgegangen werden, dass ein Fehler in der Berechnung vorliegt und die durch diese Formel errechneten Werte anschließend noch durch den Faktor Pi [π] geteilt werden müssen.<sup>3</sup>

### Prüfvorrichtung und Probekörperaufnahme für die Messung der biaxialen Biegezugfestigkeit an der FH POTSDAM (→Abschnitt 5.3.3.1)



Abb. A08: Prüfvorrichtung zur Messung der biaxialen Biegezugfestigkeit an der FH POTSDAM (Typ: ZWICK ROELL Z010)



Abb. A09: Probekörperaufnahme für die biaxiale Biegezugprüfung

<sup>3</sup> Hinweis von Dr. P. KOZUB, Werkstattleiter Steinkonservierung FH Potsdam

**Messprotokoll: biaxiale Biegezugfestigkeit und stat. E-Modul (Randbiegung)****Parametertabelle:**

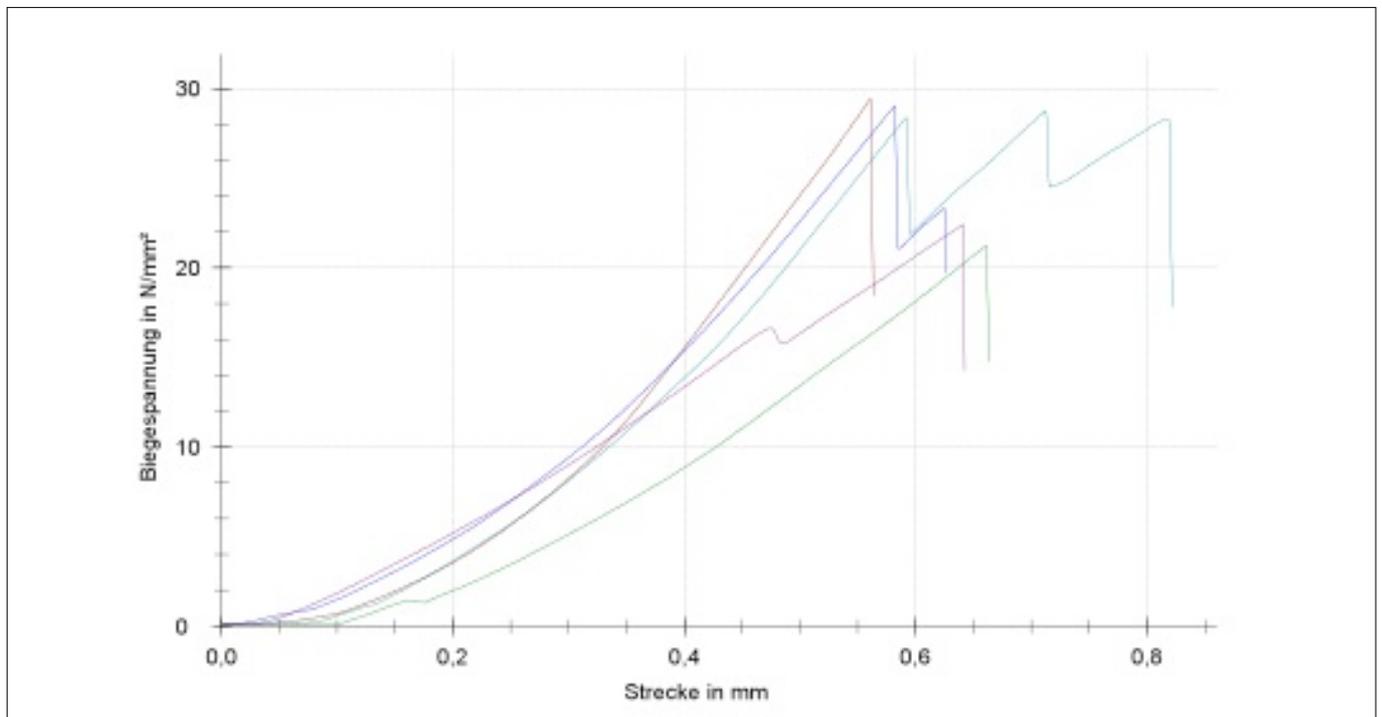
Prüfer: Benjamin Reinhardt  
 Material: Kunstharz + Calciumcarbonat  
 Art und Bezeichnung: K01 (PMMA)  
 Belastungsgeschwindigkeit: 1 mm/min

Lastringradius r1: 06,66 mm  
 Stützringradius r2: 20,00 mm

Poisson-Zahl  $\mu$ : 00,25

**Ergebnisse:**

Nr.	r3 mm	h mm	$F_{\max}$ N	$L_{F\max}$ mm	$t_{F\max}$ s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
1	25,00	5,00	1123,88	0,56	34,78	34,08	10,32
2	25,00	5,00	0811,55	0,66	40,86	24,61	05,82
3	25,00	4,80	1108,46	0,58	36,10	36,48	09,32
4	25,00	5,00	1097,76	0,71	43,94	33,29	08,43
5	25,00	5,10	0855,20	0,64	39,64	24,93	05,59

**Seriengrafik:****Statistik:**

Serie	r3 mm	h mm	$F_{\max}$ N	$L_{F\max}$ mm	$t_{F\max}$ s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
n = 5	25,00	4,98	999,37	0,63	39,06	30,68	07,89
x	00,00	0,11	152,60	0,06	03,69	05,52	02,11
s	00,00	2,20	015,27	9,68	09,45	17,99	26,73

**Messprotokoll: biaxiale Biegezugfestigkeit und stat. E-Modul (Randbiegung)****Parametertabelle:**

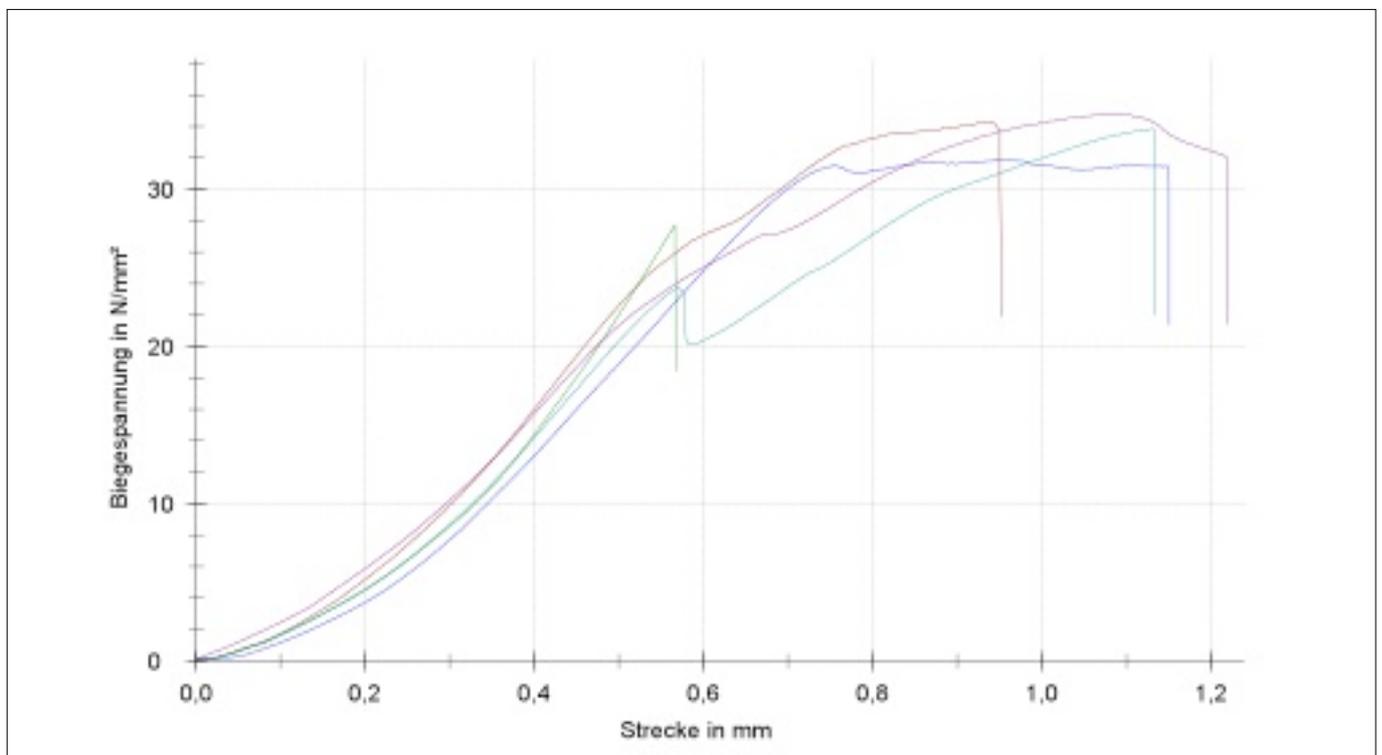
Prüfer: Benjamin Reinhardt  
 Material: Kunstharz + Calciumcarbonat  
 Art und Bezeichnung: K01/T (PMMA + Übertragungsregler)  
 Belastungsgeschwindigkeit: 1 mm/min

Lastringradius r1: 06,66 mm  
 Stützringradius r2: 20,00 mm

Poisson-Zahl  $\mu$ : 00,25

**Ergebnisse:**

Nr.	r3 mm	h mm	$F_{\max}$ N	$L_{F\max}$ mm	$t_{F\max}$ s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
1	24,95	5,10	1308,47	0,94	57,38	39,68	9,00
2	25,00	5,10	1057,73	0,57	35,12	30,83	7,48
3	24,95	5,10	1217,30	0,96	58,64	35,50	7,79
4	24,95	5,10	1291,20	1,13	69,02	39,18	8,47
5	24,95	5,10	1326,53	1,08	66,18	38,69	7,61

**Seriengrafik:****Statistik:**

Serie	r3 mm	h mm	$F_{\max}$ N	$L_{F\max}$ mm	$t_{F\max}$ s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
n = 5							
x	24,96	5,10	1240,25	00,94	57,27	36,78	8,07
s	00,02	0,00	0110,15	00,22	13,32	03,70	0,65
v	00,09	0,00	0008,88	23,71	23,26	10,07	8,00

**Messprotokoll: biaxiale Biegezugfestigkeit und stat. E-Modul (Randbiegung)****Parametertabelle:**

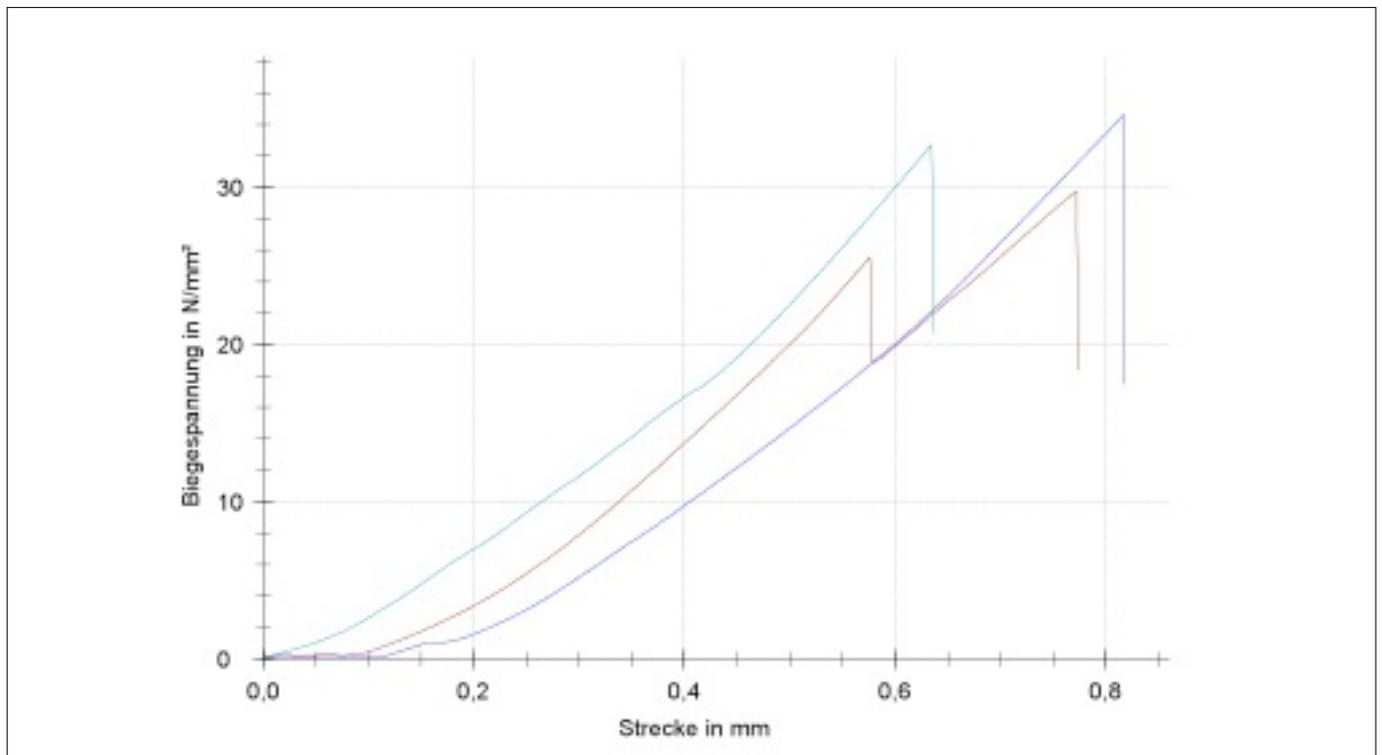
Prüfer: Benjamin Reinhardt  
 Material: Kunstharz + Calciumcarbonat  
 Art und Bezeichnung: K02 (PMMA)

Belastungsgeschwindigkeit: 1 mm/min

Lastringradius r1 : 06,66 mm  
 Stützringradius r2 : 20,00 mm  
 Poisson-Zahl  $\mu$  : 00,25

