

## 5. Ergebnisse

### 5.1. Vorversuche

#### 5.1.1. Biegefestigkeitsbestimmung in den Vorversuchen

Die Biegefestigkeitswerte der DC Cristall verwandten Keramiken MVR, MHR, VL, HL und HP wurden in Abbildung 5.1. graphisch dargestellt. Vor der Bestimmung der Biegefestigkeit erfolgte die thermische Nachbehandlung der Keramiken bei einem Temperaturmaximum von 1000°C. Die Messwerte sind im Anhang (Tab 9.1.-9.5.) nachschlagbar.

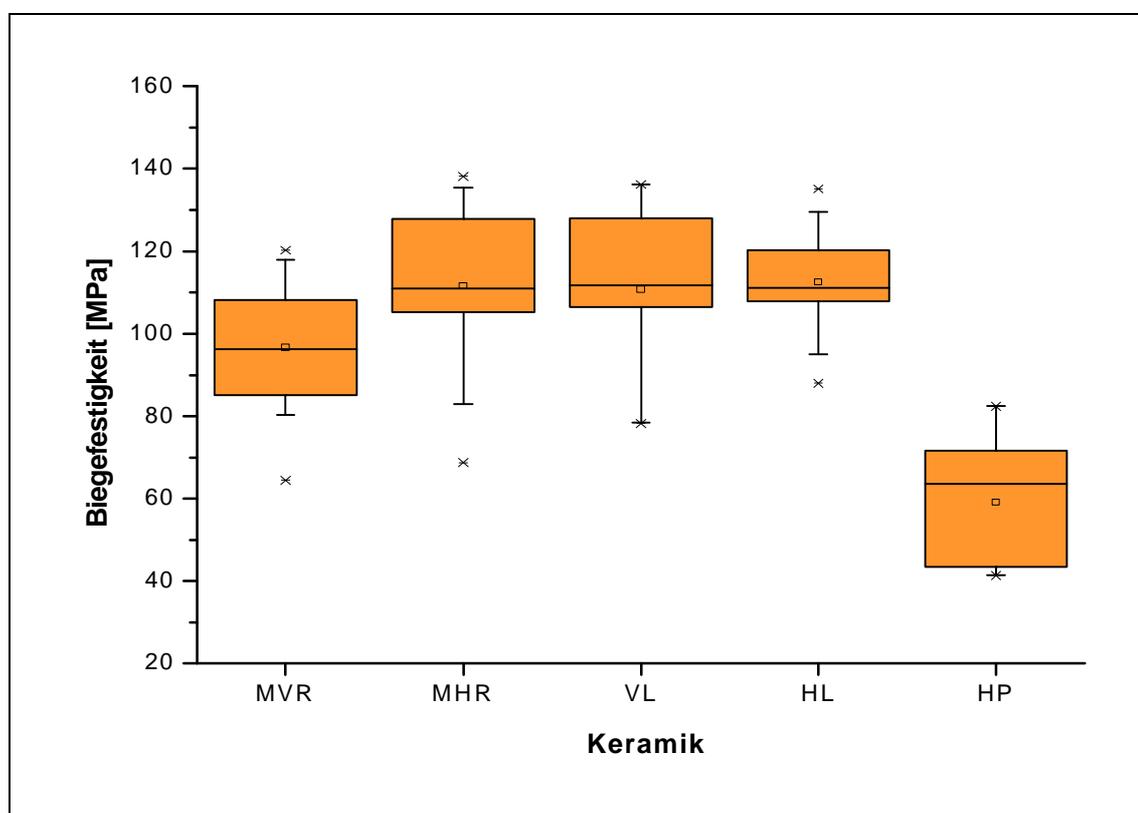


Abb. 5.1.: Biegefestigkeitswerte der Keramiken MVR, MHR, VL, HL, HP

Die Keramiken MHR, VL und HL erreichten Biegefestigkeitswerte von über 110 MPa. Die zwischen MHR, VL und HL festgestellten Abweichungen lagen im nicht signifikanten Bereich (siehe Tab. 5.1.). Eine mittlere Biegefestigkeit von 96,60 MPa ( $\pm 15,16$  MPa) erzielte die Keramik MVR. Sie unterschied sich somit signifikant von den anderen geprüften Keramiken der Voruntersuchung. Die Keramiken MVR, MHR, VL und HL besaßen nach dem Brand eine nur leichte Brennhaut und zeigten eine hohe Formbeständigkeit und Kantenfestigkeit.

Ebenfalls von den betrachteten Keramiken signifikant abweichend zeigte sich die Keramik HP. Ihre mittlere Biegefestigkeit betrug 59,07 MPa ( $\pm 15,28$  MPa). Dieser Wert lag weit unter den Biegefestigkeitswerten der anderen DC Cristall-Vorstufen. Die Standardabweichung der Keramik HP lag bei annähernd 25%. Bei der Herstellung der Prüfkörper wies das Material eine extrem hohe Sprödigkeit auf. Das Abtrennen der Prüfkörper von dem Preform-Block verursachte stets Abplatzungen. Nach dem Brand besaß die Keramik HP eine stark glasierte Oberfläche und aufgrund der hohen Transparenz ein glasähnliches Aussehen. Der Brennvorgang führte zu einer Abrundung der Ecken, was auf eine geringe Kantenfestigkeit schließen lässt.

Tab. 5.1.: Ergebnisse der statistischen Auswertung der Vorversuche

	<b>MVR</b>	<b>MHR</b>	<b>VL</b>	<b>HL</b>	<b>HP</b>
	$\bar{x} = 96,60$ MPa $s = 15,16$ MPa $v = 0,16$	$\bar{x} = 111,61$ MPa $s = 18,37$ MPa $v = 0,16$	$\bar{x} = 110,74$ MPa $s = 17,85$ MPa $v = 0,16$	$\bar{x} = 112,56$ MPa $s = 11,90$ MPa $v = 0,11$	$\bar{x} = 59,07$ MPa $s = 15,28$ MPa $v = 0,26$
<b>MHR</b>	F= 5,56 t= 2,36 p= 0,026 <b>signifikant</b>				
<b>VL</b>	F= 5,11 t= 2,26 p= 0,032 <b>signifikant</b>	F= 0,016 t= -0,13 p= 0,900 nicht signifikant			
<b>HL</b>	F= 9,61 t= 3,10 p= 0,004 <b>signifikant</b>	F= 0,03 t= -0,16 p= 0,872 nicht signifikant	F= 0,1 t= 0,32 p= 0,753 nicht signifikant		
<b>HP</b>	F=26,45 t= -5,14 p= $5 \cdot 10^{-5}$ <b>signifikant</b>	F= 39,36 t= -6,27 p= $4 \cdot 10^{-6}$ <b>signifikant</b>	F= 39,73 t= -6,30 p= $4 \cdot 10^{-6}$ <b>signifikant</b>	F= 72,67 t= -8,52 p= $4 \cdot 10^{-8}$ <b>signifikant</b>	

Der Einfluss des Schleifgrades auf den Wert der Biegefestigkeit wurde an den Keramiken MVR, MHR und VL untersucht. In der Tabelle 5.2. erfolgte eine Gegenüberstellung der Biegefestigkeitsmittelwerte sowie der aufgetretenen Standardabweichungen ausschließlich gesägter Prüfkörper und getrimmter Proben (10  $\mu$ m). Die Messwerte sind dem Anhang (Tab 9.6-9.8) zu entnehmen.

