



Festigkeitsprüfungen des R&G Epoxydharzes L mit diversen Härtern aus dem R&G Lieferprogramm

Wir wollen Ihnen bewusst Ergebnisse anbieten, die auch in der Praxis reproduziert werden können!

Wir verwenden einen praxisgerechten Laminataufbau (quasiisotrop, also 0°/90° und ± 45° sowie symmetrisch). Auch das Verarbeitungsverfahren ist für jedermann reproduzierbar (Handlaminat mit 35–37 Vol. % Faservolumengehalt).

Die Herstellerangaben bei Festigkeitswerten enthalten oft Werte, die optimiert sind: durch die meist nicht praxisgerechte Faserorientierung von 0° / 90° und sehr hohe Faservolumengehalte von 40–45 Vol. %.

Auf die entsprechenden Faservolumengehalte und Faserorientierung hochgerechnet, werden keine großen Unterschiede in Zug-, Druck-, und Biegefestigkeit bzw. den Moduli mehr vorhanden sein.

Dies bedeutet beispielsweise, dass die mechanischen Eigenschaften einer Kombination von Epoxydharz L 1100 + EPH 294 (mit GL-Zulassung für Windkraftflügel) auch mit R&G Epoxydharz L + EPH 294 (ohne GL-Zulassung) quasi vergleichbar sind.

Sie können also ohne Bedenken das Epoxydharz L mit den nachfolgenden Härtern in den angegebenen Mischungsverhältnissen verarbeiten und die im Prüfbericht angegebenen, hohen Festigkeitswerte erzielen.

Anwendungstechnische Daten

	Mischungsverhältnis	Topfzeit
Epoxydharz L (Bestell-Nr. 100 135-X) + EPH 294 (Bestell-Nr. 103105-X)	100 : 31 Gewichtsteile	400 Minuten
Epoxydharz L (Bestell-Nr. 100 135-X) + EPH 295 (Bestell-Nr. 103 110-X)	100 : 31 Gewichtsteile	15 Minuten
Epoxydharz L (Bestell-Nr. 100 135-X) + EPH 500 (Bestell-Nr. 112 126-X)	100 : 63 Gewichtsteile	60 Minuten
Epoxydharz L (Bestell-Nr. 100 135-X) + Härter S (Bestell-Nr. 100 140-X)	100 : 40 Gewichtsteile	15 Minuten
Epoxydharz L (Bestell-Nr. 100 135-X) + Härter wasserklar (Bestell-Nr. 107 111-X)	100 : 35 Gewichtsteile	300 Minuten

Änderungen vorbehalten



Ermittlung des Einflusses verschiedener Härter in der Epoxidharz-Matrix L auf die mechanischen Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen

**Dokumentation der praktischen Fertigung, der experimentellen
Prüfung und der theoretischen Auswertung**

**Bearbeitung: Dipl.-Ing. Bertram Eversmann
Dipl.-Ing. Oliver Hecht**

Verfasser: Dipl.-Ing. Bertram Eversmann

Datum: 22. 12. 2008



Laminataufbau

Der Laminataufbau wird durch die in den Prüfnormen vorgegebenen Prüfkörperdicken und die angestrebte Orientierung der Materialeigenschaften der Verbundplatten bestimmt. Daher wurde der Laminataufbau in Abhängigkeit von der Laminatdicke der Einzelschicht so gewählt, dass eine Prüfkörperdicke von 3 mm bis 4 mm gefertigt werden konnte. Gleichzeitig wurde ein quasi-isotropes Materialverhalten realisiert. Dabei wurden die unterschiedlichen Bindungsarten der Gewebe für Glas- und Kohlenstofffasern berücksichtigt. Zur Berechnung wurde das Laminatdimensionierungstool LamiCens verwendet.

Laminataufbau CFK:

12 Lagen Kohlenstofffasergewebe Aero 200 g/m², Leinwandbindung,

	Ablagewinkel (Kette / Schuß)
1. Lage:	0° / 90°
2. Lage:	0° / 90°
3. Lage:	45° / -45°
4. Lage:	45° / -45°
5. Lage:	45° / -45°
6. Lage:	0° / 90°
7. Lage:	0° / 90°
8. Lage:	45° / -45°
9. Lage:	45° / -45°
10. Lage:	45° / -45°
11. Lage:	0° / 90°
12. Lage:	0° / 90°



Laminataufbau GFK:

12 Lagen Glasfasergewebe Aero 296 g/m², Atlasbindung,

Ablagewinkel (Kette / Schuß)	
1. Lage:	0° / 90°
2. Lage:	45° / -45°
3. Lage:	45° / -45°
4. Lage:	0° / 90°
5. Lage:	45° / -45°
6. Lage:	0° / 90°
7. Lage:	0° / 90°
8. Lage:	45° / -45°
9. Lage:	0° / 90°
10. Lage:	45° / -45°
11. Lage:	45° / -45°
12. Lage:	0° / 90°

Prüfkörperfertigung

Die Prüfkörperfertigung erfolgte im Wesentlichen in zwei Schritten. Zunächst wurden je zwei Verbundplatten der jeweiligen Materialkombinationen handlaminieren. Aus diesen Verbundplatten konnten für jede Prüfungsart die entsprechenden Prüfkörper gesägt werden. Die für die Zug- und Druckprüfung vorgeschriebenen Aufleimer wurden auf die Prüfkörper mit dem Kleber E aufgeklebt. Die Verbundplatten mit den Härtern EPH294 und EPH295 wurden entsprechend der Verarbeitungsvorschriften getempert. Damit der Einfluss der laminierenden Person auf das Laminierergebnis gering gehalten werden kann, wurde jeweils ein Fasermaterial ausschließlich von einer Person verarbeitet.

Fertigung durch:

- Laminieren GFK-Verbundplatten, Thomas Schöndube, Student WHZ
- Laminieren CFK-Verbundplatten, Kristin Arnhold, Studentin WHZ
- Sägen Prüfkörper Druck-, 3-Punkt-Biege-, Charpy-Schlagzähigkeitsprüfung, Dipl.-Ing. Bertram Eversmann
- Sägen Prüfkörper Zugprüfung und Kleben Aufleimer, Dipl.-Ing. Oliver Hecht



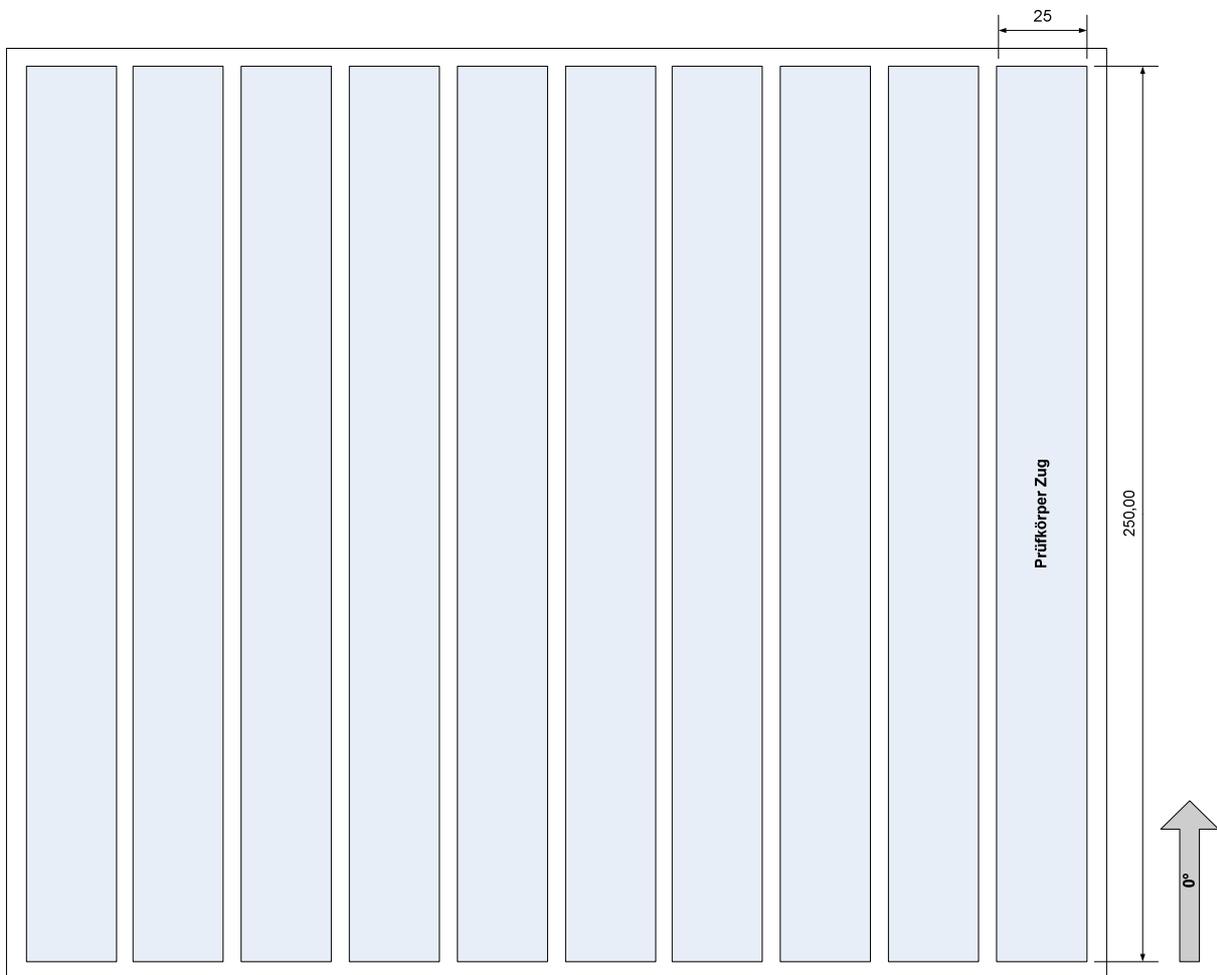
Tempern:

- EPH294, 10 Stunden bei 70 °C
- EPH295, 15 Stunden bei 80 °C

Schnittplan Verbundplatte 250 mm x 200 mm:



Schnittplan Verbundplatte 350 mm x 300 mm:



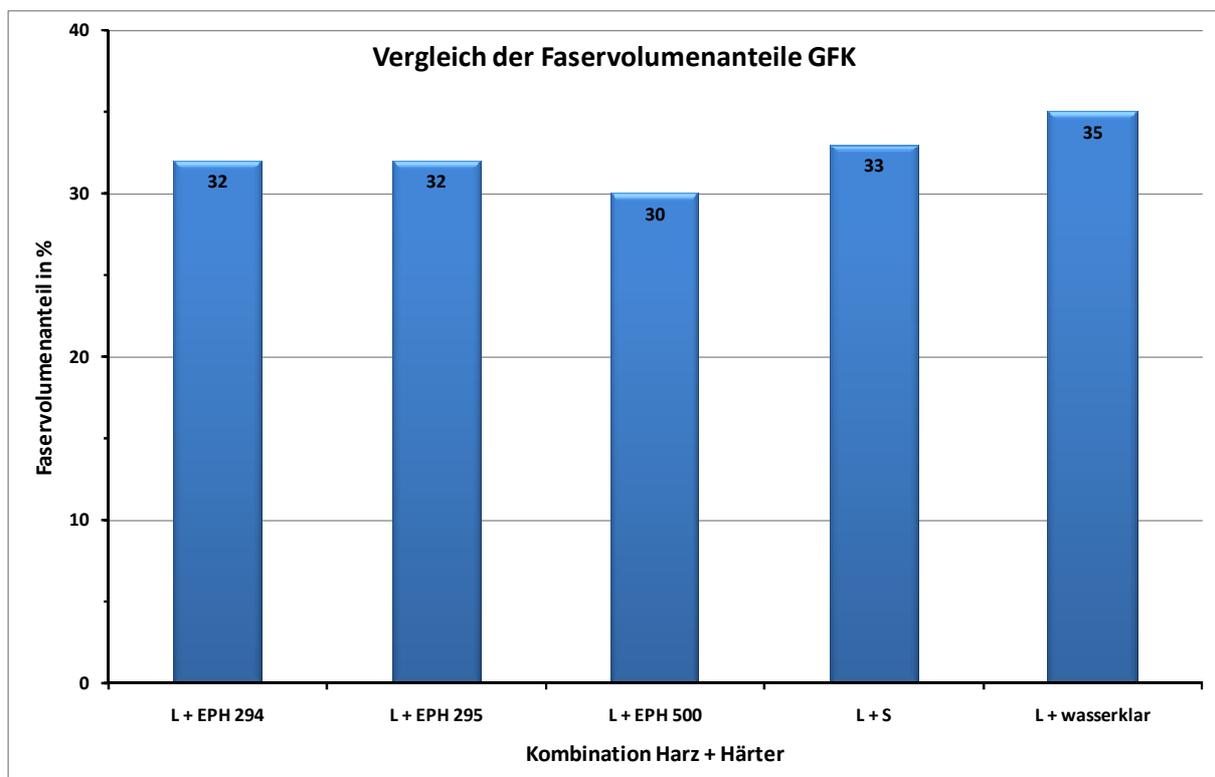


Faservolumenanteil

Die Bestimmung des Faservolumenanteils erfolgte rechnerisch über die Ermittlung der Gewichte der Faserzuschnitte, der Gewichte der laminierten Verbundplatten und der Dichten von Fasern und Matrices. Dabei wird zunächst der Fasermassenanteil aus den Gewichten der Fasern und der Verbundplatten ermittelt. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Dichten der verwendeten Materialien berechnet sich im zweiten Schritt der Faservolumenanteil. Diese Vorgehensweise wird gewählt, da die Bestimmung des Faservolumenanteils durch Veraschung oder naßchemische Extraktion nicht realisiert werden konnte. Daher sind die ermittelten Werte als Anhaltswerte und nicht als exakte Werte für den Faservolumenanteil anzusehen.

GFK:

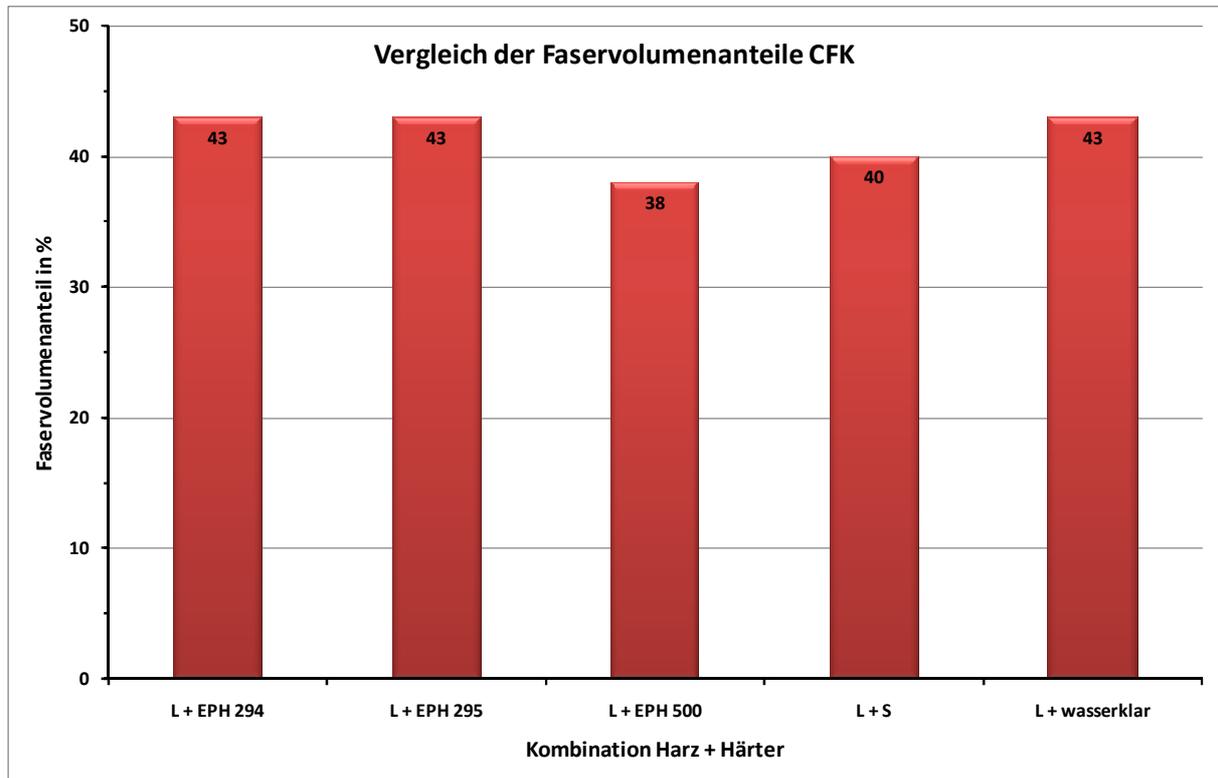
Vergleich Faservolumenanteile





CFK:

Vergleich Faservolumenanteile





Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
Prüfkörper		
b	Breite	mm
h	Dicke	mm
Zugprüfung		
E_t	Zug-E-Modul	MPa
σ_M	Zugfestigkeit	MPa
ε_M	Dehnung bei Zugfestigkeit	%
σ_B	Bruchspannung	MPa
ε_B	Bruchdehnung	%
ε_{tB}	Nominelle Dehnung bei Bruch	%
3-Punkt-Biegung		
E_f	Biege-E-Modul	MPa
σ_{fM}	Biegefestigkeit	MPa
ε_{fM}	Randfaserdehnung bei Biegefestigkeit	%
σ_{fB}	Biegespannung bei Bruch	MPa
ε_{fB}	Biege-Bruchdehnung	%
L_V	Auflagerabstand	mm
Druckprüfung		
E_c	Druck-E-Modul	MPa
σ_{cM}	Druckfestigkeit	MPa
S_0	Querschnitt Prüfkörper	mm ²
$L_{0,SW}$	Meßlänge	mm
Charpy-Schlagzähigkeit		
a_{cU}	Charpy-Schlagzähigkeit	kJ/m ²
Allgemein		
F_{max}	Kraftmaximum	N
Statistik		
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert, gerundet	-
s	Standardabweichung	-
v	Variationskoeffizient	-

Auswertung Zugprüfung

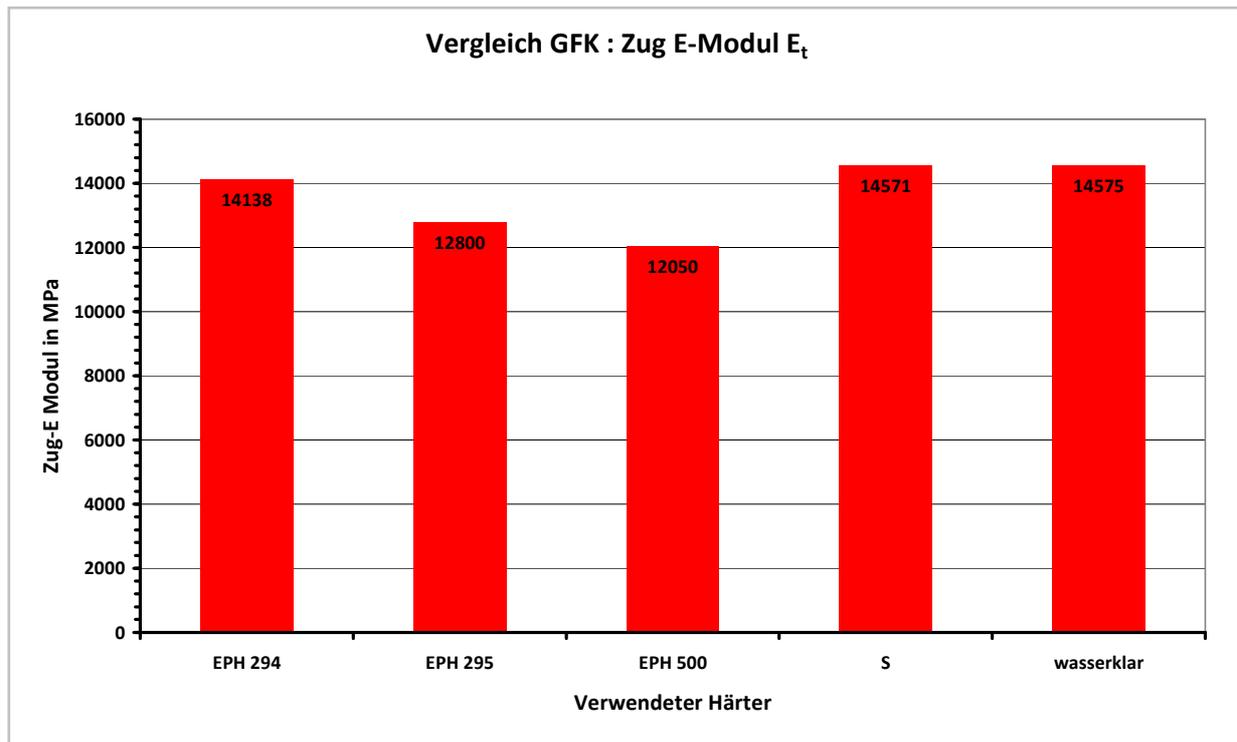
Die Prüfung und Auswertung erfolgte in Anlehnung an die Prüfnorm

DIN EN ISO 527-4.

Als Ergebnisse werden der Zug-E-Modul und die Zugfestigkeit dargestellt. Zur besseren statistischen Absicherung wurden der kleinste und der größte Meßwert bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

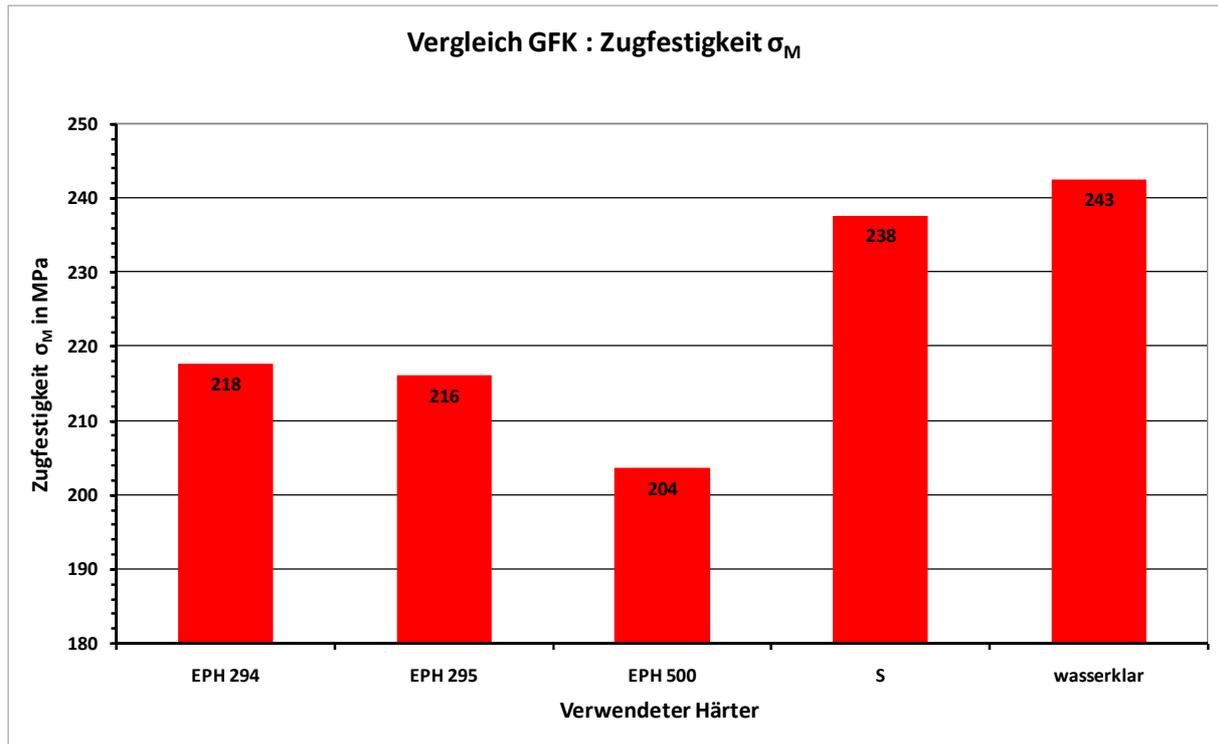
GFK:

Vergleichendes Ergebnis Zug E-Modul E_t





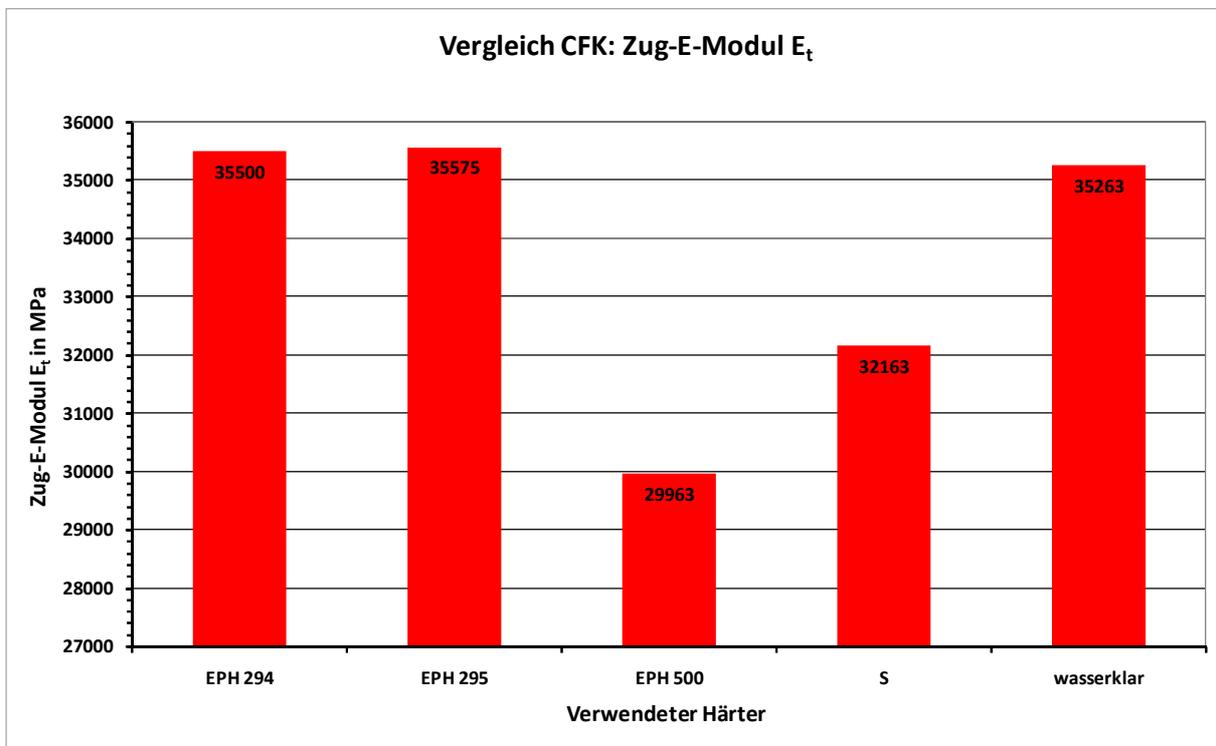
Vergleichendes Ergebnis Zugfestigkeit σ_M





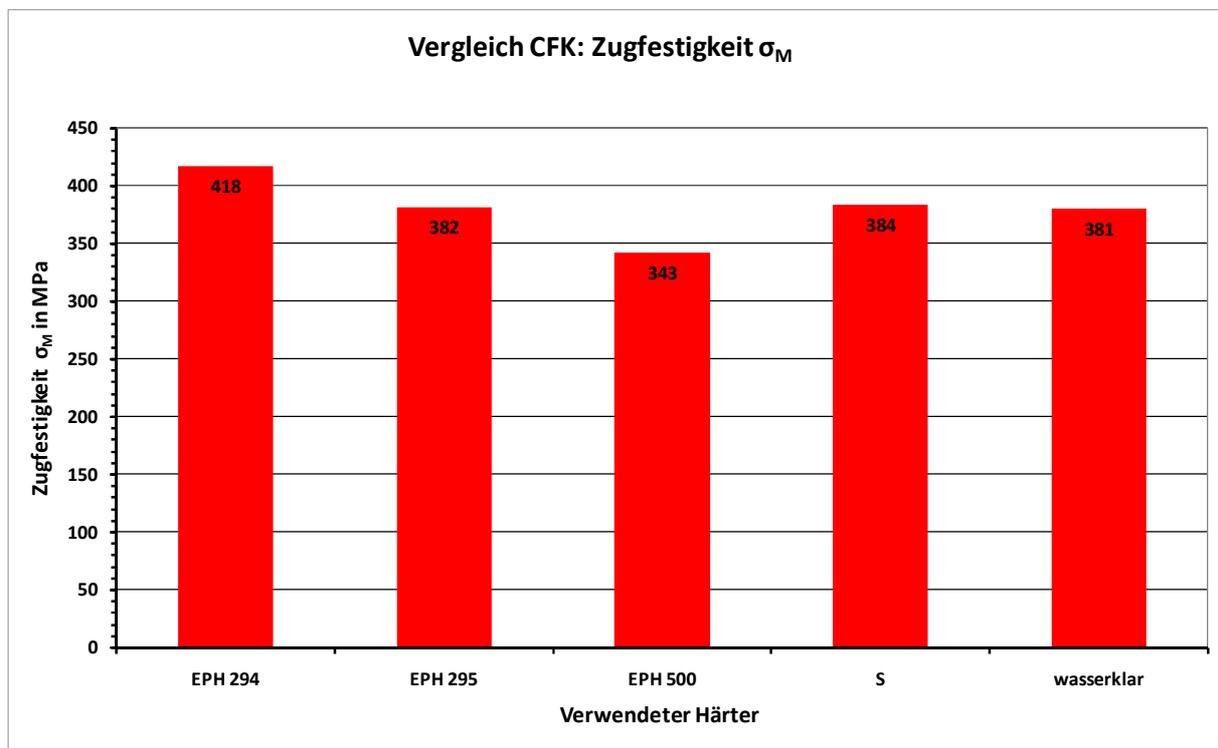
CFK:

Vergleichendes Ergebnis Zug-E-Modul E_t





Vergleichendes Ergebnis Zugfestigkeit σ_M





Auswertung Druckprüfung

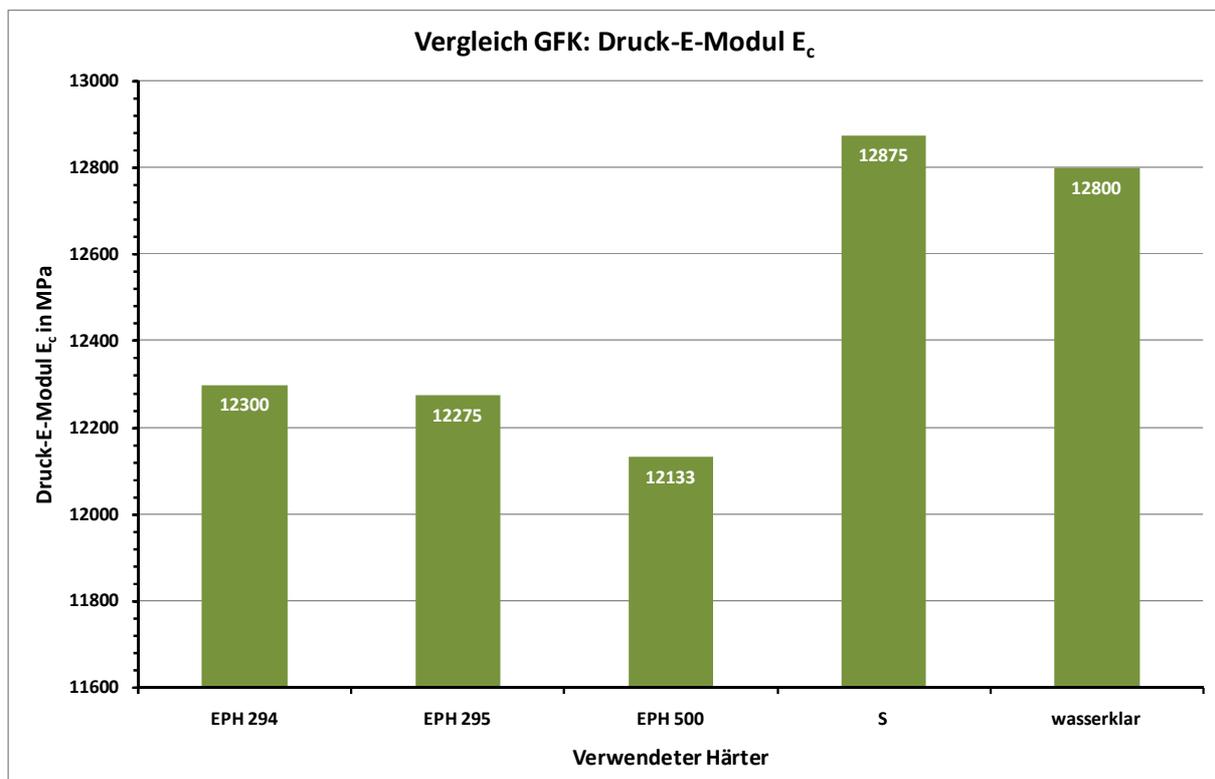
Die Prüfung und Auswertung erfolgte in Anlehnung an die Prüfnorm

DIN EN ISO 14126.