**Ergebnisse:**

Nr.	r3 mm	h mm	F <sub>max</sub> N	L <sub>Fmax</sub> mm	t <sub>Fmax</sub> s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
1	25,00	5,40	1272,20	0,77	47,52	33,08	7,73
2†	25,00	5,30	0314,25	0,18	11,78	08,48	6,05
3	25,00	5,20	1481,70	0,82	50,22	41,55	7,40
4	25,00	4,90	1398,23	0,63	39,24	44,15	8,69

**Seriengrafik:****Statistik:**

Serie	r3 mm	h mm	F <sub>max</sub> N	L <sub>Fmax</sub> mm	t <sub>Fmax</sub> s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
n = 3	25,00	5,17	1384,04	00,74	45,66	39,59	7,94
x	00,00	0,25	0105,47	00,10	05,72	05,79	0,67
s	00,00	4,87	0007,62	12,86	12,53	14,62	8,45

**Messprotokoll: biaxiale Biegezugfestigkeit und stat. E-Modul (Randbiegung)****Parametertabelle:**

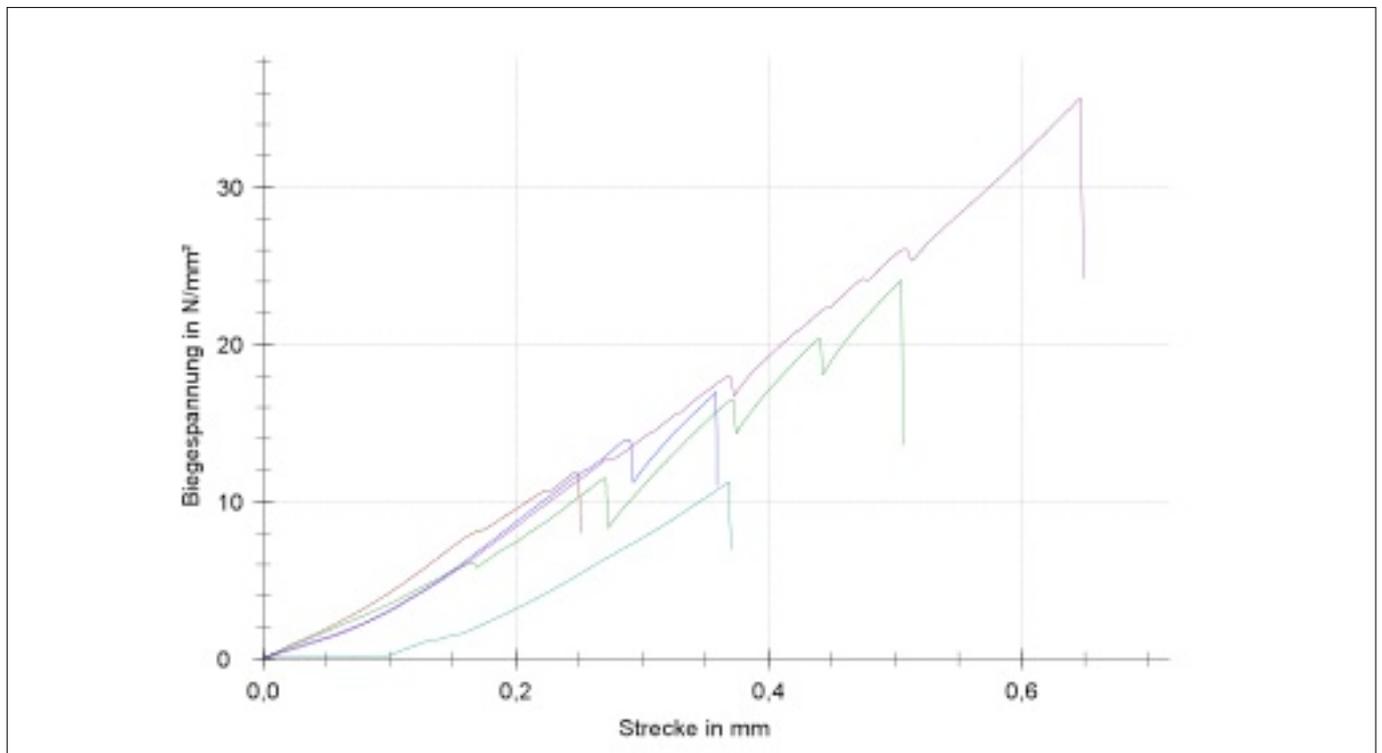
Prüfer: Benjamin Reinhardt  
 Material: Kunstharz + Calciumcarbonat  
 Art und Bezeichnung: K02/T (PMMA + Übertragungsregler)

Belastungsgeschwindigkeit: 1 mm/min

Lastringradius r1 : 06,66 mm  
 Stützringradius r2 : 20,00 mm  
 Poisson-Zahl  $\mu$  : 00,25

**Ergebnisse:**

Nr.	r3 mm	h mm	F <sub>max</sub> N	L <sub>Fmax</sub> mm	t <sub>Fmax</sub> s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
1	25,25	5,20	0400,88	0,25	16,02	11,21	6,24
2	25,25	5,00	0814,66	0,50	31,44	24,64	5,26
3	25,25	4,80	0573,08	0,36	22,68	18,81	8,84
5	25,40	4,90	0380,52	0,37	23,28	11,97	6,08
6	25,00	4,80	1206,55	0,65	40,00	39,70	8,47

**Seriengrafik:****Statistik:**

Serie	r3 mm	h mm	F <sub>max</sub> N	L <sub>Fmax</sub> mm	t <sub>Fmax</sub> s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
n = 5	25,23	4,94	675,14	00,43	26,68	21,27	06,98
x	00,14	0,17	344,35	00,15	09,24	11,67	01,58
s	00,57	3,39	051,00	36,14	34,62	54,89	22,65

**Messprotokoll: biaxiale Biegezugfestigkeit und stat. E-Modul (Randbiegung)****Parametertabelle:**

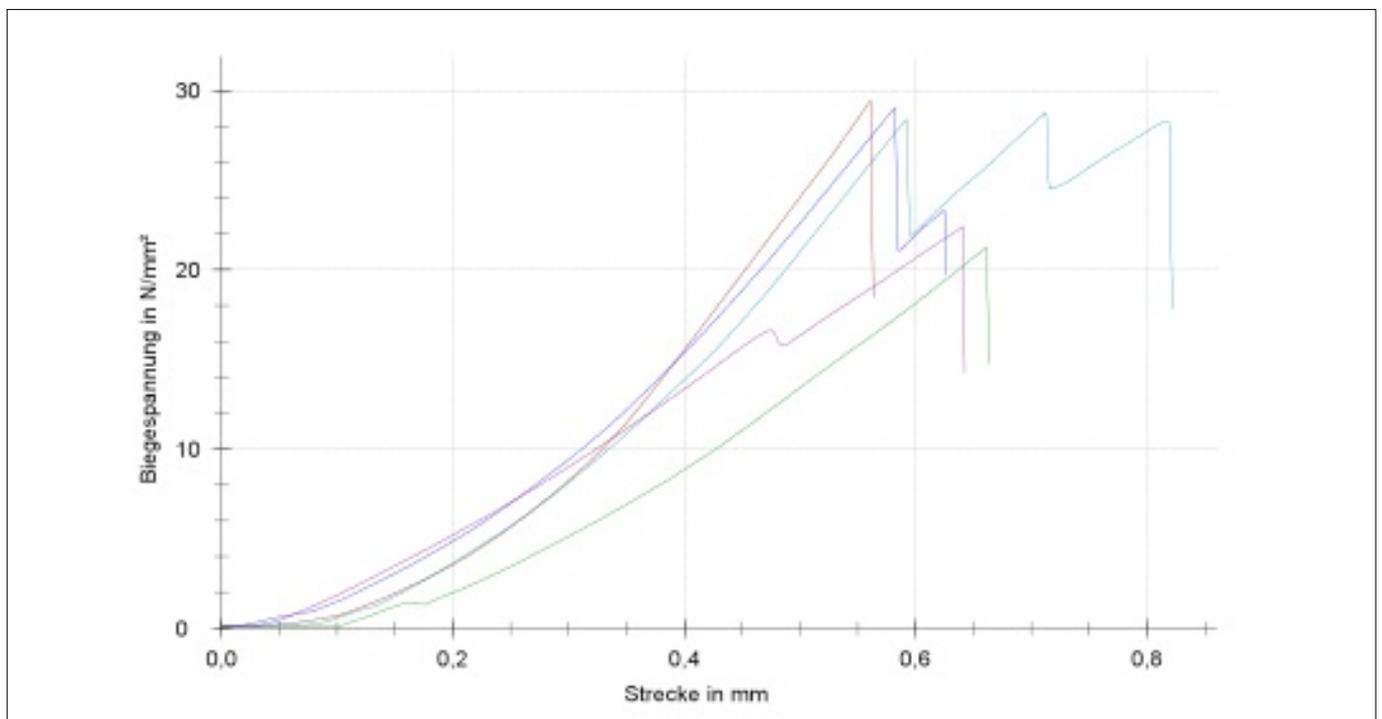
Prüfer: Benjamin Reinhardt  
 Material: Kunstharz + Calciumcarbonat  
 Art und Bezeichnung: K01 (PMMA "getempert")

Belastungsgeschwindigkeit: 1 mm/min

Lastringradius r1 : 06,66 mm  
 Stützringradius r2 : 20,00 mm  
 Poisson-Zahl  $\mu$  : 00,25

**Ergebnisse:**

Nr.	r3 mm	h mm	F <sub>max</sub> N	L <sub>Fmax</sub> mm	t <sub>Fmax</sub> s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
1	24,90	5,20	1108,39	0,52	32,24	31,11	8,36
2	25,00	5,10	1126,94	0,53	32,72	31,60	7,77
3	25,00	5,10	1407,81	0,60	37,14	41,04	9,86
4	25,00	5,00	1082,55	0,58	35,82	32,83	7,76
5†	24,90	5,00	0081,98	0,07	05,64	02,49	4,17

**Seriengrafik:****Statistik:**

Serie	r3 mm	h mm	F <sub>max</sub> N	L <sub>Fmax</sub> mm	t <sub>Fmax</sub> s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
n = 4	24,98	5,10	1181,42	0,56	34,48	34,14	08,44
x	00,05	0,08	0152,02	0,04	02,38	04,65	00,99
v	00,20	1,60	0012,87	7,18	06,90	13,62	11,72

**Messprotokoll: biaxiale Biegezugfestigkeit und stat. E-Modul (Randbiegung)****Parametertabelle:**

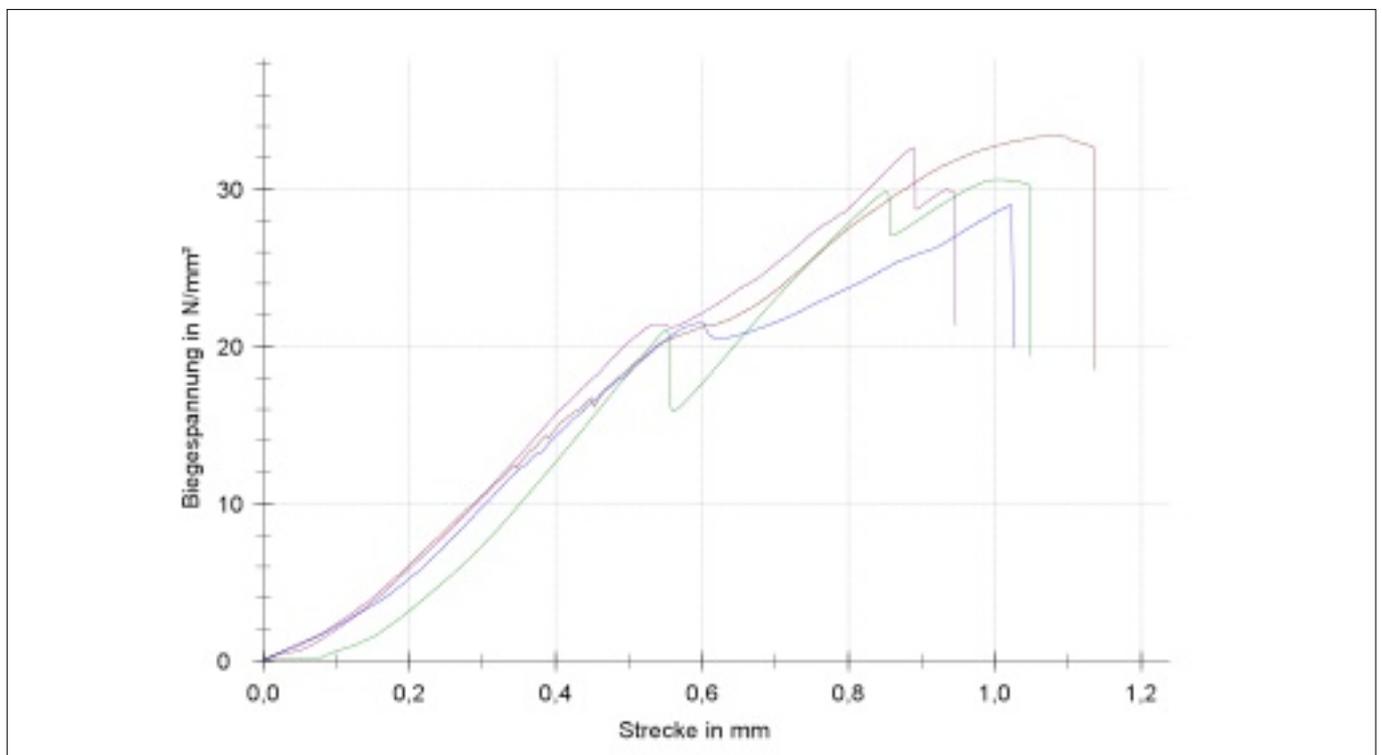
Prüfer: Benjamin Reinhardt  
 Material: Kunstharz + Calciumcarbonat  
 Art und Bezeichnung: K01/T (PMMA "getempert")

Belastungsgeschwindigkeit: 1 mm/min

Lastringradius r1 : 06,66 mm  
 Stützringradius r2 : 20,00 mm  
 Poisson-Zahl  $\mu$  : 00,25