Bei der Prüfung der Abhängigkeit des Biegefestigkeitswertes von der Vorbehandlung (Schleifgrad) wurde für die getrimmten Prüfkörper ein tendentiell höherer Wert als für die gesägten Keramiken ermittelt.

Tab. 5.2.: Einfluss des Schleifgrades auf den Wert der Biegefestigkeit

Keramik	$S_{\text{gesägt}}$ [MPa]	$S_{10\ \mu\text{m}}$ [MPa]
MVR	73,14 ± 20,05	78,53 ± 16,17
MHR	87,38 ± 17,92	100,61 ± 17,74
VL	74,24 ± 13,20	78,28 ± 9,70

Aus der statistischen Untersuchung ergab sich bei einem festgelegten Signifikanzniveau von 0,05 jedoch kein signifikanter Unterschied (siehe Tab. 5.3.).

Tab. 5.3.: Ergebnisse der statistischen Auswertung – Einflussnahme des Schleifgrades auf den Biegefestigkeitswert

	F	t	p	
MVR (gesägt) – MVR (getrimmt)	0,35	0,59	0,562	nicht signifikant
MHR (gesägt) – MHR (getrimmt)	2,21	1,49	0,157	nicht signifikant
VL (gesägt) – VL (getrimmt)	0,49	0,70	0,496	nicht signifikant

### 5.1.2. Weibullanalyse der Vorversuche

Die Weibull-Diagramme der in den Vorversuchen geprüften Keramiken sind im Anhang nachschlagbar (Abb. 9.1.–9.4.). In der Tabelle 5.4. wurden für die Keramiken MVR, MHR, VL und HL der Weibullmodul, die mittlere Biegefestigkeit  $\sigma$  und die Weibullfestigkeit  $\sigma_0$  aufgeführt.

Die keramischen Werkstoffe MVR, MHR und VL erzielten einen vergleichbaren Weibullmodul von annähernd 7. Mit einem Wert von 6,53 wurde für MHR der geringste Weibullmodul festgestellt, während HL mit 10,93 den größten Weibullmodul aufwies. HL besitzt dementsprechend die geringste Streuung in den Festigkeitswerten.

Tab. 5.4.: Gegenüberstellung der Weibullmodule, Biegefestigkeitswerte sowie der Weibullfestigkeit der Entwicklungsvorstufen von DC Cristall

Keramik	Weibullmodul	$s$ [MPa]	$s_0$ [MPa]
MVR	7,13	96,57	120,30
MHR	6,53	111,57	103,54
VL	6,86	110,80	117,92
HL	10,93	112,47	117,92

Die Weibullfestigkeit der Keramiken MVR, VL und HL überstieg jeweils die mittlere Biegefestigkeit. Ausschließlich die Weibullfestigkeit des keramischen Materials MHR erreichte nicht den Wert der Biegefestigkeit. Die größte Differenz zwischen Weibullfestigkeit und Biegefestigkeit tritt bei der Keramik MVR auf. Die Abweichung betrug annähernd 20%.

Für die Keramik HP wurde die Weibullanalyse nicht vorgenommen, da aufgrund der hohen Sprödigkeit der Keramik nur wenige Prüfkörper hergestellt werden konnten. Auch die Weibullanalysen der Keramiken MVR, MHR, VL und HL aus den Voruntersuchungen basierten auf Prüfreihe von unter 30 Biegefestigkeitswerten, so dass die erzielten Werte nur eine Tendenz zeigen.

### 5.1.3. Risszähigkeitsbestimmung in den Vorversuchen

Die Risszähigkeit der verschiedenen Entwicklungsvorstufen der Keramik DC Cristall wurde an den thermisch nachbehandelten Keramiken ( $T_{\max} = 1000^{\circ}\text{C}$ ) ermittelt.

Die gering glasierten Oberflächen und die kristallinen Oberflächenstrukturen der Keramiken MVR, MHR, VL, HL erschwerten die lichtmikroskopische Auswertung der erzeugten Rissmuster. Die erzielten Vickershärteeindrücke und die von ihnen ausgehenden Risse waren aufgrund der inhomogenen Oberflächenstruktur der Prüfkörper in ihrer Dimension nur schwer einzuschätzen. Anders verhielt sich die Keramik HP, die infolge ihrer stark glasierten Prüfkörperoberfläche und der nichtkristallinen Oberflächenstruktur eine gute Abgrenzung der Rissmuster ermöglichte.