Als Ergebnisse werden der Druck-E-Modul und die Druckfestigkeit dargestellt. Zur besseren statistischen Absicherung wurden der kleinste und der größte Wert für die Druckfestigkeit, mit Ausnahme der Materialkombination CF+L+Härter S, bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Da bei der Bestimmung des Druck-E-Moduls nicht für alle Materialkombinationen 10 Prüfkörper meßtechnisch ausgewertet werden konnten, wurden mindestens 6 bis maximal 8 Prüfkörper pro Materialkombination für die Ergebniserstellung verwendet. Dabei wurde nach Möglichkeit das Ausschlussverfahren des kleinsten und größten Meßwertes angewendet. Die detaillierte Auflistung der Meßergebnisse ist den jeweiligen Prüfprotokollen zu entnehmen.

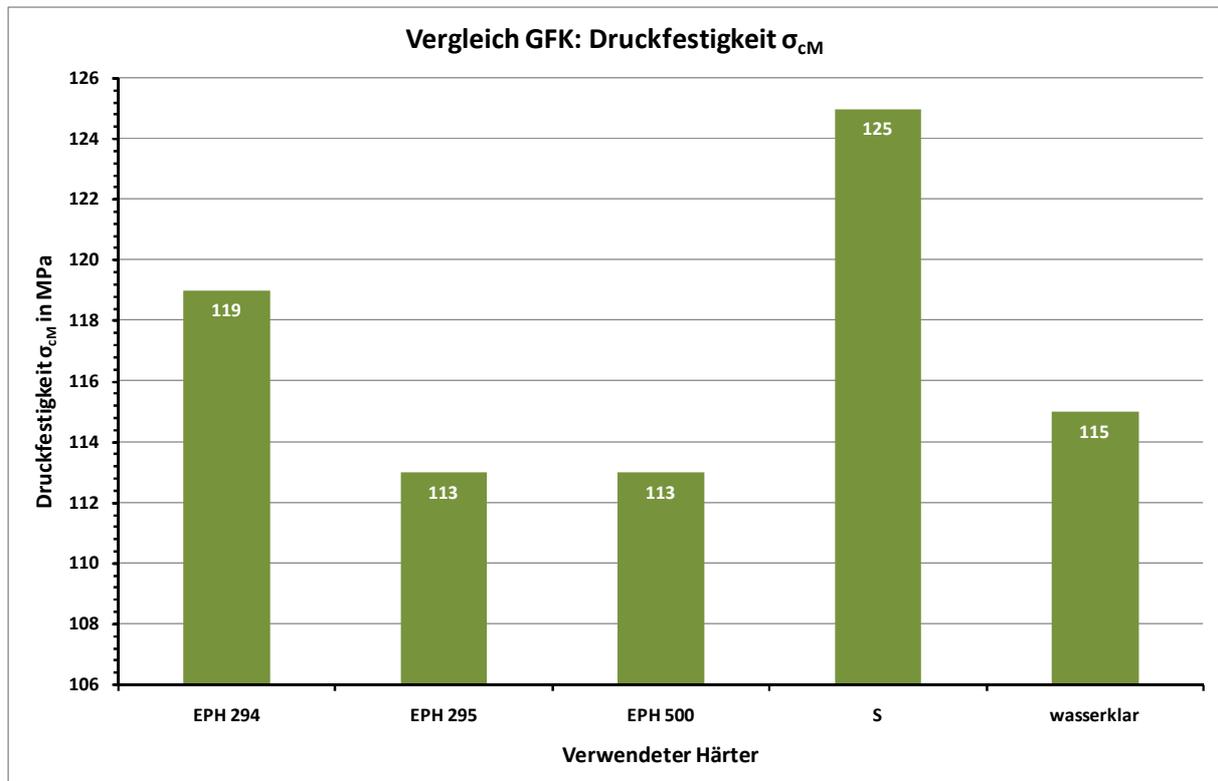
GFK:

Vergleichendes Ergebnis Druck-E-Modul E_c





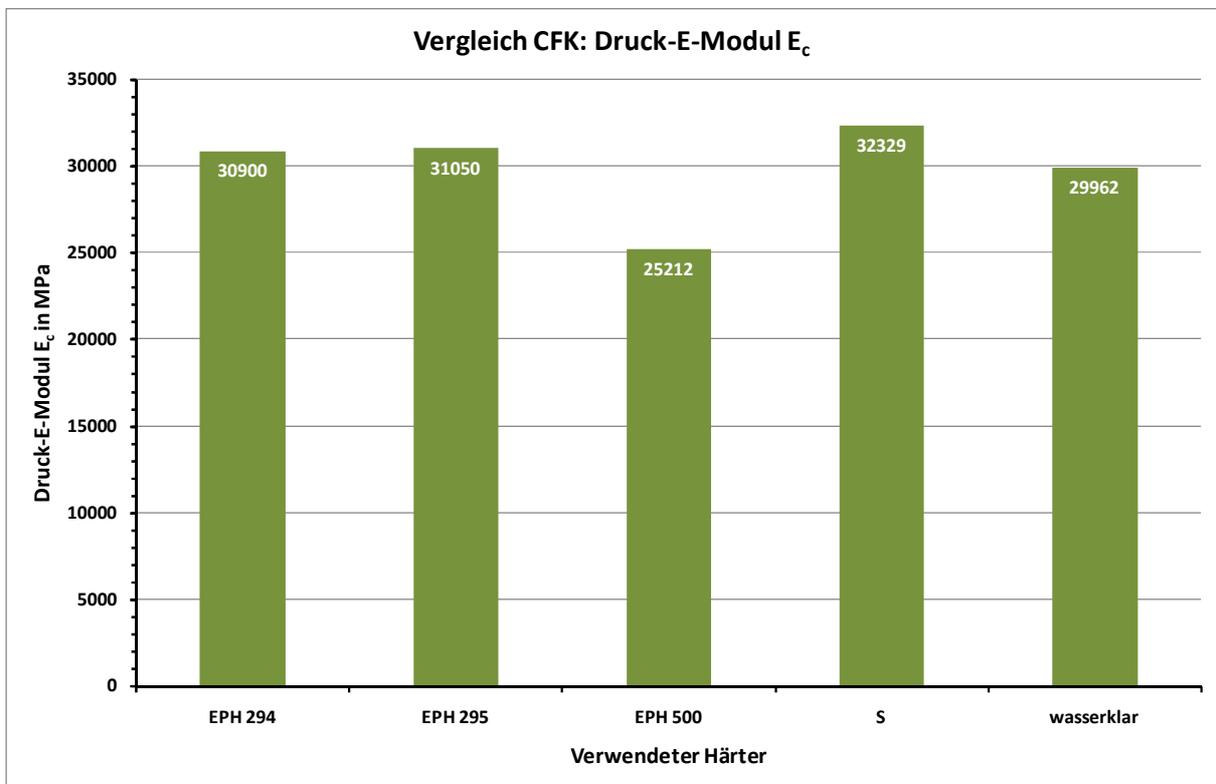
Vergleichendes Ergebnis Druckfestigkeit σ_{cM}