**Ergebnisse:**

Nr.	r3 mm	h mm	F <sub>max</sub> N	L <sub>Fmax</sub> mm	t <sub>Fmax</sub> s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
1	24,80	5,20	1326,09	1,08	65,76	37,26	5,81
2	24,80	5,20	1214,30	1,00	61,18	34,12	7,46
3	24,75	5,10	1150,23	1,02	62,58	33,62	6,71
4†	24,90	5,10	0806,98	0,47	29,28	23,55	6,97
5	24,90	5,20	1294,84	0,89	54,56	36,34	6,92

**Seriengrafik:****Statistik:**

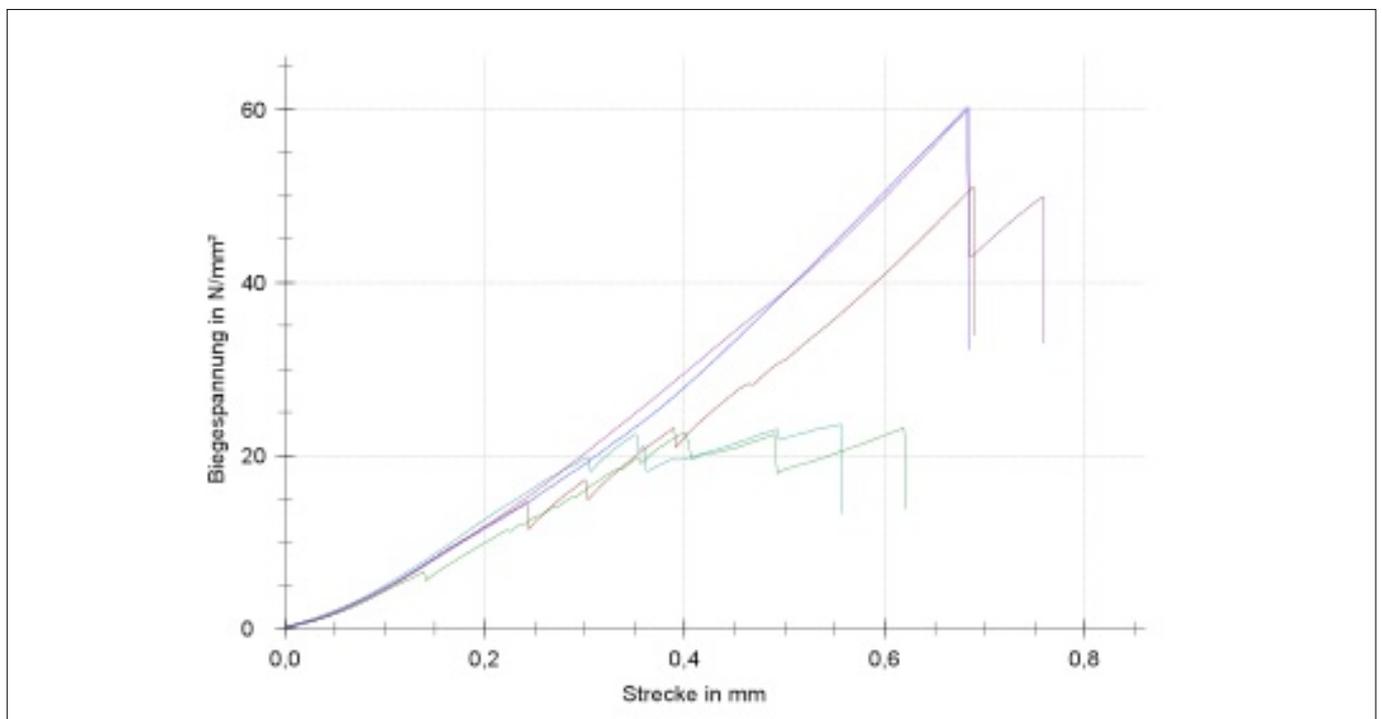
Serie	r3 mm	h mm	F <sub>max</sub> N	L <sub>Fmax</sub> mm	t <sub>Fmax</sub> s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
n = 4	mm	mm	N	mm	s	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>
x	24,81	5,17	1246,37	1,00	61,02	35,34	06,72
s	00,06	0,05	0079,53	0,08	04,71	01,75	00,69
v	00,25	0,97	0006,38	7,91	07,72	04,94	10,20

**Messprotokoll: biaxiale Biegezugfestigkeit und stat. E-Modul (Randbiegung)****Parametertabelle:**

Prüfer:	Benjamin Reinhardt
Material:	Kunstharz + Calciumcarbonat
Art und Bezeichnung:	K02 (PMMA "getempert")
Belastungsgeschwindigkeit:	1 mm/min
Lastringradius r1 :	06,66 mm
Stützringradius r2 :	20,00 mm
Poisson-Zahl $\mu$ :	00,25

**Ergebnisse:**

Nr.	r3 mm	h mm	$F_{max}$ N	$L_{Fmax}$ mm	$t_{Fmax}$ s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
1	25,00	5,00	1687,23	0,69	42,52	51,17	07,60
2	25,00	5,00	0764,52	0,62	38,30	23,19	07,21
3	25,30	5,00	1992,67	0,68	42,18	60,24	11,33
4	25,20	5,00	0778,41	0,56	34,46	23,56	09,97
5	25,10	5,00	1980,46	0,68	42,12	60,00	11,77

**Seriengrafik:****Statistik:**

Serie	r3 mm	h mm	$F_{max}$ N	$L_{Fmax}$ mm	$t_{Fmax}$ s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
n = 5	mm	mm	N	mm	s	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>
x	25,12	5,00	1440,66	0,65	39,92	43,63	09,58
s	00,13	0,00	0623,02	0,06	03,51	18,85	02,10
v	00,52	0,00	0043,25	8,98	08,78	43,21	21,88

**Messprotokoll: biaxiale Biegezugfestigkeit und stat. E-Modul (Randbiegung)****Parametertabelle:**

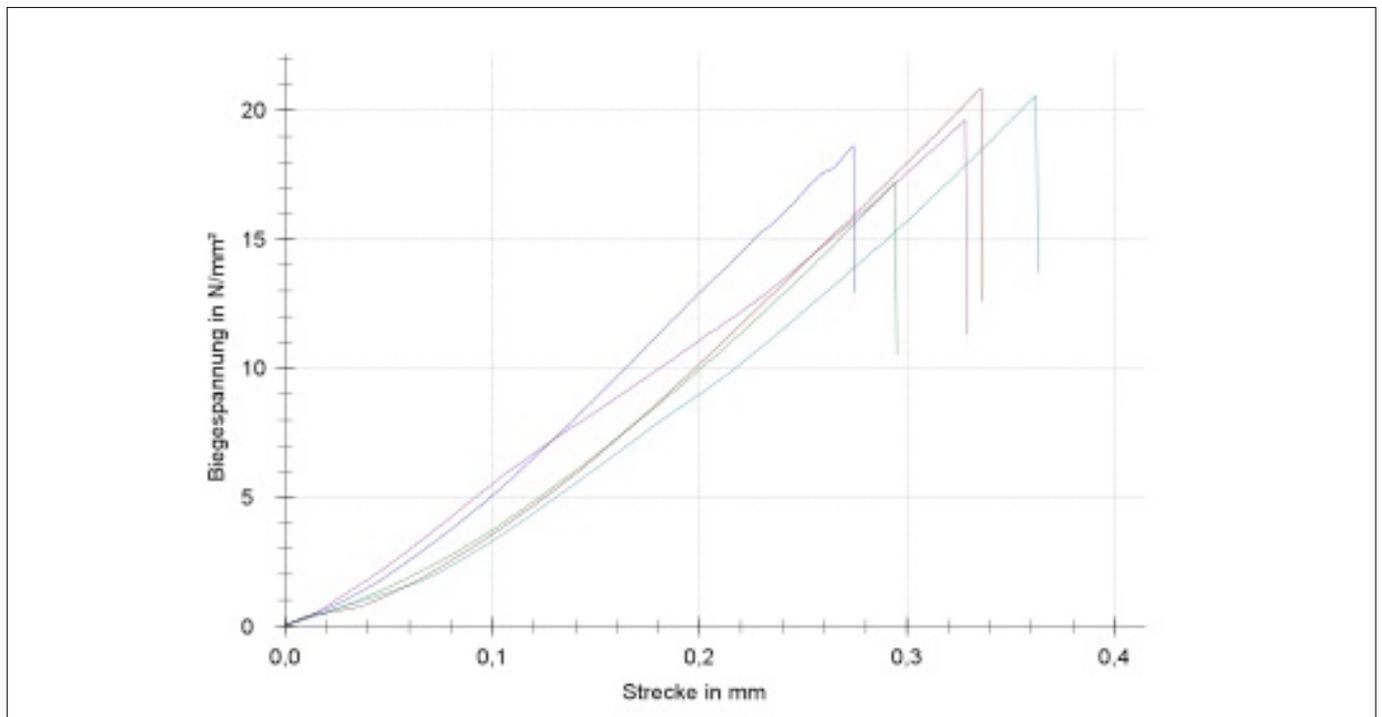
Prüfer: Benjamin Reinhardt  
 Material: Kunstharz + Calciumcarbonat  
 Art und Bezeichnung: K02/T (PMMA "getempert")

Belastungsgeschwindigkeit: 1 mm/min

Lastringradius r1 : 06,66 mm  
 Stützringradius r2 : 20,00 mm  
 Poisson-Zahl  $\mu$  : 00,25

**Ergebnisse:**

Nr.	r3 mm	h mm	F <sub>max</sub> N	L <sub>Fmax</sub> mm	t <sub>Fmax</sub> s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
1	25,10	5,00	764,21	0,34	21,32	23,15	10,01
2	25,15	5,00	630,52	0,29	18,80	19,09	08,81
3	25,20	5,00	682,61	0,27	17,60	20,66	10,81
4	25,15	5,00	754,41	0,36	22,92	22,84	08,32
5	25,10	5,00	719,30	0,33	20,84	21,79	08,07

**Seriengrafik:****Statistik:**

Serie	r3 mm	h mm	F <sub>max</sub> N	L <sub>Fmax</sub> mm	t <sub>Fmax</sub> s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
n = 5	mm	mm	N	mm	s	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>
x	25,14	5,00	710,21	00,32	20,30	21,51	09,20
s	00,04	0,00	054,92	00,03	02,11	01,67	01,17
v	00,17	0,00	007,73	10,96	10,38	07,75	12,69

**Messprotokoll: biaxiale Biegezugfestigkeit und stat. E-Modul (Randbiegung)****Parametertabelle:**

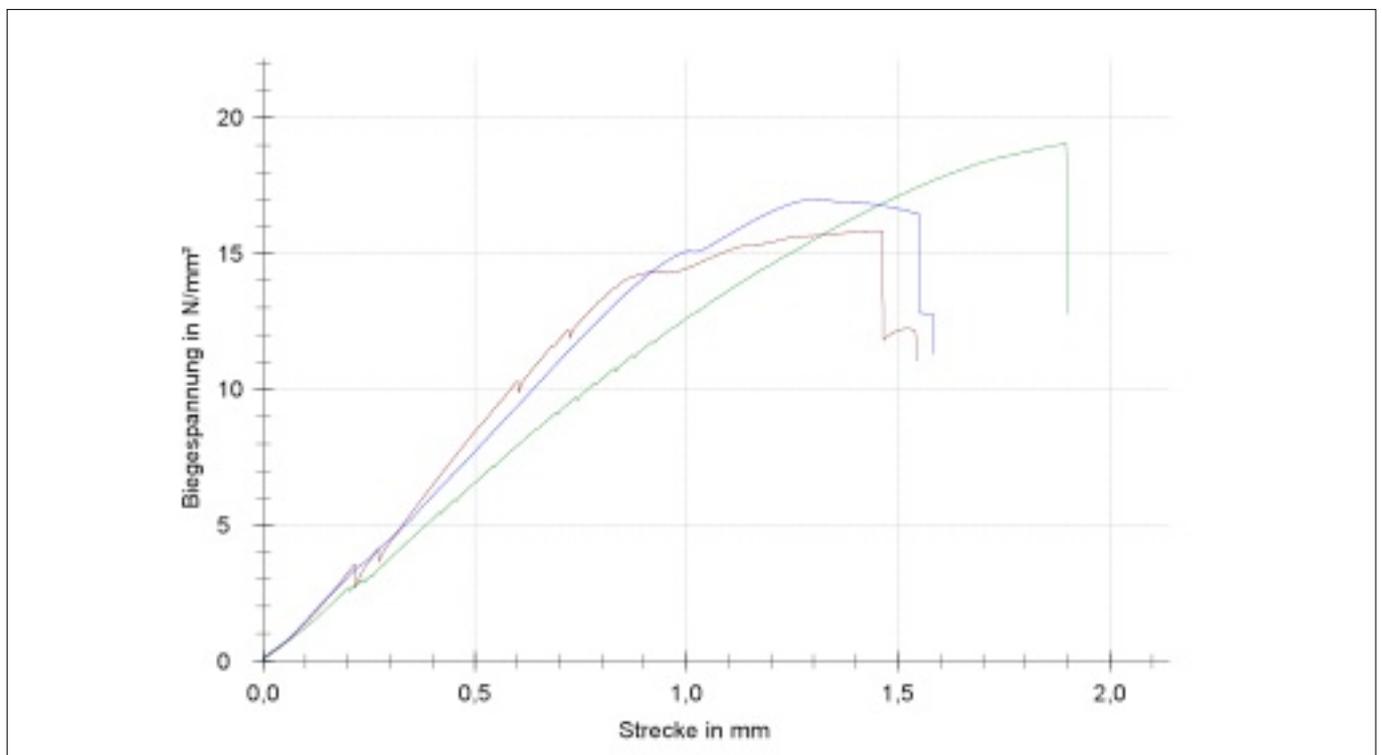
Prüfer: Benjamin Reinhardt  
 Material: Kunstharz + Hohlglaskügelchen  
 Art und Bezeichnung: K01/T (PMMA + Übertragungsregler)

Belastungsgeschwindigkeit: 1 mm/min

Lastringradius r1 : 06,66 mm  
 Stützringradius r2 : 20,00 mm  
 Poisson-Zahl  $\mu$  : 00,25