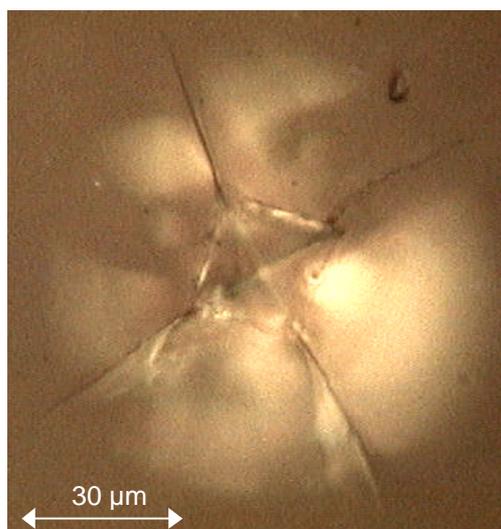


Abb. 5.2.: Lichtmikroskopisches Bild der Keramik HP

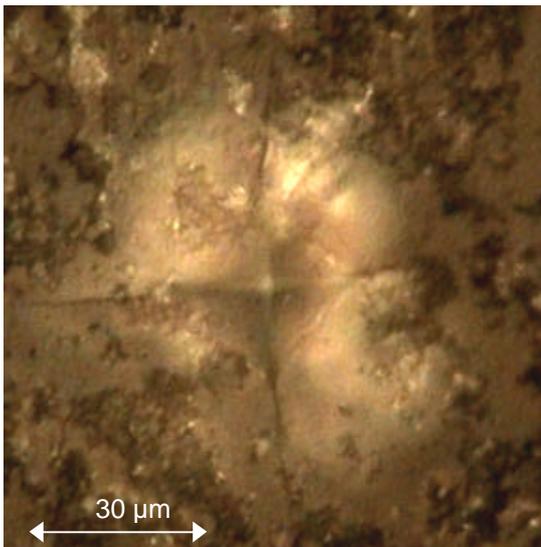


Abb. 5.3.: Lichtmikroskopisches Bild der Keramik MHR

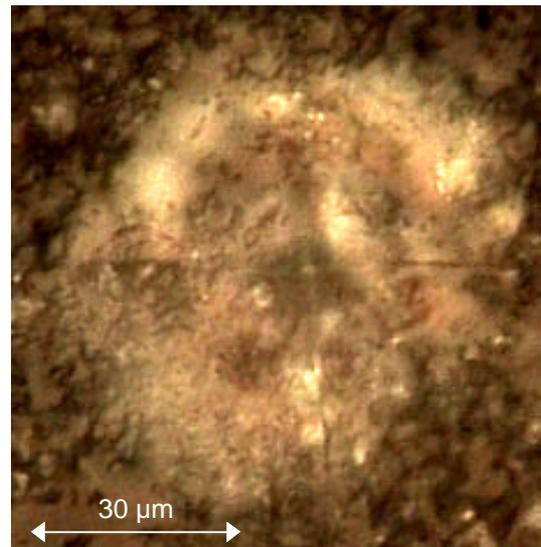


Abb. 5.4.: Lichtmikroskopisches Bild der Keramik MVR

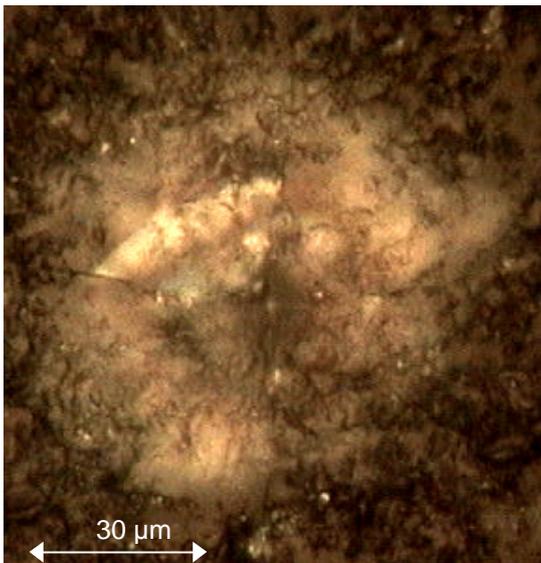


Abb. 5.5.: Lichtmikroskopisches Bild der Keramik VL

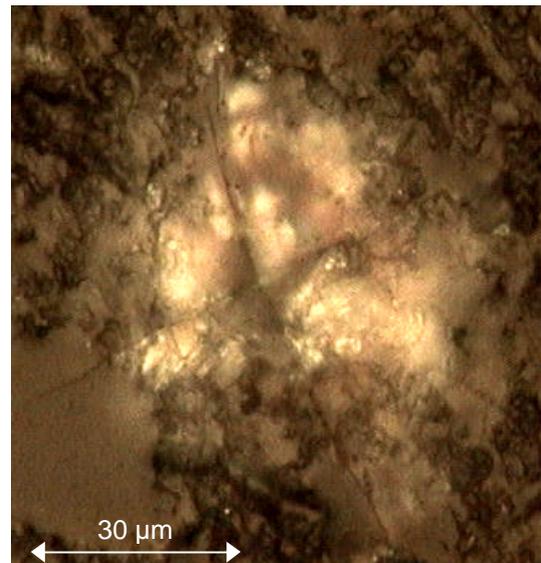


Abb. 5.6.: Lichtmikroskopisches Bild der Keramik HL

Die Tabelle 5.5. bietet einen Überblick über die Abhängigkeit des Risszähigkeitswertes vom angewendeten Rechenansatz. In der Tabelle wurden die Mittelwerte der kritischen Risszähigkeit gegenübergestellt, die bei Anwendung der verschiedenen Berechnungsmöglichkeiten erzielt wurden. Die Messwerte sind im Anhang in den Tabellen 9.9. bis 9.13. aufgeführt. Die Vickershärteeindrücke wurden mit einer Kraft von 4,9 N gesetzt.

Tab. 5.5.: Vergleich der aus den verschiedenen Rechenansätzen resultierenden durchschnittlichen  $K_{IC}$ -Werte für MVR, MHR, VL, HL, HP (4,9 N Eindruckskraft) in  $\text{MPa m}^{1/2}$

	MVR	MHR	VL	HL	HP
<b>Rissübergreifend <math>K_{IC}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>					
Anstis (12)	0,85 $\pm 0,03$	0,82 $\pm 0,09$	0,95 $\pm 0,14$	0,82 $\pm 0,10$	0,71 $\pm 0,03$
<b>Medianer-Riss <math>K_{IC}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>					
Lawn/ Evans/ Marshall (13)	0,72 $\pm 0,03$	0,69 $\pm 0,08$	0,80 $\pm 0,11$	0,69 $\pm 0,08$	0,60 $\pm 0,03$
Niihara (14)	1,38 $\pm 0,06$	1,37 $\pm 0,15$	1,57 $\pm 0,21$	1,32 $\pm 0,15$	1,13 $\pm 0,06$
<b>Palmqvist-Riss <math>K_{IC}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>					
Anstis <sub>Munz/Fett</sub> (15)	0,85 $\pm 0,03$	0,82 $\pm 0,09$	0,95 $\pm 0,14$	0,82 $\pm 0,10$	0,71 $\pm 0,03$
Niihara (17)	1,25 $\pm 0,04$	1,30 $\pm 0,07$	1,39 $\pm 0,09$	1,21 $\pm 0,07$	1,08 $\pm 0,03$
Evans/ Charles (18)	1,41 $\pm 0,10$	1,55 $\pm 0,17$	1,74 $\pm 0,18$	1,32 $\pm 0,13$	1,05 $\pm 0,06$
Lawn/ Fuller (19)	1,36 $\pm 0,09$	1,50 $\pm 0,17$	1,68 $\pm 0,18$	1,28 $\pm 0,12$	1,01 $\pm 0,06$

Tab. 5.6.: Vergleich der aus den verschiedenen Rechenansätzen resultierenden durchschnittlichen  $K_{IC}$ -Werte für MVR, MHR, VL, HL, HP (3,92 N Eindruckskraft) in  $\text{MPa m}^{1/2}$

	MVR	MHR	VL	HL	HP
<b>Rissübergreifend <math>K_{IC}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>					
Anstis (12)	0,92 $\pm 0,10$	1,00 $\pm 0,13$	1,07 $\pm 0,03$	1,05 $\pm 0,21$	0,80 $\pm 0,03$
<b>Medianer-Riss <math>K_{IC}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>					
Lawn/ Evans/ Marshall (13)	0,77 $\pm 0,09$	0,84 $\pm 0,11$	0,90 $\pm 0,02$	0,89 $\pm 0,18$	0,68 $\pm 0,02$
Niihara (14)	1,48 $\pm 0,17$	1,67 $\pm 0,21$	1,78 $\pm 0,05$	1,73 $\pm 0,34$	1,28 $\pm 0,04$
<b>Palmqvist-Riss <math>K_{IC}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>					
Anstis <sub>Munz/Fett</sub> (15)	0,92 $\pm 0,10$	1,00 $\pm 0,13$	1,07 $\pm 0,03$	1,05 $\pm 0,21$	0,80 $\pm 0,03$
Niihara (17)	1,27 $\pm 0,08$	1,42 $\pm 0,10$	1,46 $\pm 0,03$	1,43 $\pm 0,17$	1,14 $\pm 0,04$
Evans/ Charles (18)	1,49 $\pm 0,17$	1,88 $\pm 0,24$	1,96 $\pm 0,09$	1,85 $\pm 0,35$	1,23 $\pm 0,09$
Lawn/ Fuller (19)	1,44 $\pm 0,16$	1,82 $\pm 0,23$	1,89 $\pm 0,09$	1,79 $\pm 0,33$	1,18 $\pm 0,09$

Es wurde ein E-Modul von 73,4 GPa für alle Keramiken verwendet, der von GEIS-GERSTORFER [37] als durchschnittlicher Wert empfohlen wurde. Parallel wurde eine Messreihe durchgeführt, in der die Vickershärteeindrücke mit einer Kraft von 3,92 N aufgebracht wurden, um die Einflussnahme der Belastung auf den Wert der Risszähigkeit abschätzen zu können (siehe Tab. 5.6.).