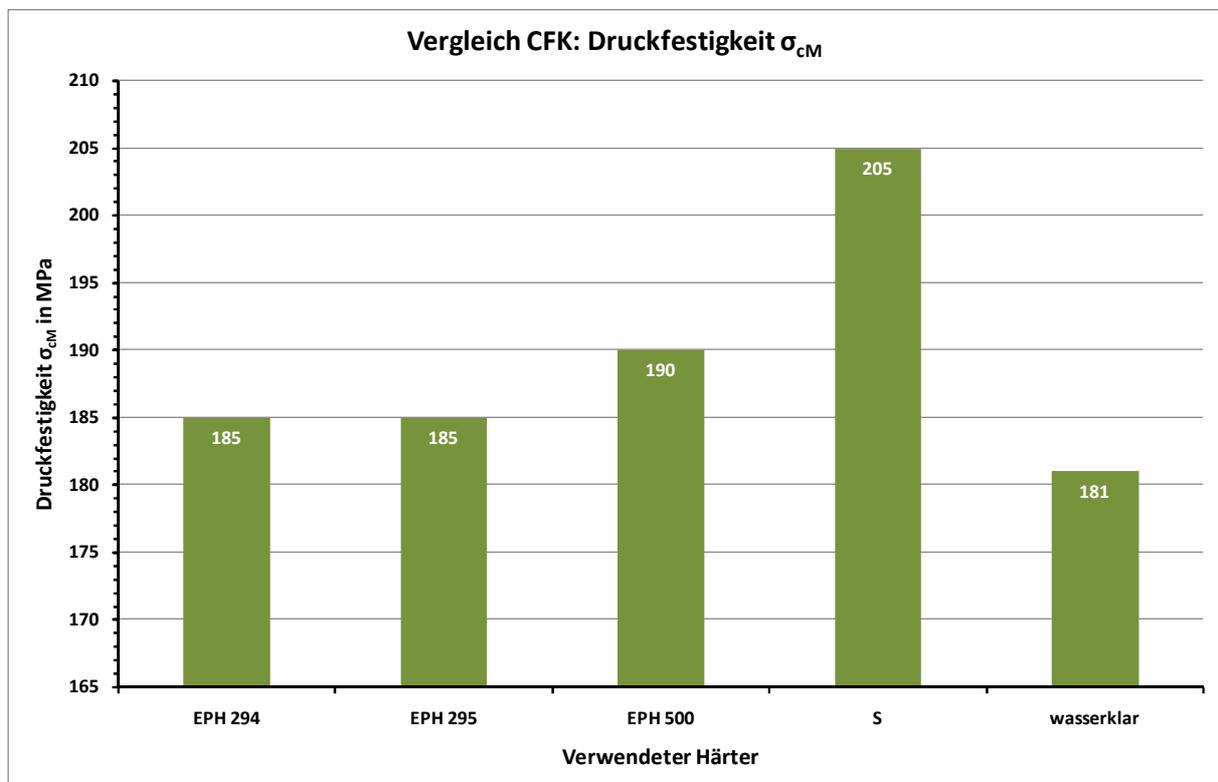
CFK:

Vergleichendes Ergebnis Druck-E-Modul E_c





Vergleichendes Ergebnis Druckfestigkeit σ_{cM}





Auswertung 3-Punkt-Biegeprüfung

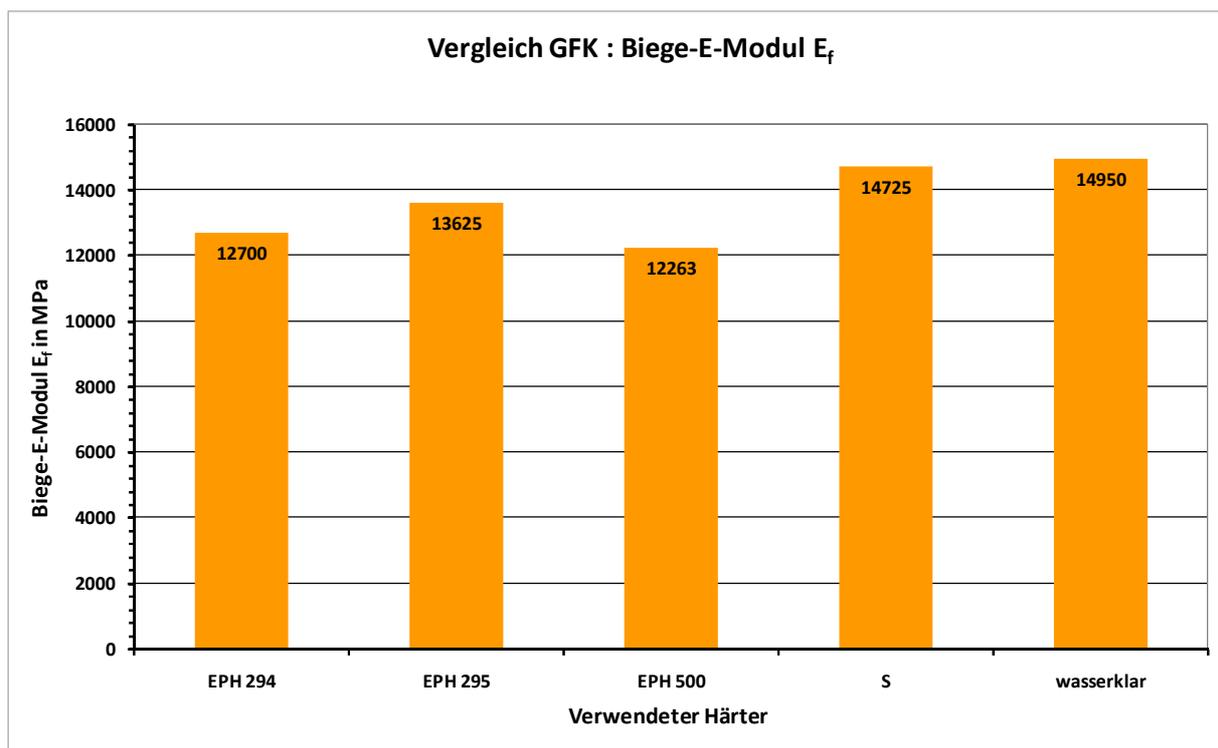
Die Prüfung und Auswertung erfolgte in Anlehnung an die Prüfnorm

DIN EN ISO 14125.

Als Ergebnisse werden der Biege-E-Modul und die Biegefestigkeit dargestellt. Zur besseren statistischen Absicherung wurden der kleinste und der größte Meßwert bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

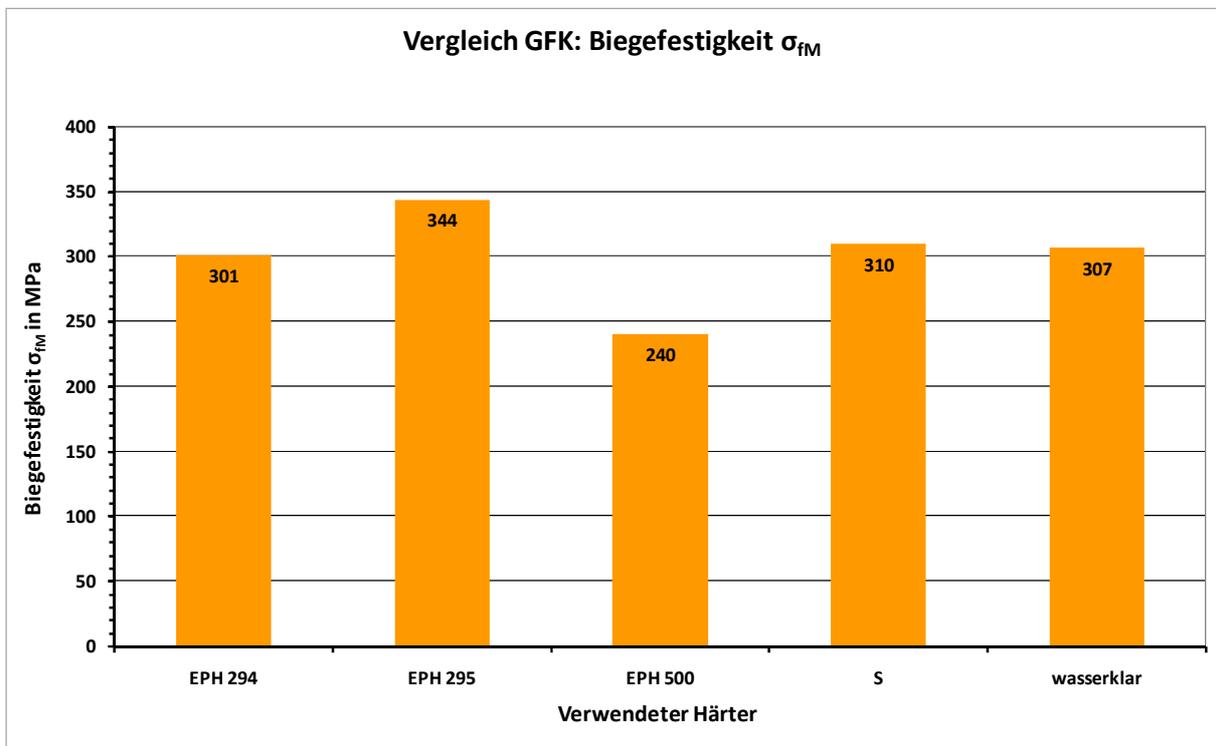
GFK:

Vergleichendes Ergebnis Biege-E-Modul E_f





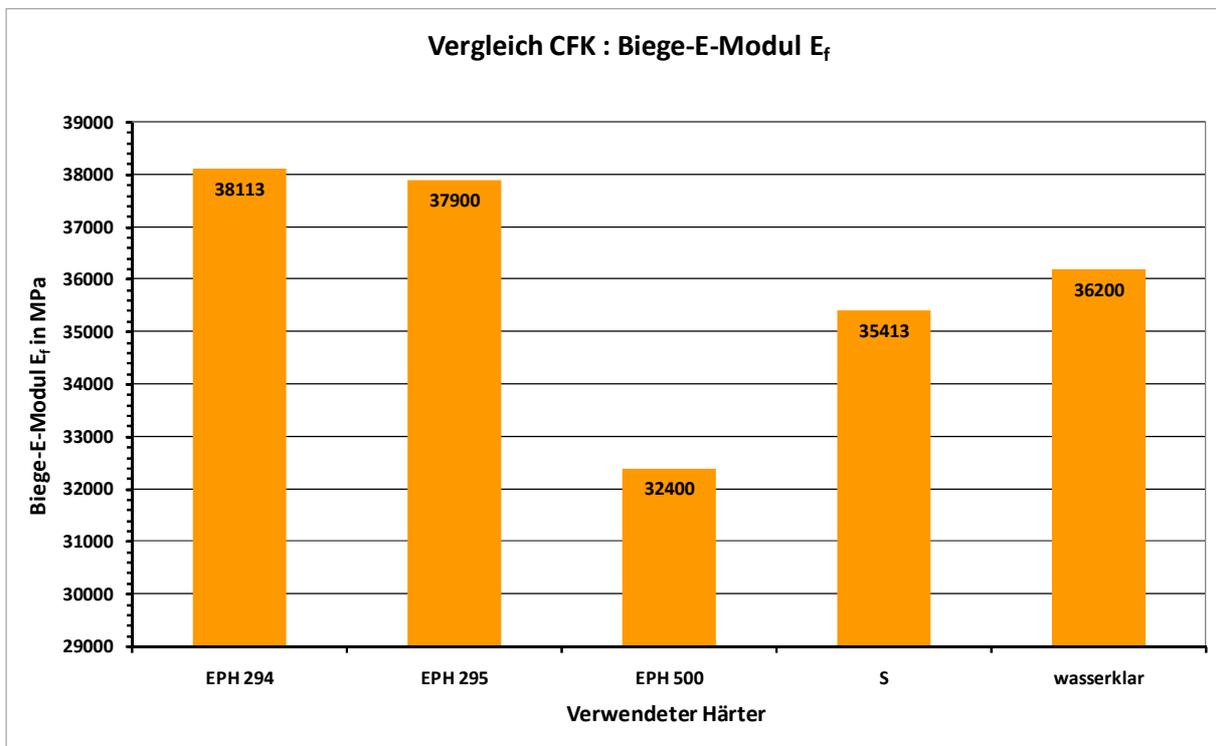
Vergleichendes Ergebnis Biegefestigkeit σ_{fM}





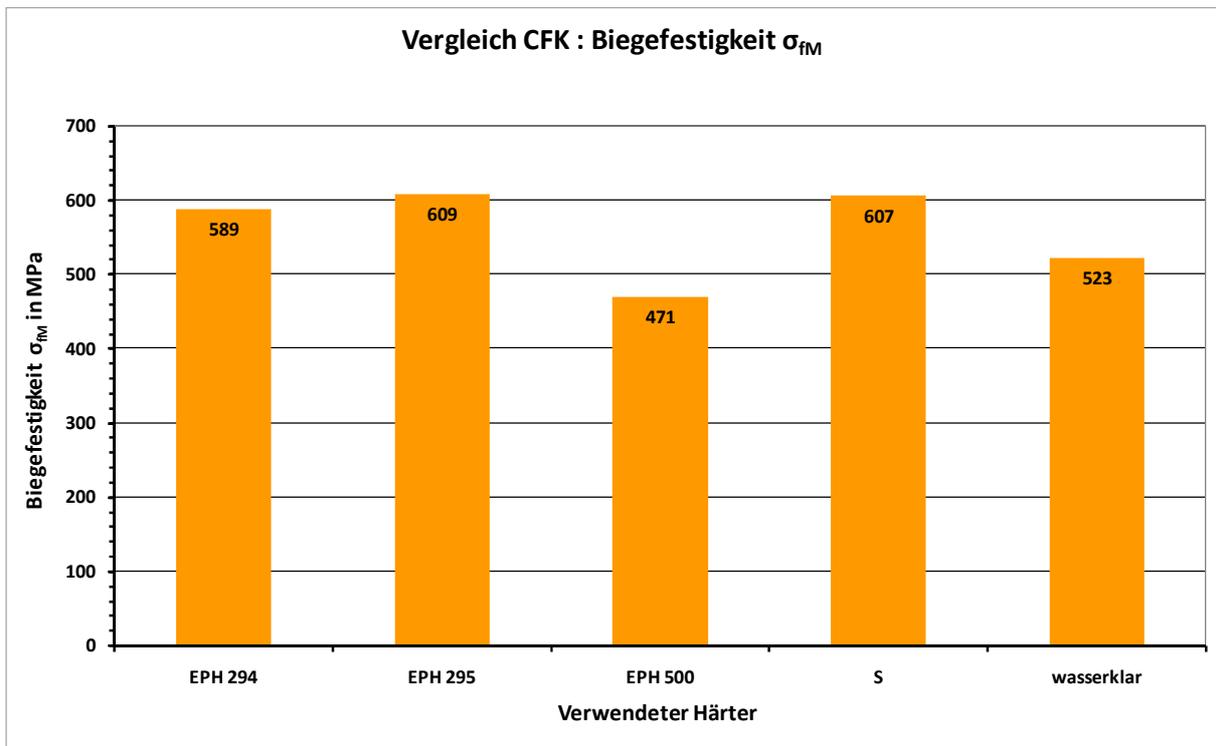
CFK:

Vergleichendes Ergebnis Biege-E-Modul E_f





Vergleichendes Ergebnis Biegefestigkeit σ_{fM}





Auswertung Charpy-Schlagzähigkeitsprüfung

Die Prüfung und Auswertung erfolgte in Anlehnung an die Prüfnorm

DIN EN ISO 179-1.

Zur besseren statistischen Absicherung wurden der kleinste und der größte Wert für die Charpy-Schlagzähigkeit bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Die Meßwerterfassung erfolgte vollständig mechanisch ohne elektronische Datenauswertung. Daher sind keine computerunterstützten Prüfprotokolle zur Darstellung der detaillierten Meßergebnisse der Dokumentation beigelegt.

GFK:

GF+L+EPH294

Probenr.	Breite b in mm	Dicke h in mm	korrigierte Arbeit (Messwert) in J	Charpy-Schlagzähigkeit in kJ/m ²
1	9,98	4,38	12	274,522
2	9,95	4,42	13	295,596
3	9,96	4,24	15	355,194
4	10,02	4,28	14	326,450
5	10	4,27	13,5	316,159
6	10,04	4,39	14	317,636
7	9,69	4,36	14	331,373
8	9,97	4,35	13	299,750
9	10,01	4,48	13	289,889
10	10,43	4,34	13	287,190
			Mittelwert:	308,005

 kleinster Wert
 größter Wert



GF+L+EPH295

Probenr.	Breite b in mm	Dicke h in mm	korrigierte Arbeit (Messwert) in J	Charpy-Schlagzähigkeit in kJ/m ²
1	10,21	3,94	13	323,163
2	10,2	3,92	13	325,130
3	10,18	3,99	13,5	332,363
4	10,18	4	14	343,811
5	10,18	3,88	13	329,127
6	10,14	3,9	13,5	341,375
7	10,18	3,89	13,5	340,907
8	10,16	4,01	12,5	306,812
9	10,16	3,99	13,5	333,018
10	10,22	4,05	14	338,238
			Mittelwert:	332,915