**Ergebnisse:**

Nr.	r3 mm	h mm	F <sub>max</sub> N	L <sub>Fmax</sub> mm	t <sub>Fmax</sub> s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
1	25,00	5,10	604,18	1,46	088,82	17,61	2,66
2	25,00	5,10	727,28	1,90	114,96	21,20	1,87
3	24,90	5,10	648,46	1,30	079,24	18,92	2,24

**Seriengrafik:****Statistik:**

Serie	r3 mm	h mm	F <sub>max</sub> N	L <sub>Fmax</sub> mm	t <sub>Fmax</sub> s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
n = 3	24,97	5,10	659,97	01,55	94,34	19,24	02,26
x	00,06	0,00	062,35	00,31	18,49	01,82	00,39
s	00,23	0,00	009,45	19,83	19,60	09,43	17,44

**Messprotokoll: biaxiale Biegezugfestigkeit und stat. E-Modul (Randbiegung)****Parametertabelle:**

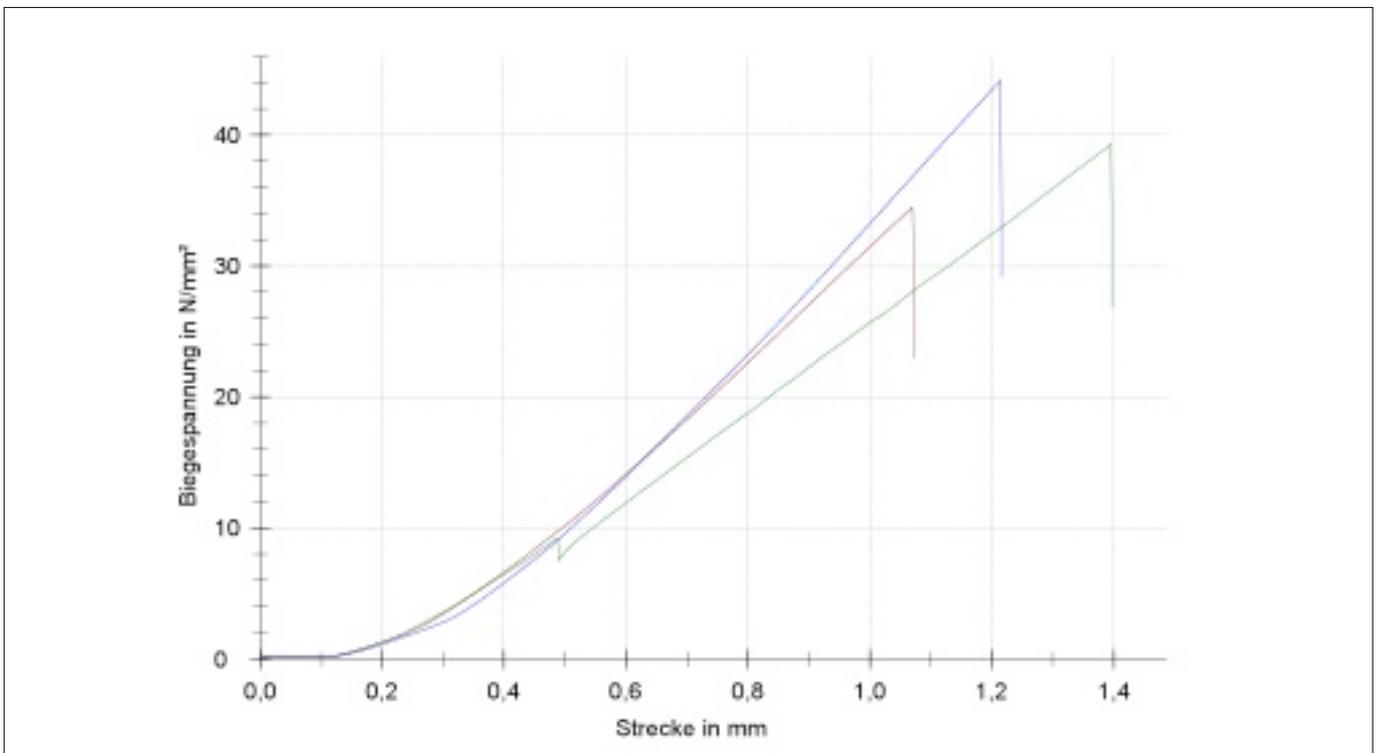
Prüfer: Benjamin Reinhardt  
 Material: Kunstharz  
 Art und Bezeichnung: XP 58/18 (PMMA)

Belastungsgeschwindigkeit: 1 mm/min

Lastringradius  $r_1$  : 06,66 mm  
 Stützringradius  $r_2$  : 20,00 mm  
 Poisson-Zahl  $\mu$  : 00,25

**Ergebnisse:**

Nr.	r3 mm	h mm	$F_{\max}$ N	$L_{F\max}$ mm	$t_{F\max}$ s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
1	25,50	4,80	1264,76	1,07	65,42	41,40	6,39
2	25,25	4,50	1441,36	1,40	84,96	53,82	6,78
3	25,40	5,00	1619,28	1,21	74,00	48,90	6,54

**Seriengrafik:****Statistik:**

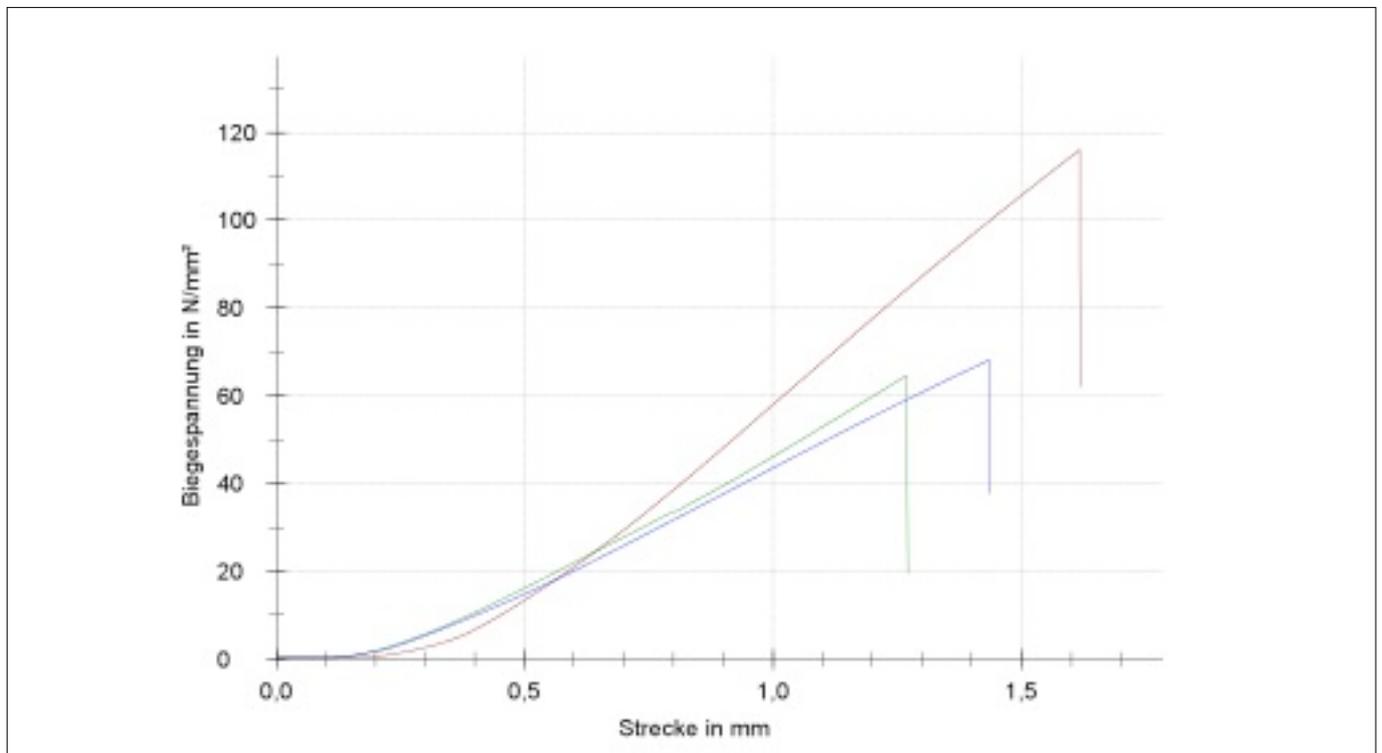
Serie	r3 mm	h mm	$F_{\max}$ N	$L_{F\max}$ mm	$t_{F\max}$ s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
n = 3							
x	25,38	4,77	1441,80	01,23	74,79	48,04	6,57
s	00,13	0,25	177,26	00,16	09,79	06,25	0,20
v	00,50	5,28	012,29	13,30	13,09	13,02	3,00

**Messprotokoll: biaxiale Biegezugfestigkeit und stat. E-Modul (Randbiegung)****Parametertabelle:**

Prüfer:	Benjamin Reinhardt
Material:	Kunstharz
Art und Bezeichnung:	XP 58/18 (PMMA + Übertragungsregler)
Belastungsgeschwindigkeit:	1 mm/min
Lastringradius r1 :	06,66 mm
Stützringradius r2 :	20,00 mm
Poisson-Zahl $\mu$ :	00,25

**Ergebnisse:**

Nr.	r3 mm	h mm	$F_{\max}$ N	$L_{F\max}$ mm	$t_{F\max}$ s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
1	25,25	5,00	2706,29	1,62	98,18	81,86	8,65
2	25,20	4,80	1506,11	1,27	77,26	49,46	6,00
3	25,25	4,20	1589,98	1,44	87,32	68,16	8,80

**Seriengrafik:****Statistik:**

Serie	r3 mm	h mm	$F_{\max}$ N	$L_{F\max}$ mm	$t_{F\max}$ s	$\sigma_{bB}$ N/mm <sup>2</sup>	E kN/mm <sup>2</sup>
n = 3	25,23	4,67	1934,13	01,44	87,59	66,49	07,81
x	00,03	0,42	0670,02	00,17	10,46	16,26	01,57
s	00,11	8,92	0034,64	12,10	11,94	24,46	20,14

### 8.2.3.2 Messung der Haftzugfestigkeit an der FH POTSDAM

Probekörperaufnahme für die Messung der Haftzugfestigkeit (→Abschnitt 5.3.3.2)

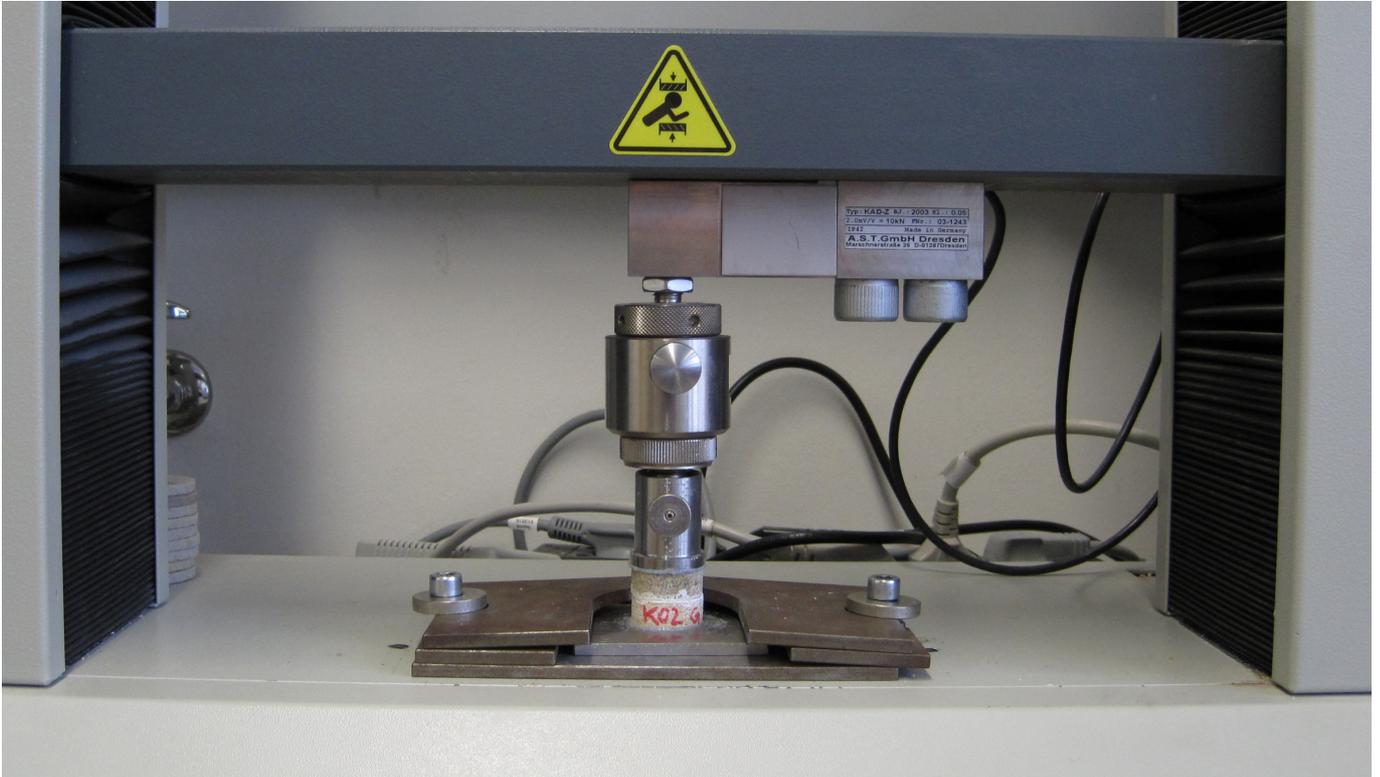


Abb. A10: Probekörperaufnahme für die Messung der Haftzugfestigkeit an der FH Potsdam