Beim Vergleich der mit den unterschiedlichen Rechenansätzen erzielten Risszähigkeitswerte wird deutlich, dass die beiden auf ANSTIS basierenden Rechenansätze (Gleichung 12 und 15) zu identischen  $K_{Ic}$ -Werten führten. Die Abhängigkeit des Risszähigkeitswertes von der einwirkenden Kraft wurde statistisch in der Tabelle 5.7. ausgewertet.

Tab. 5.7.: Statistische Auswertung der Abhängigkeit des Risszähigkeitswertes von der aufgetragenen Last

	F	t	p	
<b>MVR (3,92 N) – MVR (4,9 N)</b>	1,45	-1,21	0,262	nicht signifikant
<b>MHR (3,92 N) – MHR (4,9 N)</b>	5,22	-2,29	0,052	nicht signifikant
<b>VL (3,92 N) – VL (4,9 N)</b>	3,32	-1,82	0,106	nicht signifikant
<b>HL (3,92 N) – HL (4,9 N)</b>	4,23	-2,06	0,074	nicht signifikant
<b>HP (3,92 N) – HP (4,9 N)</b>	19,38	-4,40	0,002	<b>signifikant</b>

Die Gegenüberstellung der  $K_{Ic}$ -Werte, die aus einer Belastung des Indenters mit 4,9 N und 3,92 N resultierten, zeigt auf, dass die größere Krafteinwirkung mit einem verringerten Risszähigkeitswert einhergingen. Eine signifikante Abweichung lag allerdings nur für die Risszähigkeitswerte der Keramik HP vor, während sich die Einflussnahme der Belastung auf die kritische Risszähigkeit der Keramiken MVR, MHR, VL und HL als nicht signifikant darstellte.

Die Tabelle 5.8. stellt die mit dem Rechenansätzen nach ANSTIS (Gleichung 12) erzielten Risszähigkeitswerte der untersuchten Keramik statistisch gegenüber. Die Gegenüberstellung der Risszähigkeitswerte der untersuchten Keramiken zeigte, dass das keramische Material VL mit  $0,95 \text{ MPa m}^{1/2}$  die höchste kritische Risszähigkeit erreichte. Die kleinste Risszähigkeit wies die Keramik HP auf, die sich mit einer mittleren Bruchzähigkeit von  $0,71 \text{ MPa m}^{1/2}$  signifikant von den Keramiken VL und MVR unterschied. Die Abweichung zu den Keramiken MHR und HL lag im nicht signifikanten Bereich.

Tab. 5.8.: Statistische Gegenüberstellung der nach ANSTIS berechneten Risszähigkeitswerte der Keramiken MVR, MHR, VL, HL und HP (in  $\text{MPa m}^{1/2}$ ), Indenterbelastung 4,9 N

	<b>MVR</b>	<b>MHR</b>	<b>VL</b>	<b>HL</b>	<b>HP</b>
	$\bar{x} = 0,85$ $s = 0,03$ $v = 0,04$	$\bar{x} = 0,82$ $s = 0,09$ $v = 0,11$	$\bar{x} = 0,95$ $s = 0,14$ $v = 0,15$	$\bar{x} = 0,82$ $s = 0,10$ $v = 0,12$	$\bar{x} = 0,71$ $s = 0,03$ $v = 0,04$
<b>MHR</b>	F= 0,41 t= -0,64 p= 0,540 nicht signifikant				
<b>VL</b>	F= 1,98 t= 1,41 p= 0,197 nicht signifikant	F= 2,49 t= 1,58 p= 0,154 nicht signifikant			
<b>HL</b>	F= 0,40 t= -0,63 p= 0,546 nicht signifikant	F= $8 \cdot 10^{-4}$ t= -0,03 p= 0,978 nicht signifikant	F= 2,42 t= -1,55 p= 0,159 nicht signifikant		
<b>HP</b>	F= 35,00 t= -5,92 p= $4 \cdot 10^{-4}$ <b>signifikant</b>	F= 4,64 t= -2,15 p= 0,063 nicht signifikant	F= 11,65 t= -3,41 p= 0,009 <b>signifikant</b>	F= 3,84 t= -1,96 p= 0,086 nicht signifikant	

## 5.2. DC Cristall

### 5.2.1. Biegefestigkeit

Das Diagramm in der Abbildung 5.7. verdeutlicht die Abhängigkeit des Biegefestigkeitswertes der Keramik DC Cristall von der Art der Nachbehandlung. Die Messwerte sind in den Tab. 9.14. bis 9.18. des Anhangs aufgelistet. Die Tabelle 5.9. zeigt die Ergebnisse der statistischen Untersuchung.

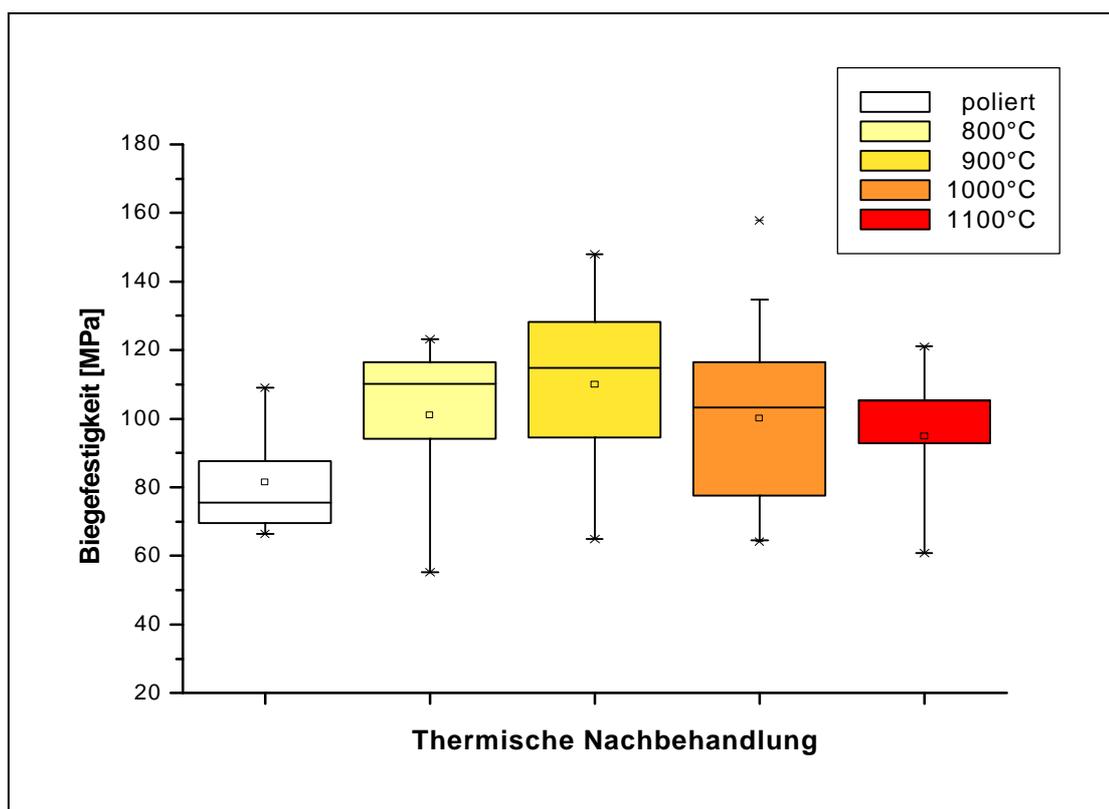


Abb. 5.7.: Gegenüberstellung der Biegefestigkeitswerte der unterschiedlich nachbehandelten Keramik DC Cristall