 kleinster Wert
 größter Wert

GF+L+EPH500

Probenr.	Breite b in mm	Dicke h in mm	korrigierte Arbeit (Messwert) in J	Charpy-Schlagzähigkeit in kJ/m ²
1	10,13	4,42	16	357,345
2	10,11	4,12	14,5	348,113
3	10,12	4,13	16	382,815
4	9,98	4,25	17	400,802
5	10,11	4,09	15	362,758
6	10,12	4,33	16,5	376,544
7	10,14	4,18	16	377,490
8	10,15	4,18	16	377,118
9	10,13	4,36	17	384,904
10	10,14	4,12	16	382,988
			Mittelwert:	375,245

 kleinster Wert
 größter Wert



GF+L+S

Probenr.	Breite b in mm	Dicke h in mm	korrigierte Arbeit (Messwert) in J	Charpy-Schlagzähigkeit in kJ/m ²
1	10,17	3,84	15	384,095
2	10,19	3,88	15	379,390
3	10,21	3,87	15,5	392,279
4	10,21	3,85	15	381,597
5	10,2	3,86	13	330,184
6	10,23	3,87	15	378,883
7	10,2	3,84	15	382,966
8	10,19	3,85	14,5	369,601
9	10,28	3,88	15	376,068
10	10,19	3,85	14	356,856
			Mittelwert:	376,182

 kleinster Wert
 größter Wert

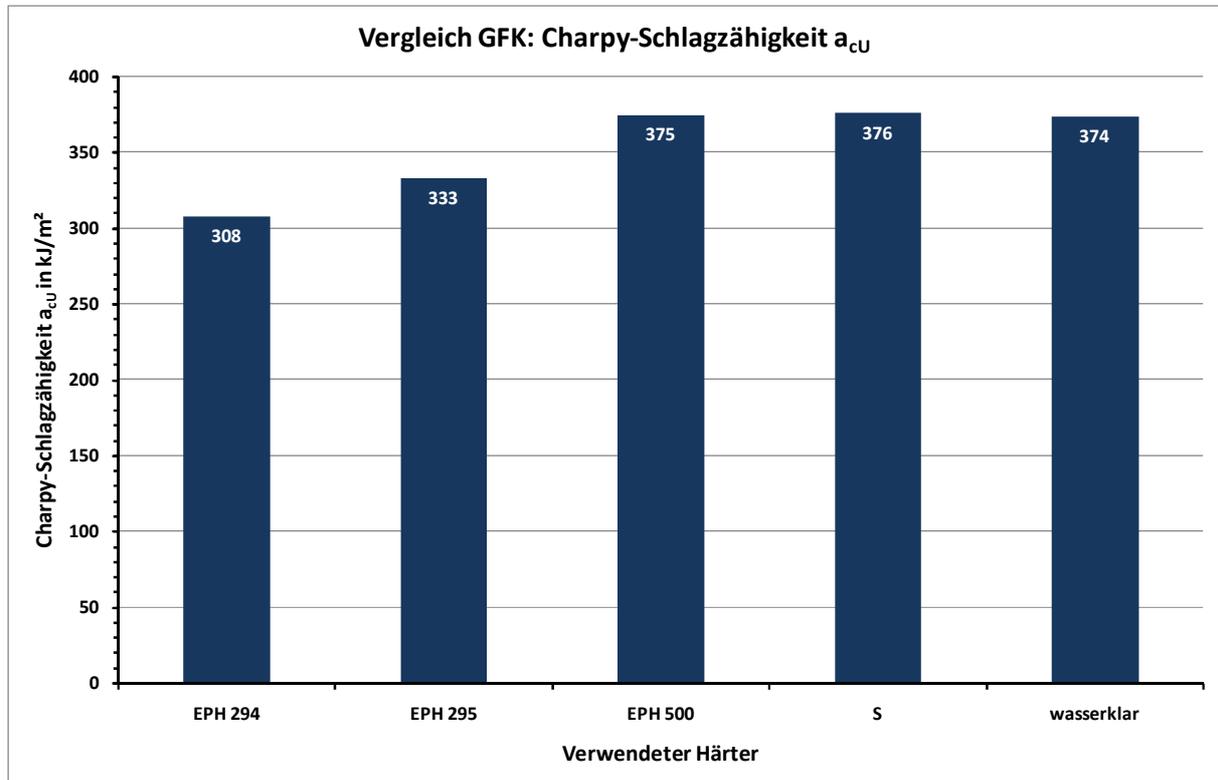
GF+L+wasserklar

Probenr.	Breite b in mm	Dicke h in mm	korrigierte Arbeit (Messwert) in J	Charpy-Schlagzähigkeit in kJ/m ²
1	10,24	3,74	14,5	378,614
2	10,22	3,72	15	394,546
3	10,17	3,79	14	363,218
4	10,21	3,71	13	343,197
5	10,22	3,72	14	368,243
6	10,25	3,79	15	386,125
7	10,24	3,75	14	364,583
8	10,22	3,77	14,5	376,336
9	10,18	3,82	14	360,012
10	10,18	3,76	15,5	404,945
			Mittelwert:	373,960

 kleinster Wert
 größter Wert



Vergleichendes Ergebnis GFK





CFK:

CF+L+EPH294

Probenr.	Breite b in mm	Dicke h in mm	korrigierte Arbeit (Messwert) in J	Charpy-Schlagzähigkeit in kJ/m ²
1	9,92	2,97	7	237,591
2	9,95	2,92	6,5	223,721
3	9,98	2,93	6,5	222,288
4	9,94	3,01	8,5	284,097
5	9,94	2,9	7	242,836
6	9,84	2,93	7	242,793
7	9,9	2,98	7	237,272
8	9,95	3,01	6	200,337
9	9,96	2,91	8	276,018
10	9,94	2,97	7,5	254,050
			Mittelwert:	242,071

 kleinster Wert
 größter Wert

CF+L+EPH295

Probenr.	Breite b in mm	Dicke h in mm	korrigierte Arbeit (Messwert) in J	Charpy-Schlagzähigkeit in kJ/m ²
1	10,21	2,94	8	266,512
2	10,09	2,97	5,5	183,533
3	10,14	3,02	7,5	244,916
4	10,22	2,98	7	229,843
5	10,2	2,99	8	262,312
6	10,21	2,97	8	263,820
7	10,18	2,98	9	296,673
8	10,17	2,96	6,5	215,924
9	10,18	2,93	7	234,684
10	9,98	2,95	6	203,797
			Mittelwert:	240,226

 kleinster Wert
 größter Wert



CF+L+EPH500

Probennr.	Breite b in mm	Dicke h in mm	korrigierte Arbeit (Messwert) in J	Charpy-Schlagzähigkeit in kJ/m ²
1	10,18	3,11	8	252,686
2	10,16	3,18	8,5	263,086
3	10,15	3,16	9	280,601
4	10,16	3,09	9	286,675
5	10,2	3,2	8	245,098
6	10,19	3,11	9	283,993
7	10,03	3,08	8,5	275,149
8	10,19	3,19	9,5	292,253
9	10,07	3,15	7	220,677
10	10,15	3,14	9	282,388
			Mittelwert:	271,210

 kleinster Wert
 größter Wert

CF+L+S

Probennr.	Breite b in mm	Dicke h in mm	korrigierte Arbeit (Messwert) in J	Charpy-Schlagzähigkeit in kJ/m ²
1	10,13	3,1	9	286,597
2	10,17	3,07	8	256,230
3	10,08	3,11	7	223,294
4	10,16	3,12	9,5	299,692
5	10,13	3,04	8,5	276,017
6	10,14	3,1	11	349,940
7	10,19	3,04	10,5	338,955
8	10,18	3,08	9,5	302,988
9	10,17	3,14	9,5	297,490
10	10,17	3,13	8	251,319
			Mittelwert:	288,661

 kleinster Wert
 größter Wert



CF+L+wasserklar

Probenr.	Breite b in mm	Dicke h in mm	korrigierte Arbeit (Messwert) in J	Charpy-Schlagzähigkeit in kJ/m ²
1	10,22	3,04	8,5	273,586
2	10,04	3,05	6	195,938
3	10,18	3,02	7	227,690
4	10,17	3,04	6	194,069
5	10,15	3,04	5,5	178,247
6	10,12	2,98	6	198,955
7	10,17	3,04	6	194,069
8	10,12	2,98	5,5	182,375
9	10,19	3	9	294,406
10	10,08	3	7	231,481
			Mittelwert:	212,270

 kleinster Wert
 größter Wert



Vergleichendes Ergebnis CFK