## Messprotokoll: Haftzugmessung (Fmax Zug)

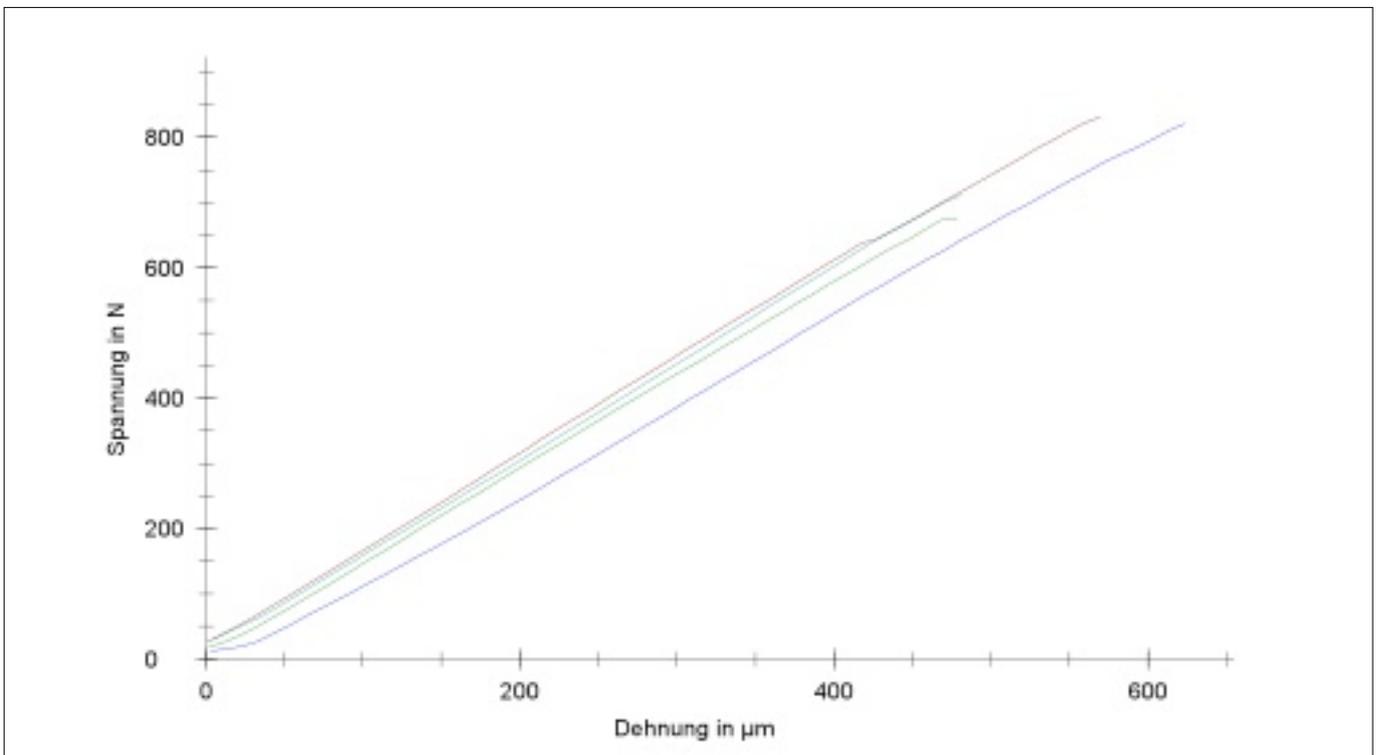
### Parametertabelle:

Prüfer:	Benjamin Reinhardt	Prüfnorm:	Fmax Zug
Klebstoff:	K01		
Material:	PMMA + Calciumcarbonat		
Vorkraft-Geschwindigkeit:	10 mm/min	Vorkraft:	10 N
Prüfgeschwindigkeit:	01 mm/min		

### Ergebnisse:

Nr.	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
1	28	131,25	831,71	1,35
2	28	131,06	673,52	1,09
3	28	131,05	821,41	1,33
4	28	131,11	711,61	1,16

### Seriengrafik:



### Statistik:

Serie	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
n = 4				
x	28,00	131,12	759,56	01,23
s	00,00	000,09	079,02	00,13
v	00,00	000,07	010,40	10,40

## Messprotokoll: Haftzugmessung (Fmax Zug)

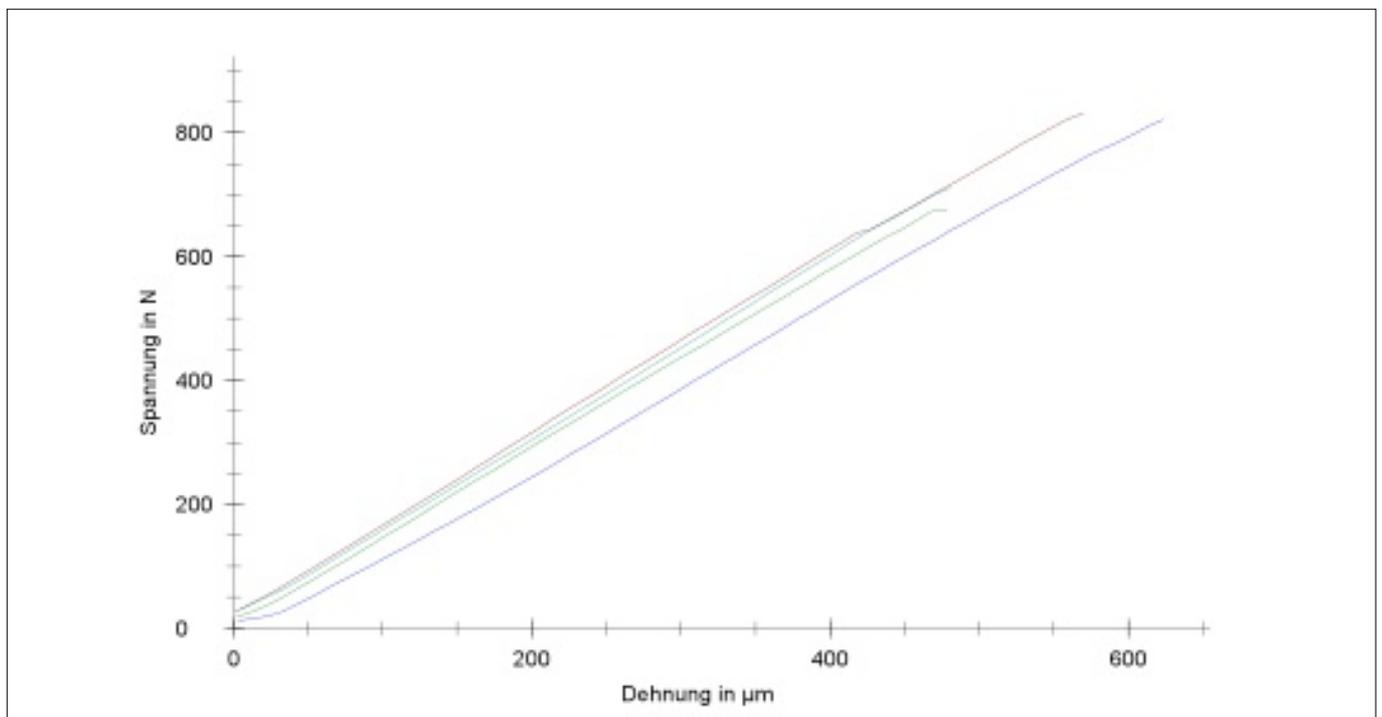
### Parametertabelle:

Prüfer:	Benjamin Reinhardt	Prüfnorm:	Fmax Zug
Klebstoff:	K01 - im Verbund		
Material:	PMMA + Calciumcarbonat		
Vorkraft-Geschwindigkeit:	10 mm/min	Vorkraft:	10 N
Prüfgeschwindigkeit:	01 mm/min		

### Ergebnisse:

Nr.	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
1	27	150,57	681,16	1,19
2	27	150,16	299,81	0,52
3	27	150,37	366,69	0,64
4	27	149,89	298,21	0,52
5	27	150,13	312,61	0,55

### Seriengrafik:



### Statistik:

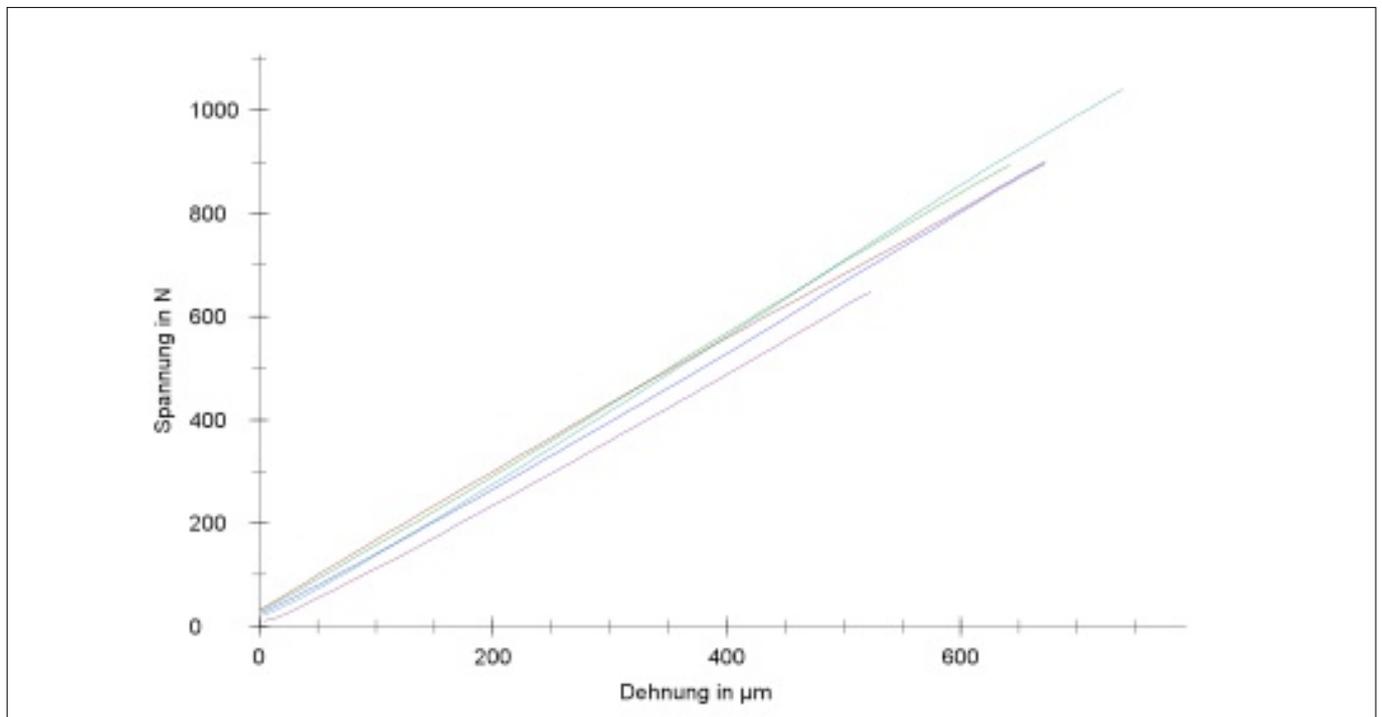
Serie	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
n = 5				
x	27,00	150,22	391,69	00,68
s	00,00	000,26	164,20	00,29
v	00,00	000,17	041,92	41,92

**Messprotokoll: Haftzugmessung (Fmax Zug)****Parametertabelle:**

Prüfer:	Benjamin Reinhardt	Prüfnorm:	Fmax Zug
Klebstoff:	K01 - im Verbund ("getempert")		
Material:	PMMA + Calciumcarbonat		
Vorkraft-Geschwindigkeit:	10 mm/min	Vorkraft:	10 N
Prüfgeschwindigkeit:	01 mm/min		

**Ergebnisse:**

Nr.	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
1	27	153,15	0900,30	1,57
2	27	152,78	0893,76	1,56
3	27	152,85	0896,62	1,57
4	27	152,75	1040,63	1,82
5	27	152,82	0647,56	1,13

**Seriengrafik:****Statistik:**

Serie	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
n = 5	mm	mm	N	N/mm <sup>2</sup>
x	27,00	152,87	875,77	01,53
s	0,000	000,16	141,97	00,25
v	0,000	000,10	016,21	16,21

## Messprotokoll: Haftzugmessung (Fmax Zug)

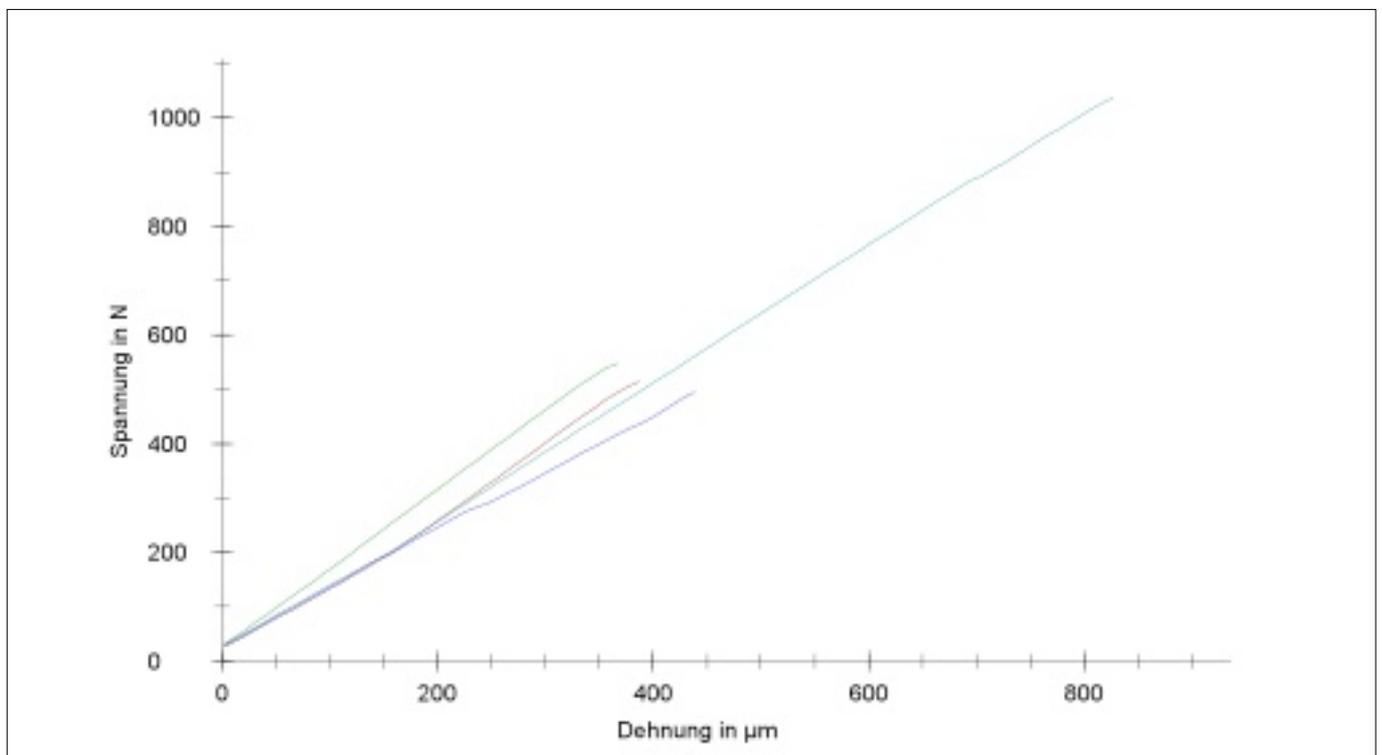
### Parametertabelle:

Prüfer:	Benjamin Reinhardt	Prüfnorm:	Fmax Zug
Klebstoff:	K01/T		
Material:	PMMA + Übertragungsregler + Calciumcarbonat		
Vorkraft-Geschwindigkeit:	10 mm/min	Vorkraft:	10 N
Prüfgeschwindigkeit:	01 mm/min		

### Ergebnisse:

Nr.	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
1	28	131,13	0513,98	0,83
2	28	131,03	0547,76	0,89
3	28	131,11	0495,07	0,80
4†	28	131,11	1036,14	1,68

### Seriengrafik:



### Statistik:

Serie	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
n = 4				
x	28,00	131,09	518,94	0,84
s	00,00	000,05	026,69	0,04
v	00,00	000,04	005,14	5,14

## Messprotokoll: Haftzugmessung (Fmax Zug)

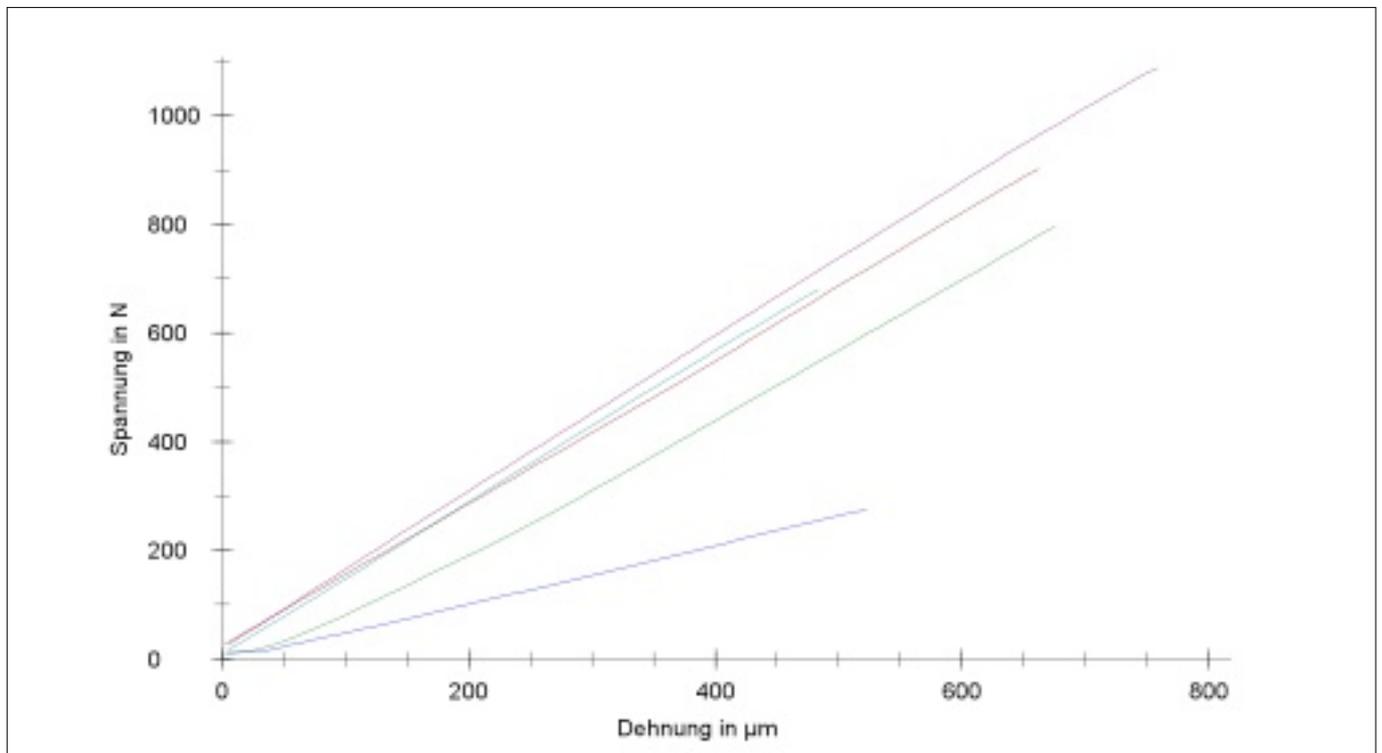
### Parametertabelle:

Prüfer:	Benjamin Reinhardt	Prüfnorm:	Fmax Zug
Klebstoff:	K01/T - im Verbund		
Material:	PMMA + Übertragungsregler + Calciumcarbonat		
Vorkraft-Geschwindigkeit:	10 mm/min	Vorkraft:	10 N
Prüfgeschwindigkeit:	01 mm/min		

### Ergebnisse:

Nr.	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
1	27	150,61	0902,24	1,58
2	27	150,66	0795,36	1,39
3†	27	149,86	0274,14	0,48
4	27	150,80	0679,35	1,19
5	27	150,49	1088,43	1,90

### Seriengrafik:



### Statistik:

Serie	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
n = 5				
x	27,00	150,64	866,34	01,51
s	00,00	000,13	173,80	00,30
v	00,00	000,08	020,06	20,06

## Messprotokoll: Haftzugmessung (Fmax Zug)

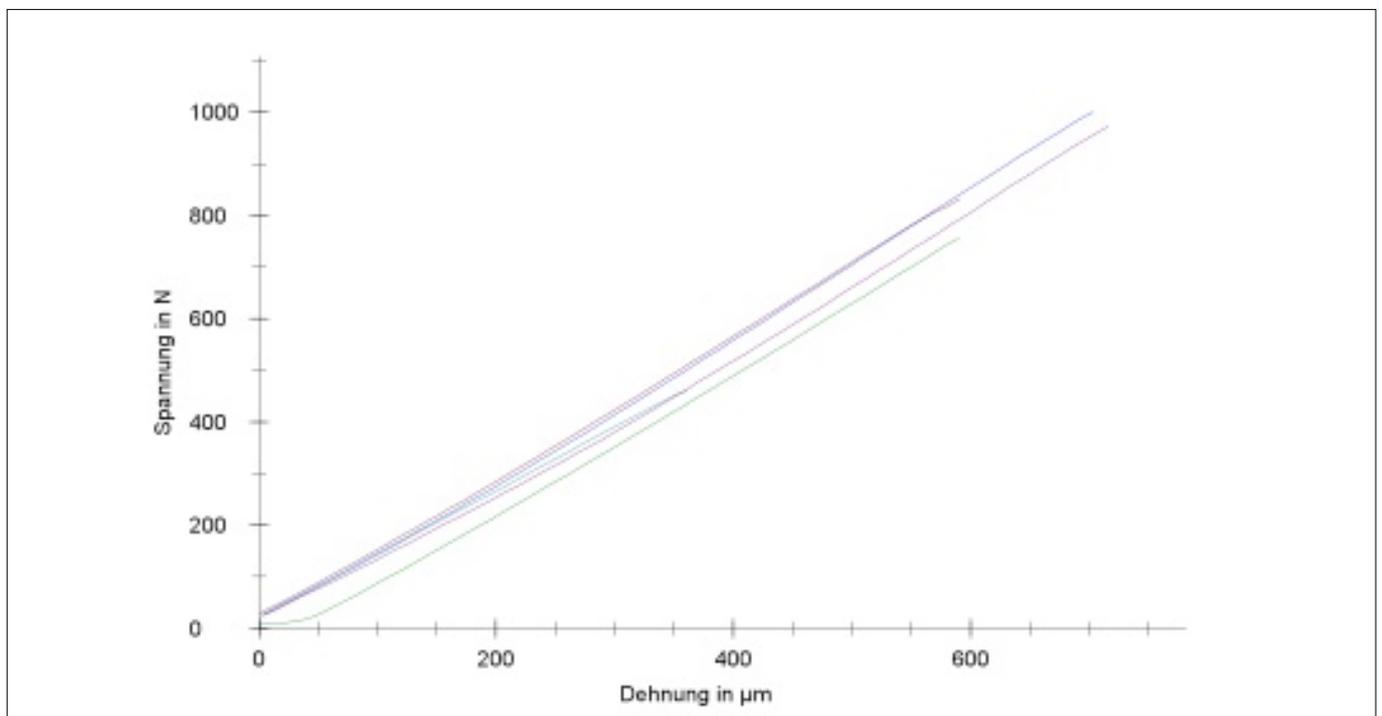
### Parametertabelle:

Prüfer:	Benjamin Reinhardt	Prüfnorm:	Fmax Zug
Klebstoff:	K01/T - im Verbund ("getempert")		
Material:	PMMA + Calciumcarbonat		
Vorkraft-Geschwindigkeit:	10 mm/min	Vorkraft:	10 N
Prüfgeschwindigkeit:	01 mm/min		

### Ergebnisse:

Nr.	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
1	27	153,10	0830,96	1,45
2	27	152,86	0755,07	1,32
3	27	153,02	1000,61	1,75
4†	27	152,71	0460,84	0,80
5	27	152,83	0973,50	1,70

### Seriengrafik:



### Statistik:

Serie	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
n = 5	27,00	152,95	890,03	01,55
x	00,00	000,13	116,76	00,20
s	00,00	000,09	013,12	13,12
v	00,00	000,09	013,12	13,12

## Messprotokoll: Haftzugmessung (Fmax Zug)

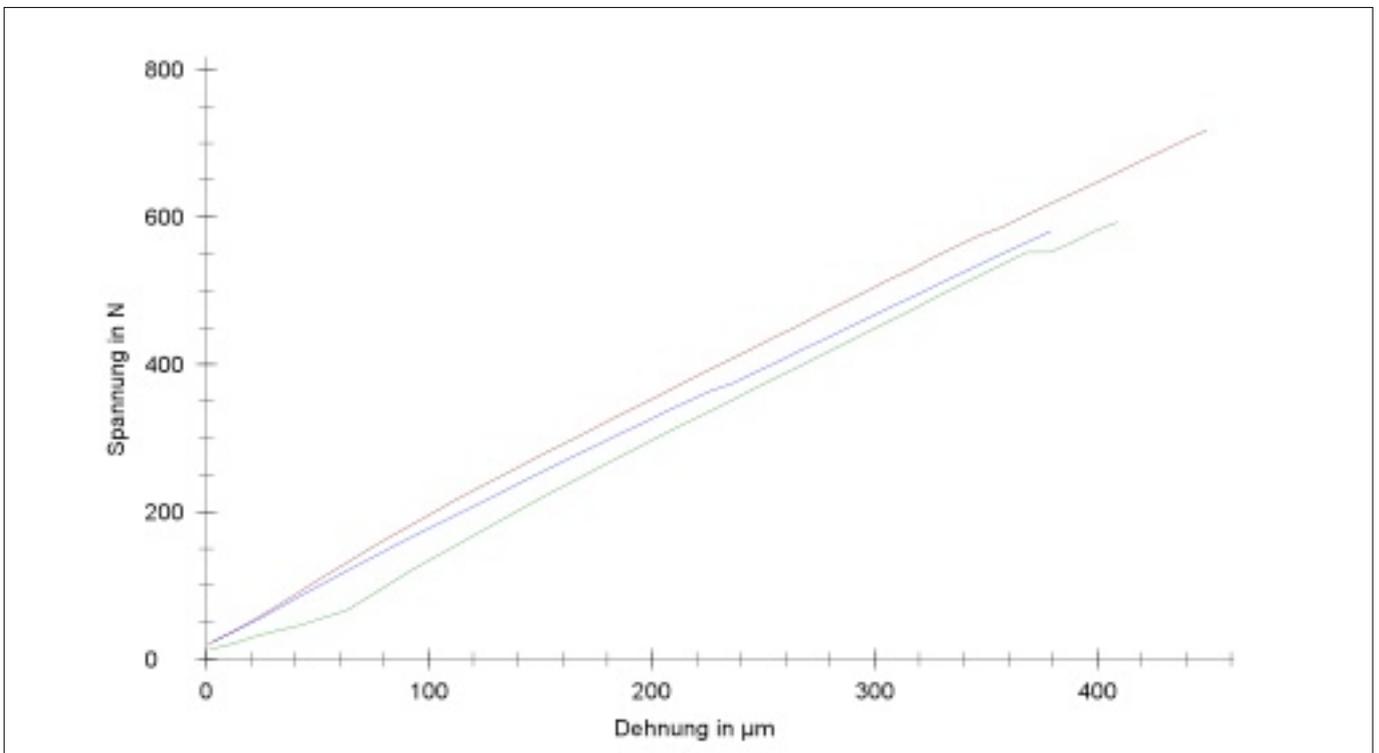
### Parametertabelle:

Prüfer:	Benjamin Reinhardt	Prüfnorm:	Fmax Zug
Klebstoff:	K02		
Material:	PMMA + Calciumcarbonat		
Vorkraft-Geschwindigkeit:	10 mm/min	Vorkraft:	10 N
Prüfgeschwindigkeit:	01 mm/min		