Mit 81,48 MPa ( $\pm 15,30$  MPa) erzielte die ungebrannte, mit einer Korngröße von 10  $\mu\text{m}$  polierte Keramik die geringste Biegefestigkeit. Eine deutliche Festigkeitssteigerung konnte nach Vornahme einer abschließenden Temperung beobachtet werden. Die thermische Nachbehandlung der Keramik ging jedoch nur bis zu einer Brenntemperatur von 1000°C mit einer signifikanten Erhöhung des Biegefestigkeitswertes einher, so dass bei einer weiteren Erhöhung der Brenntemperatur auf 1100°C die Differenz zum Biegefestigkeitswert der ungebrannten Keramik auf nicht signifikant abfiel. Die bei 1100°C gebrannte Keramik erreichte eine mittlere Biegefestigkeit von 94,95 MPa ( $\pm 22,12$  MPa).

Die höchste Biegefestigkeit wurde mit 109,99 MPa ( $\pm 24,20$  MPa) bei einer Brenntemperatur von 900°C erzielt. Nach einer Temperung mit maximal 800°C und 1000°C resultierte eine Biegefestigkeit von annähernd 100 MPa.

Tab. 5.9.: Ergebnisse der statistisch ausgewerteten Biegefestigkeitsuntersuchung der unterschiedlich nachbehandelten Keramik DC Cristall

	poliert	800°C	900°C	1000°C	1100°C
	$\bar{x}$ = 81,48 MPa s = 15,30 MPa v = 0,19	$\bar{x}$ = 100,97 MPa s = 20,84 MPa v = 0,21	$\bar{x}$ = 109,99 MPa s = 24,20 MPa v = 0,22	$\bar{x}$ = 100,05 MPa s = 23,37 MPa v = 0,23	$\bar{x}$ = 94,95 MPa s = 22,12 MPa v = 0,23
800°C	F= 4,54 t= 2,13 p= 0,049 <b>signifikant</b>				
900°C	F= 7,93 t= 2,82 p= 0,012 <b>signifikant</b>	F= 0,64 t= 0,80 p= 0,436 nicht signifikant			
1000°C	F= 4,78 t= 2,19 p= 0,035 <b>signifikant</b>	F= 0,01 t= -0,10 p= 0,919 nicht signifikant	F= 1,17 t= -1,08 p= 0,287 nicht signifikant		
1100°C	F= 1,36 t= 1,17 p= 0,268 nicht signifikant	F= 0,19 t= -0,43 p= 0,673 nicht signifikant	F= 0,95 t= -0,98 p= 0,35 nicht signifikant	F= 0,16 t= -0,4 p= 0,692 nicht signifikant	

Bei einer Brenntemperatur von 900°C wurde eine dünne Brennhaut hervorgerufen, während bei einem Temperaturmaximum von 1000°C eine gut glasierte Oberfläche entstand. Gleichzeitig erhöhte sich die Transparenz der Keramik, wodurch sie ein glasähnliches Aussehen erhielt. Bei einer weiteren Erhöhung der Brenntemperatur auf 1100°C, geht die Formbeständigkeit und Kantenfestigkeit des keramische Material verloren. Es erwies sich als unmöglich, bei einem Temperaturmaximum von 1100°C unbeschädigte Prüfkörper herzustellen. Während des Abkühlvorganges zersprang die gebrannte Keramik ohne äußere Einwirkung, wodurch glasartige Splitter aber auch größere Bruchstücke entstanden. Die größten Bruchstücke wurden in diesem Fall für die Biegefestigkeitsprüfung verwendet.

### 5.2.2. Weibullanalyse

Die Abbildung 5.8. zeigt das Weibulldiagramm der Keramik DC Cristall. Die Weibullanalyse erfolgte an Prüfkörpern, die einem Brennvorgang mit einem Temperaturmaximum von 1000°C unterzogen worden sind.

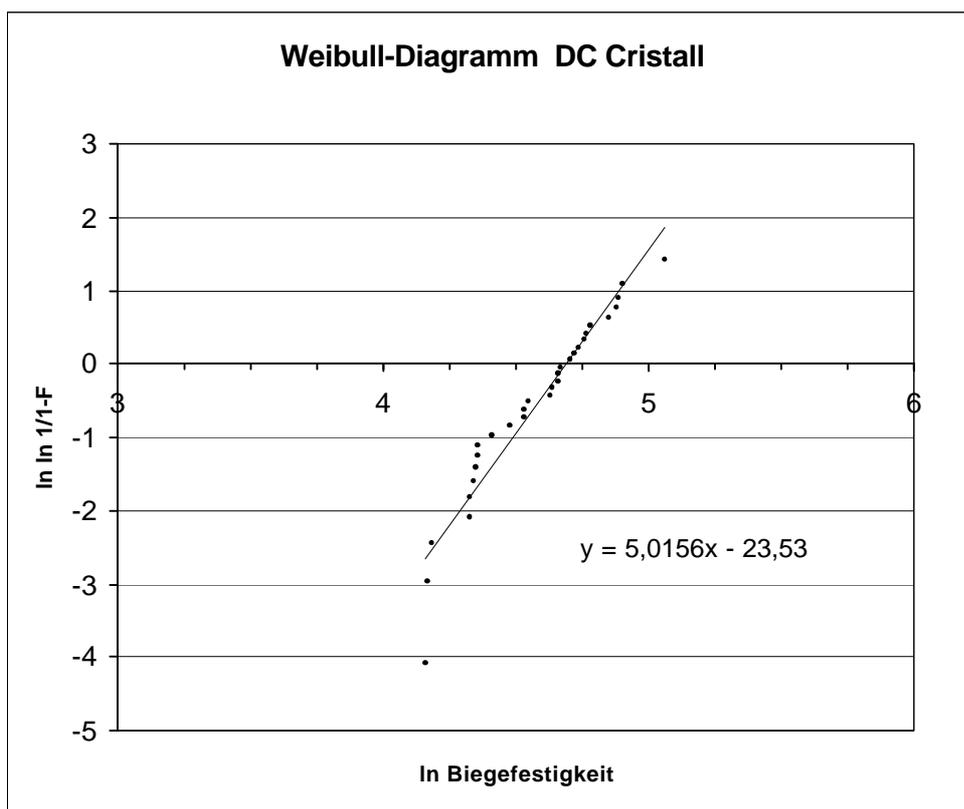


Abb. 5.8.: Weibulldiagramm der Keramik DC Cristall ( $T_{max} = 1000^{\circ}\text{C}$ )

Nachstehend ist in der Tabelle 5.10. der Weibullmodul aufgeführt sowie die mittlere Biegefestigkeit  $\sigma$  der Weibullfestigkeit  $\sigma_0$  gegenübergestellt. DC Cristall erreichte einen Weibullmodul von 5,02. Beim Vergleich der Weibullfestigkeit mit der Biegefestigkeit erzielte  $\sigma_0$  einen Wert von 108,85 MPa ( $\ln \sigma_0 = 4,69$ ) und überstieg somit die durchschnittliche Biegefestigkeit um 8,35 MPa. Die Standardabweichung der Biegefestigkeitsuntersuchung lag bei 23,37 MPa.