### Ergebnisse:

Nr.	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
1†	28	132,72	135,73	0,22
2	28	132,25	739,32	1,20
3	28	132,55	780,53	1,27
4	28	132,77	617,19	1,00

### Seriengrafik:



### Statistik:

Serie	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
n = 4	mm	mm	N	N/mm <sup>2</sup>
x	28,00	132,52	712,35	01,16
s	00,00	000,26	084,95	00,14
v	00,00	000,20	011,93	11,93

## Messprotokoll: Haftzugmessung (Fmax Zug)

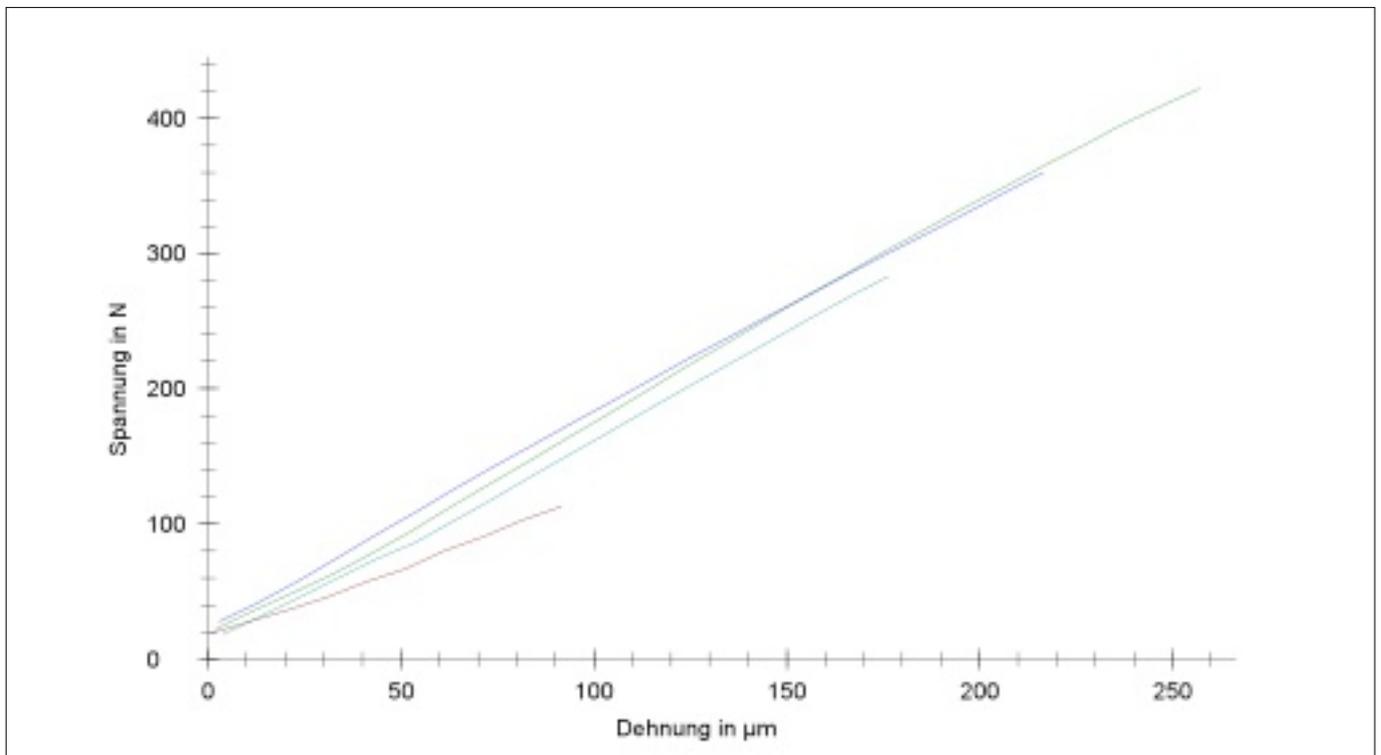
### Parametertabelle:

Prüfer:	Benjamin Reinhardt	Prüfnorm:	Fmax Zug
Klebstoff:	K02 im Verbund		
Material:	PMMA + Calciumcarbonat		
Vorkraft-Geschwindigkeit:	10 mm/min	Vorkraft:	10 N
Prüfgeschwindigkeit:	01 mm/min		

### Ergebnisse:

Nr.	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
1†	28	153,39	112,87	0,18
2	28	153,60	422,17	0,69
3	28	153,79	359,55	0,58
4	28	153,60	283,23	0,46

### Seriengrafik:



### Statistik:

Serie	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
n = 4				
x	28,00	153,67	354,98	00,58
s	00,00	000,11	069,58	00,11
v	00,00	000,07	019,60	19,60

## Messprotokoll: Haftzugmessung (Fmax Zug)

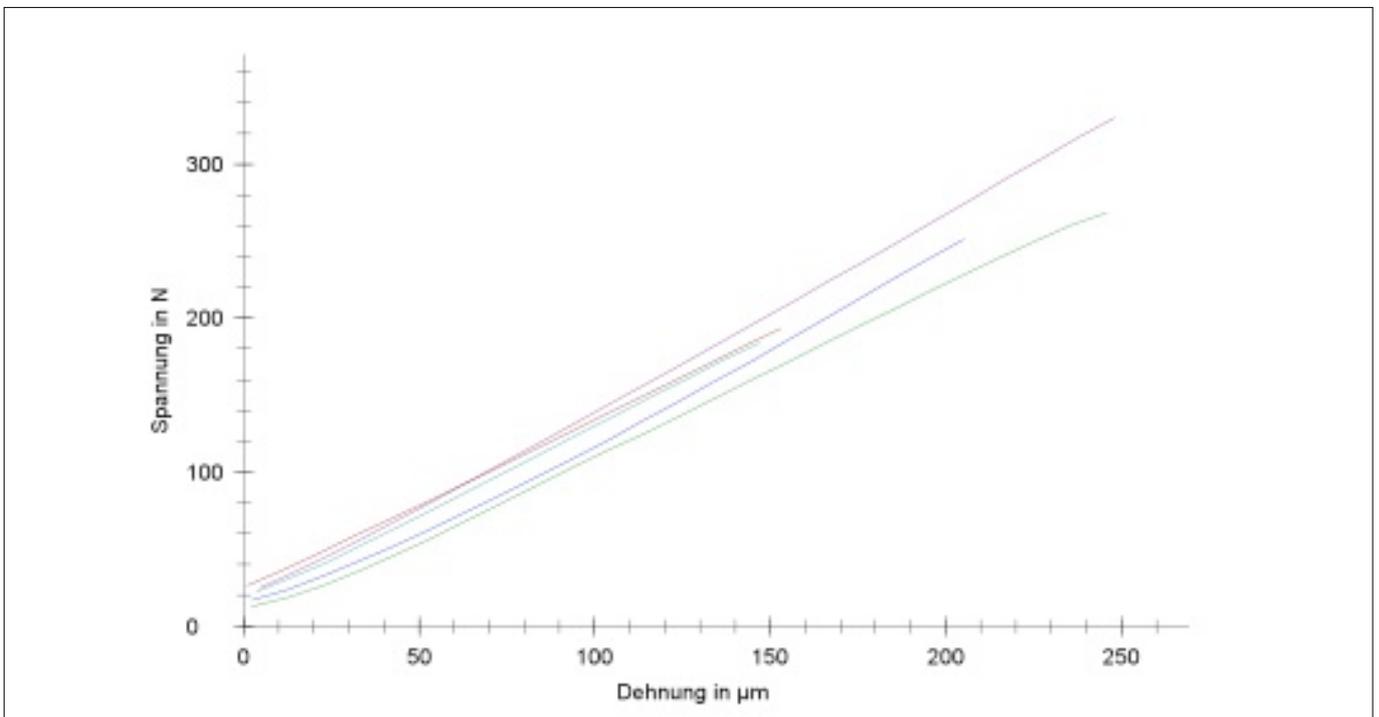
### Parametertabelle:

Prüfer:	Benjamin Reinhardt	Prüfnorm:	Fmax Zug
Klebstoff:	K02 im Verbund ("getempert")		
Material:	PMMA + Calciumcarbonat		
Vorkraft-Geschwindigkeit:	10 mm/min	Vorkraft:	10 N
Prüfgeschwindigkeit:	01 mm/min		

### Ergebnisse:

Nr.	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
1	27	154,85	192,99	0,34
2	27	154,54	268,22	0,47
3	27	155,33	251,06	0,44
4	27	154,96	184,04	0,32
5	27	155,03	330,08	0,58

### Seriengrafik:



### Statistik:

Serie	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
n = 5	27,00	154,94	245,28	00,43
x	0,000	000,29	059,66	00,10
s	0,000	000,19	024,32	24,32
v	0,000	000,19	024,32	24,32

## Messprotokoll: Haftzugmessung (Fmax Zug)

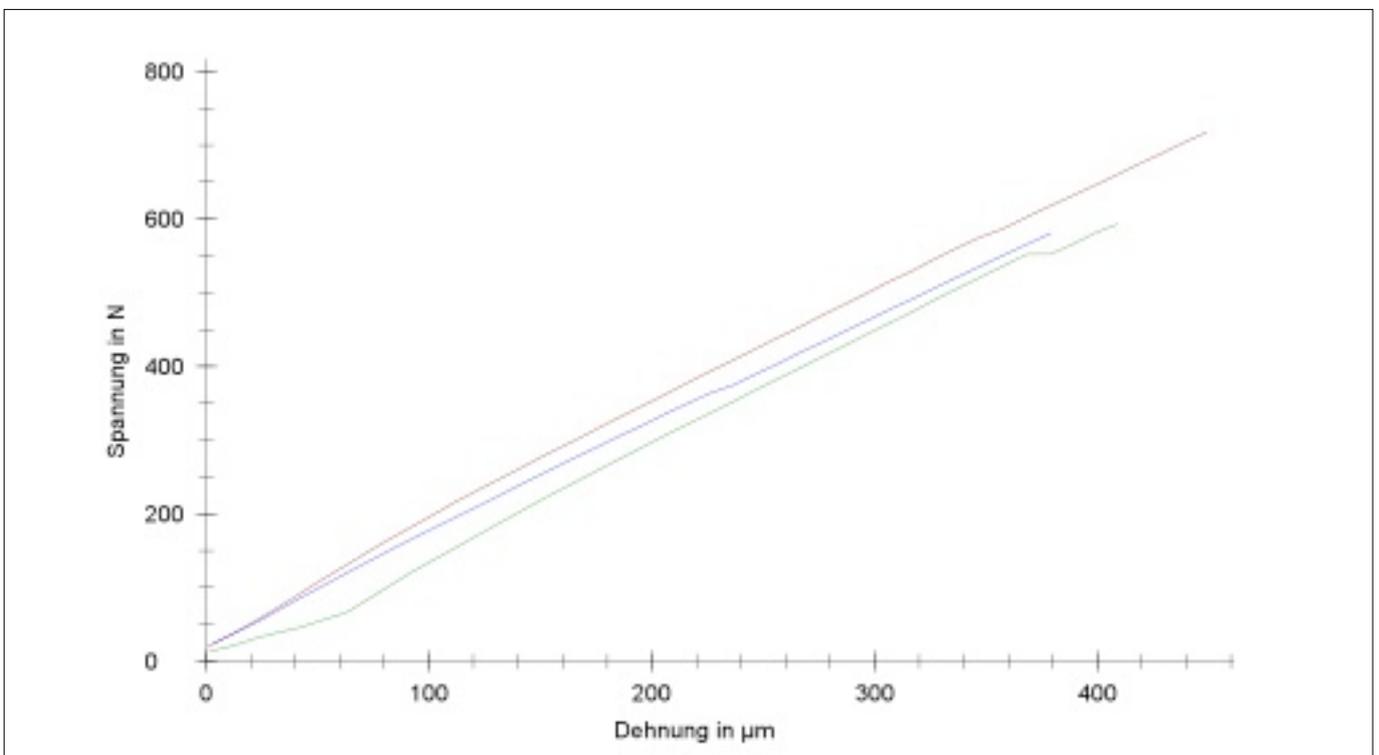
### Parametertabelle:

Prüfer:	Benjamin Reinhardt	Prüfnorm:	Fmax Zug
Klebstoff:	K02/T		
Material:	PMMA + Übertragungsregler + Calciumcarbonat		
Vorkraft-Geschwindigkeit:	10 mm/min	Vorkraft:	10 N
Prüfgeschwindigkeit:	01 mm/min		

### Ergebnisse:

Nr.	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
1	28	132,76	718,11	1,17
2	28	132,50	593,35	0,96
3	28	132,57	580,91	0,94

### Seriengrafik:



### Statistik:

Serie	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
n = 3				
x	28,00	132,61	630,79	01,02
s	00,00	000,13	075,88	00,12
v	00,00	000,10	012,03	12,03

## Messprotokoll: Haftzugmessung (Fmax Zug)

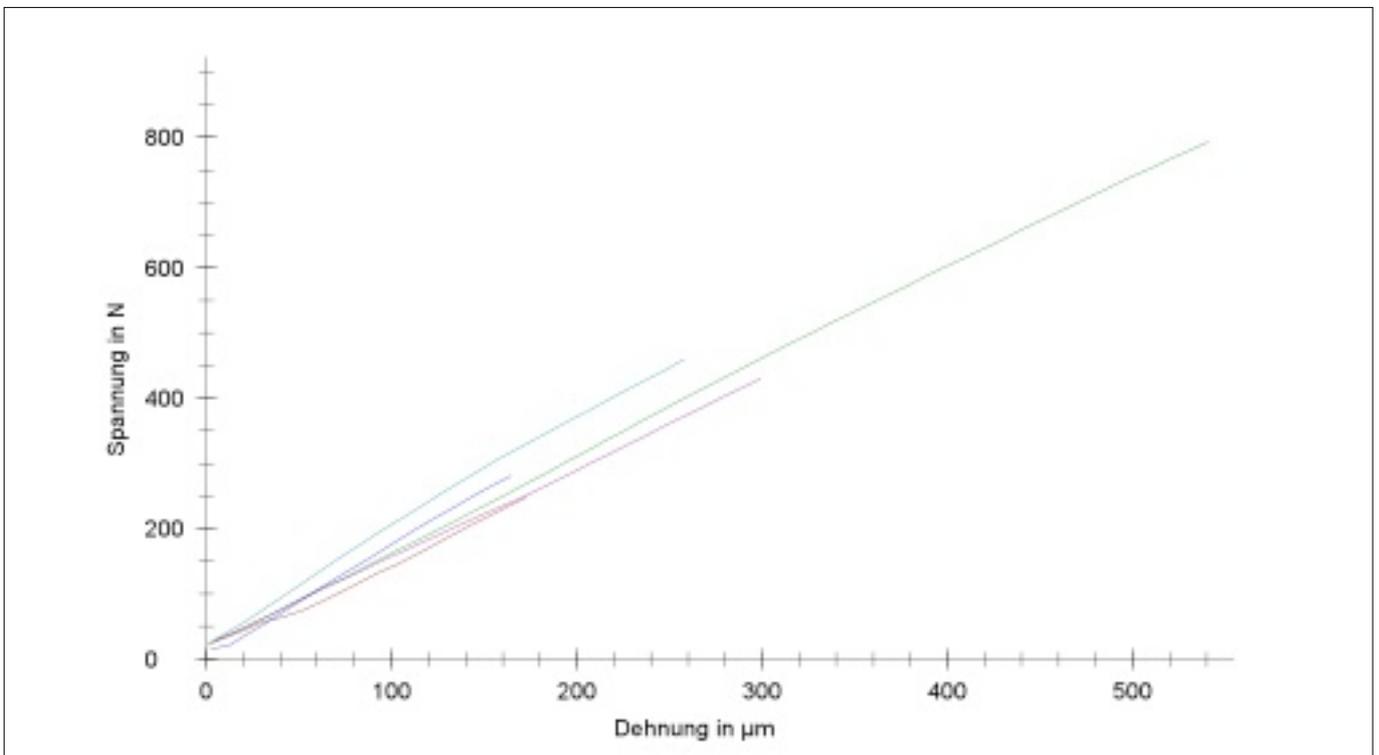
### Parametertabelle:

Prüfer:	Benjamin Reinhardt	Prüfnorm:	Fmax Zug
Klebstoff:	K02/T im Verbund		
Material:	PMMA + Übertragungsregler + Calciumcarbonat		
Vorkraft-Geschwindigkeit:	10 mm/min	Vorkraft:	10 N
Prüfgeschwindigkeit:	01 mm/min		

### Ergebnisse:

Nr.	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
1	28	153,67	248,98	0,40
2†	28	153,57	792,92	1,29
3	28	153,56	280,50	0,46
4	28	153,75	459,45	0,75
5	28	153,56	430,32	0,70

### Seriengrafik:



### Statistik:

Serie	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
n = 5				
x	28,00	153,64	354,81	00,58
s	00,00	000,09	105,47	00,17
v	00,00	000,06	029,73	29,73

## Messprotokoll: Haftzugmessung (Fmax Zug)

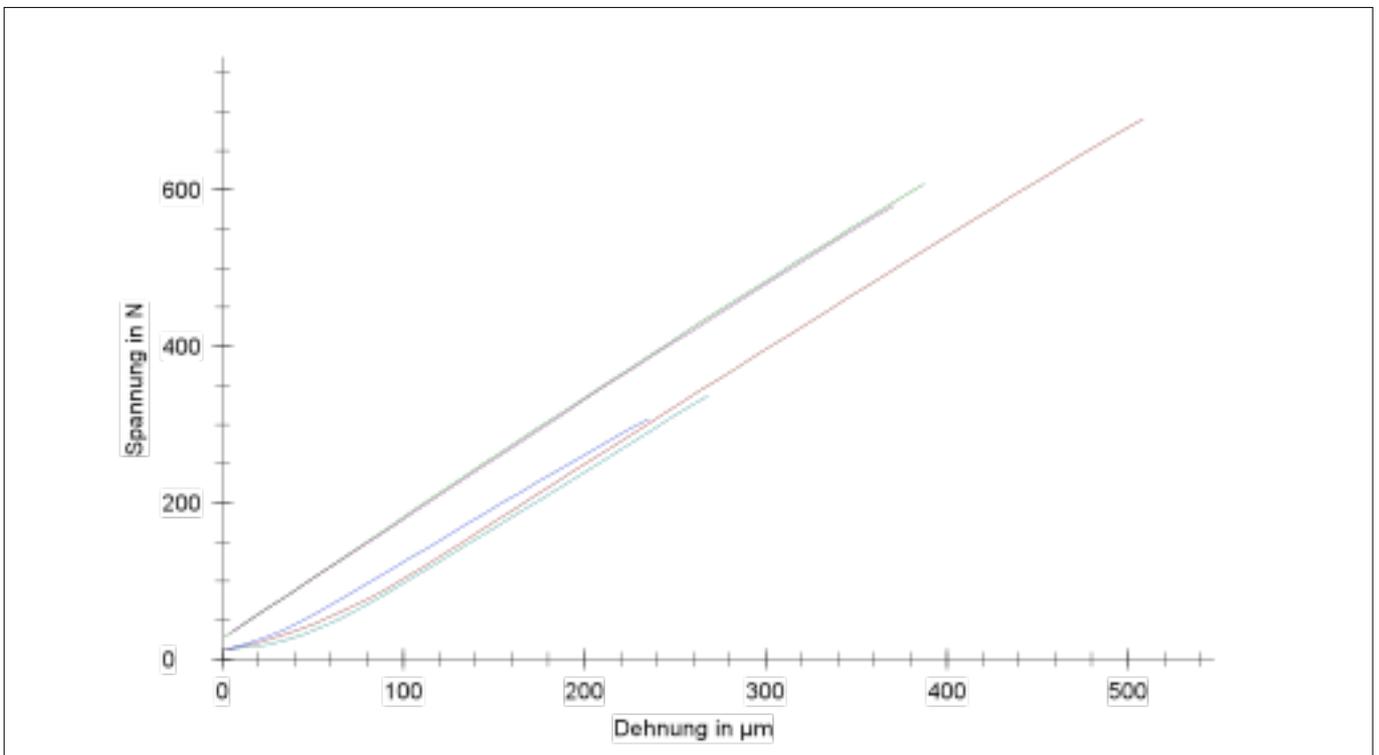
### Parametertabelle:

Prüfer:	Benjamin Reinhardt	Prüfnorm:	Fmax Zug
Klebstoff:	K02/T im Verbund "getempert"		
Material:	PMMA + Übertragungsregler + Calciumcarbonat		
Vorkraft-Geschwindigkeit:	10 mm/min	Vorkraft:	10 N
Prüfgeschwindigkeit:	01 mm/min		

### Ergebnisse:

Nr.	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
1	27	153,07	689,89	1,20
2	27	152,96	607,25	1,06
3	27	153,31	306,04	0,53
4	27	153,11	335,91	0,59
5	27	153,26	579,89	1,01

### Seriengrafik:



### Statistik:

Serie	d0 mm	L0 mm	Fmax N	$\beta_{\text{Bruch}}$ N/mm <sup>2</sup>
n = 5				
x	27,00	153,14	503,80	00,88
s	00,00	000,14	172,06	00,30
v	00,00	000,09	034,15	34,15

### 8.2.3.3 Messung der Zugfestigkeit nach DIN EN ISO 527-1 an der BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG

#### Prüfvorrichtung und Probekörperaufnahme (→Abschnitt 5.3.3.3)



Abb. A11: Prüfvorrichtung zur Messung der Zugfestigkeit an der BAM (Typ: ZWICK ROELL 1454)



Abb. A12: Probekörperaufnahme für die Messung der Zugfestigkeit

**Darstellung der Messergebnisse des Zugversuchs als Spannungs-Dehnungs-Kurven  
(→Abschnitt 5.4.3.3)**

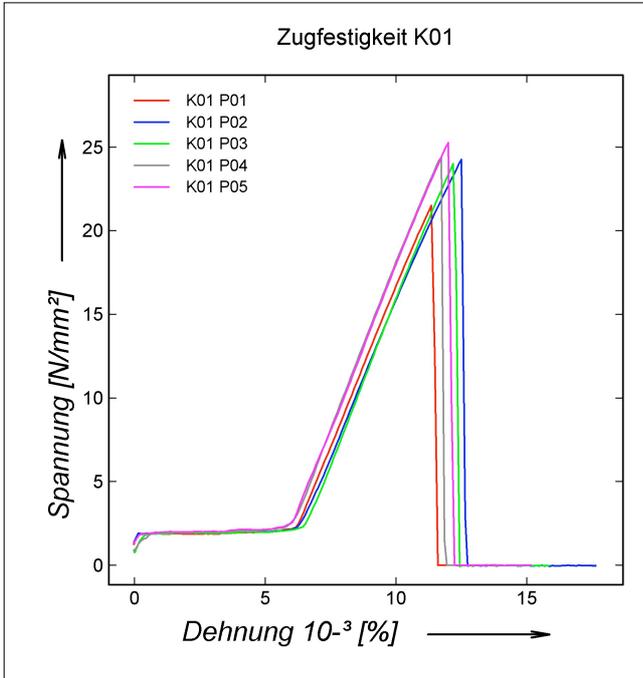


Abb. A13: Spannungs-Dehnungskurve für K01 im Zugversuch (DIN EN ISO 527-1)

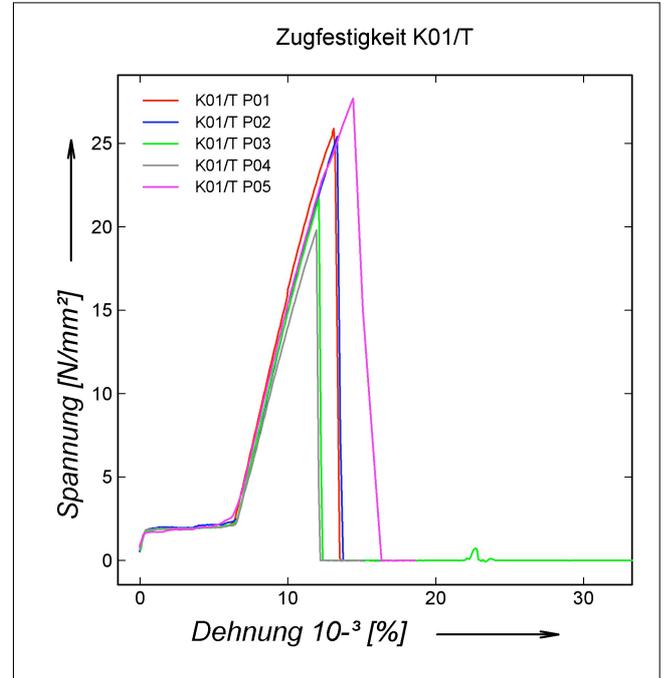


Abb. A14: Spannungs-Dehnungskurve für K01/T im Zugversuch (DIN EN ISO 527-1)

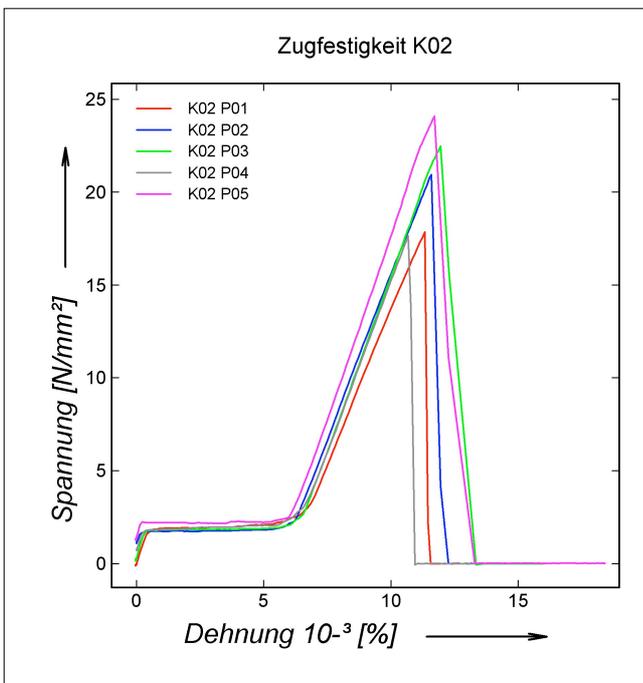


Abb. A15: Spannungs-Dehnungskurve für K02 im Zugversuch (DIN EN ISO 527-1)

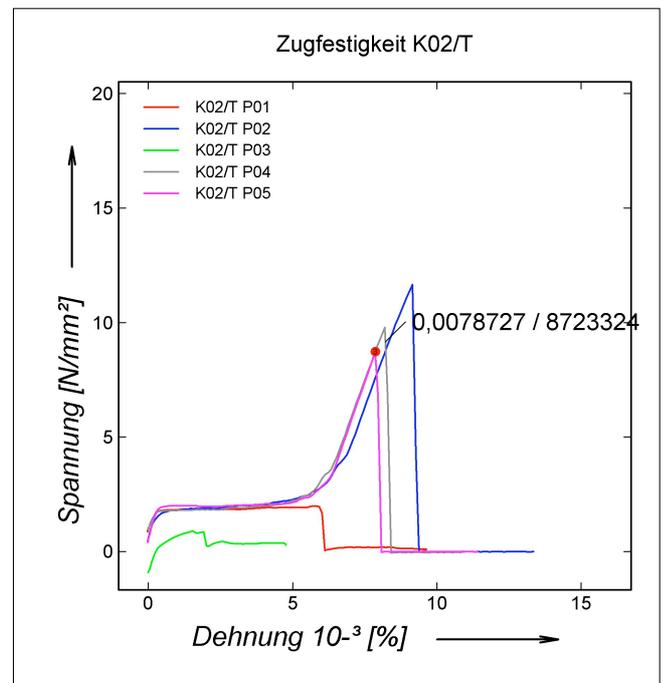


Abb. A16: Spannungs-Dehnungskurve für K02/T im Zugversuch (DIN EN ISO 527-1)