Tab. 5.10.: Ergebnisse der Weibullanalyse von DC Cristall

DC Cristall	
Weibullmodul	5,02
s [MPa]	100,05
$\sigma_0$ [MPa]	108,85

### 5.2.3. Risszähigkeitsbestimmung der Keramik DC Cristall

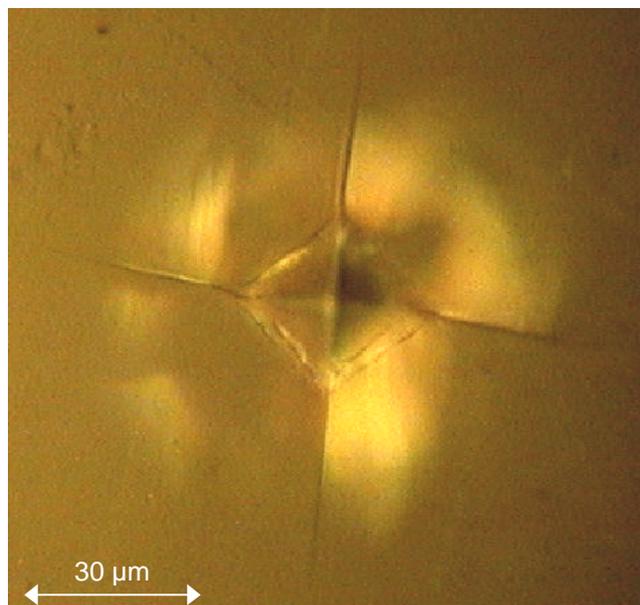


Abb. 5.9.: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Vickers-Härteeindrucks auf der Keramik DC Cristall ( $T_{max}=1000^{\circ}\text{C}$ )

Im lichtmikroskopischen Bild (Abb. 5.9.) ist ein Vickershärteeindruck auf der Keramik DC Cristall dargestellt. Die mit Hilfe des Indenters erzeugten Rissmuster wiesen einen geraden Rissverlauf auf. Die makroskopisch gut glasierte Oberfläche der bei einer Temperatur von  $1000^{\circ}\text{C}$  getemperten Keramik erschien auch lichtmikroskopisch homogen. Es waren keine oberflächlichen, kristallinen Strukturen erkennbar. Aus diesem Grund konnten die Grenzen der Härteeindrücke und Rissflanken gut erfasst werden.

Die Tabelle 5.11. stellt die Ergebnisse der Risszähigkeitsmessungen für DC Cristall gegenüber, die bei der Anwendung der unterschiedlichen Rechenansätze erzielt wurden. Aufgeführt sind die Mittelwerte sowie die entsprechenden Standardabweichungen der Risszähigkeit. Die gemessenen Risslängen und Eindrucksdiagonalen sind im Anhang Tabelle 9.19.-9.21. nachschlagbar.

Es wurden drei Versuchsreihen durchgeführt, die sich in der Brenntemperatur unterschieden. Die Bestimmung der Risszähigkeit erfolgte an Prüfkörpern, die bei  $900^{\circ}\text{C}$ ,  $1000^{\circ}\text{C}$  und  $1100^{\circ}\text{C}$  gebrannt wurden.

Tab. 5.11.: Vergleich der aus den verschiedenen Rechenansätzen resultierenden Riss-  
zähigkeitswerte für die Keramik DC Cristall in  $\text{MPa m}^{1/2}$

	900°C	1000°C	1100°C
<b>Rissübergreifend <math>K_{Ic}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>			
Anstis (12)	1,05 ± 0,07	1,00 ± 0,05	1,02 ± 0,09
<b>Medianer-Riss <math>K_{Ic}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>			
Lawn/ Evans/ Marshall (13)	0,89 ± 0,06	0,84 ± 0,04	0,86 ± 0,08
Niihara (14)	1,68 ± 0,10	1,59 ± 0,07	1,64 ± 0,16
<b>Palmqvist-Riss <math>K_{Ic}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>			
Anstis <sub>Munz/Fett</sub> (15)	1,05 ± 0,07	1,00 ± 0,05	1,02 ± 0,09
Niihara (17)	1,37 ± 0,06	1,33 ± 0,04	1,36 ± 0,09
Evans/ Charles (18)	1,62 ± 0,08	1,51 ± 0,08	1,63 ± 0,20
Lawn/ Fuller (19)	1,57 ± 0,08	1,46 ± 0,08	1,58 ± 0,20

Die Keramik DC Cristall erreichte eine Risszähigkeit, die fast ausschließlich über  $1 \text{ MPa m}^{1/2}$  lag. Lediglich der von LAWN/ EVANS/ MARSHALL (13) favorisierte Rechenansatz führte zu einem Risszähigkeitswert, der unter  $1 \text{ MPa m}^{1/2}$  blieb. Bei Nutzung der Rechenansätze, die auf ANSTIS (12, 15) basieren, resultierte eine Risszähigkeit von ungefähr  $1 \text{ MPa m}^{1/2}$ . Risszähigkeitswerte von annähernd  $1,50 \text{ MPa m}^{1/2}$  wurden mit den Formeln von LAWN/ FULLER (19), EVANS/ CHARLES (18) für Palmqvistrisse und NIIHARA (14) für mediane Risse erhalten.

Die Tabelle 5.12. zeigt die statistische Auswertung der Versuchsreihe, die der Feststellung der Abhängigkeit des Risszähigkeitswertes von der Höhe der Brenntemperatur diente. Sie verdeutlicht, dass die Brenntemperatur keinen signifikanten Einfluss auf die kritische Risszähigkeit ausübte.

Tab. 5.12.: Ergebnisse der statistischen Auswertung der Keramik DC Cristall in  $\text{MPa m}^{1/2}$

	900°C	1000°C	1100°C
	$\bar{x} = 1,05 \text{ MPa}$ $s = 0,07 \text{ MPa}$ $v = 0,07$	$\bar{x} = 1,00 \text{ MPa}$ $s = 0,05 \text{ MPa}$ $v = 0,05$	$\bar{x} = 1,02 \text{ MPa}$ $s = 0,09 \text{ MPa}$ $v = 0,09$
1000°C	F= 3,97 t= -1,99 p= 0,062 nicht signifikant		
1100°C	F= 0,69 t= -0,83 p= 0,416 nicht signifikant	F= 0,44 t= 0,67 p= 0,514 nicht signifikant	

### 5.3. DC Cream

#### 5.3.1. Biegefestigkeit der Keramik DC Cream

In Abbildung 5.10. ist die Abhängigkeit der Biegefestigkeit für die Keramik DC Cream von der Brenntemperatur im Vergleich zum ungebrannten, ausschließlich polierten Zustand dargestellt. Die einzelnen Messwerte sind den Tabellen 9.22. bis 9.26 zu entnehmen. Mit einem mittleren Wert von 117,20 MPa ( $\pm 19,37$  MPa) wurde für DC Cream das Biegefestigkeitsmaximum bei einer Brenntemperatur von 900°C erreicht. Die niedrigste Biegefestigkeit erzielte die bei 1100°C gebrannte Keramik. Die Erhöhung der Brenntemperatur auf 1100°C führte zu einer signifikanten Senkung der Biegefestigkeit auf einen Wert von 93,20 MPa ( $\pm 13,60$  MPa), was aus der Tabelle 5.13. zu entnehmen ist.

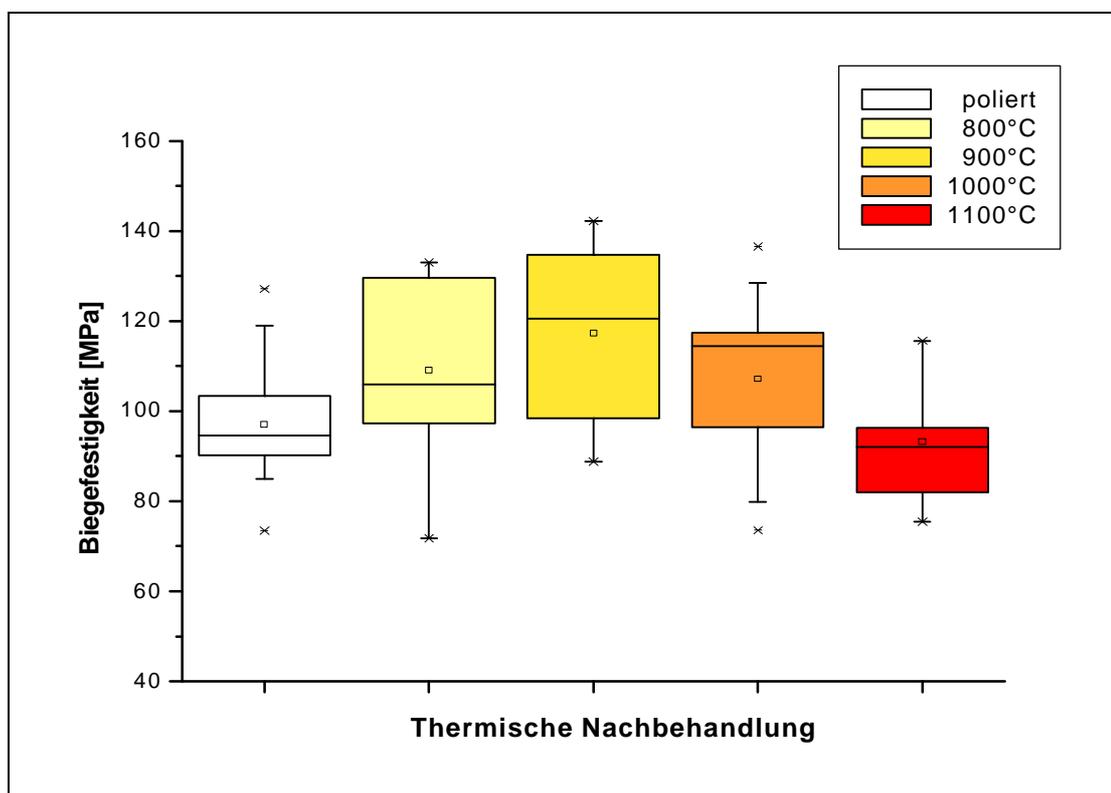


Abb. 5.10.: Einflussnahme der Nachbehandlung auf die Biegefestigkeitswerte der Keramik DC Cream

Bei dieser Keramik entstand bei einer thermischen Nachbehandlung von  $\geq 1000^\circ\text{C}$  eine sehr stark glasierte Oberfläche. Auch die Formbeständigkeit ließ bei einer Temperatur von  $1100^\circ\text{C}$  stark nach. Es wurde deutlich, dass die Brenntemperatur  $1000^\circ\text{C}$  nicht übersteigen sollte.

Tab. 5.13.: Ergebnisse der statistischen Auswertung der Keramik DC Cream

	poliert	800°C	900°C	1000°C	1100°C
	$\bar{x}$ =96,94 MPa s =13,33 MPa v = 0,14	$\bar{x}$ =109,12 MPa s = 19,10 MPa v = 0,17	$\bar{x}$ =117,20 MPa s = 19,37 MPa v = 0,17	$\bar{x}$ =107,14 MPa s = 15,90 MPa v = 0,15	$\bar{x}$ =93,20 MPa s =13,60 MPa v = 0,15
800°C	F= 3,09 t= 1,76 p= 0,093 nicht signifikant				
900°C	F= 8,41 t= 2,90 p= 0,010 <b>signifikant</b>	F= 0,71 t= 0,84 p= 0,413 nicht signifikant			
1000°C	F= 4,36 t= 2,09 p= 0,043 <b>signifikant</b>	F= 0,09 t= -0,30 p= 0,763 nicht signifikant	F= 2,37 t= -1,54 p= 0,132 nicht signifikant		
1100°C	F= 0,40 t= -0,63 p= 0,534 nicht signifikant	F= 3,69 t= -1,92 p= 0,073 nicht signifikant	F= 8,23 t= -2,87 p= 0,011 <b>signifikant</b>	F= 5,38 t= -2,32 p= 0,026 <b>signifikant</b>	

Die ungebrannte, auf 10 µm polierte Keramik wies mit 96,94 MPa ( $\pm 13,33$  MPa) den zweitniedrigsten Biegefestigkeitswert auf. Dieser Wert unterschied sich von den Prüfkörpern nicht signifikant, die bei einer Temperatur von 800°C und 1100°C gebrannt wurden. Signifikante Unterschiede wurden bei einer Brenntemperatur von 900°C und 1000°C erzielt. Die thermische Nachbehandlung der Keramik DC Cream mit einem Temperaturmaximum von 800 - 1000°C ging mit einer Festigkeitssteigerung des Materials einher.

### 5.3.2. Weibullanalyse der Keramik DC Cream

Die Weibullfestigkeit erreichte einen Wert von 114,43 MPa ( $\ln \sigma_0 = 4,74$ ). Sie überstieg somit ungefähr 7 MPa die mittlere Biegefestigkeit des Materials, die jedoch eine Standardabweichung von 15,90 MPa aufwies, in deren Bereich die Weibullfestigkeit somit lag.

Tab. 5.14.: Ergebnisse der Weibullanalyse für DC Cream

DC Cream	
Weibullmodul	7,71
s [MPa]	107,14
s <sub>0</sub> [MPa]	114,43

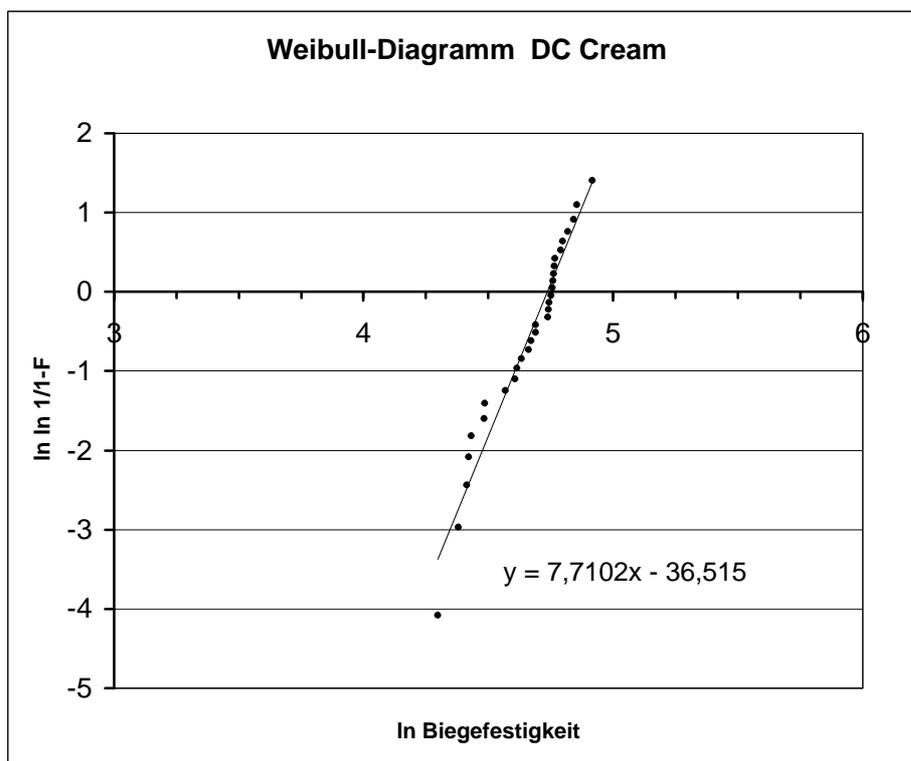


Abb. 5.11.: Weibulldiagramm der Keramik DC Cream ( $T_{max} = 1000^{\circ}\text{C}$ )

Die Abb. 5.11. veranschaulicht die Weibullanalyse der Keramik DC Cream, deren Prüfkörper bei einer Temperatur von  $1000^{\circ}\text{C}$  gebrannt worden sind. Aus dem Anstieg der Geraden ergab sich ein Weibullmodul von 7,71.

### 5.3.3. Bestimmung der kritischen Risszähigkeit der Keramik DC Cream

Das lichtmikroskopische Bild in der Abbildung 5.12. zeigt einen Vickershärteeindruck auf der Keramik DC Cream. Die erzielten Rissmuster besaßen einen geraden Rissverlauf. Nur wenige kristalline Strukturen waren auf der gut glasierten Oberfläche erkennbar, die den Rissverlauf unbeeinflusst ließen. Die Eindrucksgrenzen und die Rissdimension waren gut erkennbar.

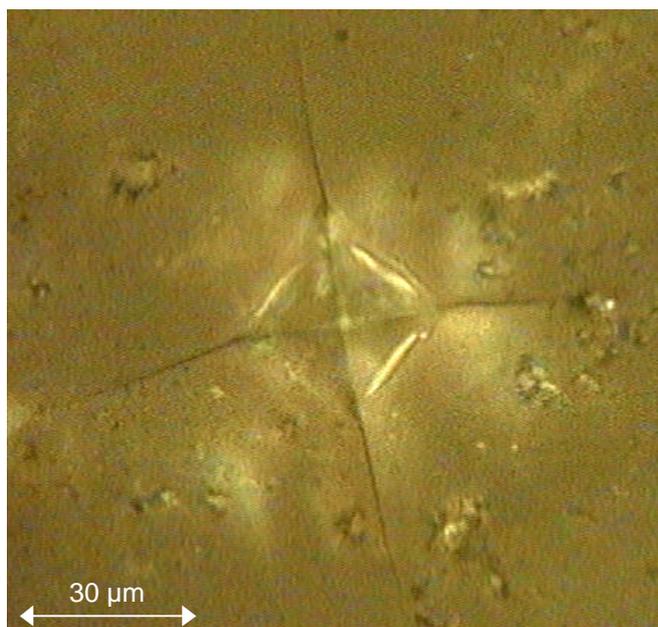


Abb. 5.12.: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Vickers-Härteeindrucks auf der Keramik DC Cream ( $T_{max}=1000^{\circ}\text{C}$ )

In der Tabelle 5.15. sind die berechneten Risszähigkeitsmittelwerte zusammengefasst, die aus den verschiedenen Rechenansätzen resultierten. Um die Einflussnahme der thermischen Nachbehandlung auf den Wert der Risszähigkeit zu prüfen, wurden drei Versuchsreihen durchgeführt, die sich in der Brenntemperatur unterschieden. Es wurde eine Brenntemperatur von  $900^{\circ}\text{C}$ ,  $1000^{\circ}\text{C}$  und  $1100^{\circ}\text{C}$  gewählt. Die Messwerte der  $K_{Ic}$ -Wert-Bestimmung sind im Anhang (Tabelle 9.27.-9.29.) nachschlagbar.

Tab. 5.15.: Vergleich der aus den verschiedenen Rechenansätzen resultierenden  $K_{Ic}$ -Werte für DC Cream

	900°C	1000°C	1100°C
<b>Rissübergreifend <math>K_{Ic}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>			
Anstis (12)	$1,00 \pm 0,07$	$0,97 \pm 0,09$	$0,99 \pm 0,11$
<b>Medianer-Riss <math>K_{Ic}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>			
Lawn/ Evans/ Marshall (13)	$0,84 \pm 0,06$	$0,82 \pm 0,08$	$0,83 \pm 0,09$
Niihara (14)	$1,58 \pm 0,10$	$1,54 \pm 0,14$	$1,54 \pm 0,17$
<b>Palmqvist-Riss <math>K_{Ic}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>			
Anstis Munz/Fett (15)	$1,00 \pm 0,07$	$0,97 \pm 0,09$	$0,99 \pm 0,11$
Niihara (17)	$1,30 \pm 0,05$	$1,29 \pm 0,06$	$1,27 \pm 0,14$
Evans/ Charles (18)	$1,42 \pm 0,09$	$1,42 \pm 0,12$	$1,36 \pm 0,16$
Lawn/ Fuller (19)	$1,37 \pm 0,08$	$1,37 \pm 0,11$	$1,32 \pm 0,14$

Die Risszähigkeitswerte, die aus den ANSTIS-Gleichungen (Gleichungen 12, 15) hervorgingen, erreichten einen Wert um  $1 \text{ MPa m}^{1/2}$ . Mit ungefähr  $0,83 \text{ MPa m}^{1/2}$  wurde der kleinste Risszähigkeitswert mit dem Ansatz nach LAWN/ EVANS/ MARSHALL (Gleichung 13) erhalten. Der höchste  $K_{Ic}$ -Wert resultierte aus dem Rechenansatz von NIIHARA für mediane Risse (Gleichung 14).

Die Tabelle 5.16. gibt die statistischen Ergebnisse der drei Versuchsreihen wieder. Demnach führte eine Veränderung der Brenntemperatur zu keiner signifikanten Abweichung der Risszähigkeit.

Tab. 5.16.: Ergebnisse der statistischen Auswertung der Keramik DC Cream

	<b>900°C</b>	<b>1000°C</b>	<b>1100°C</b>
	$\bar{x} = 1,00 \text{ MPa}$ $s = 0,07 \text{ MPa}$ $v = 0,07$	$\bar{x} = 0,97 \text{ MPa}$ $s = 0,09 \text{ MPa}$ $v = 0,09$	$\bar{x} = 0,99 \text{ MPa}$ $s = 0,11 \text{ MPa}$ $v = 0,11$
<b>1000°C</b>	F= 0,69 t= -0,83 p= 0,417 nicht signifikant		
<b>1100°C</b>	F= 0,18 t= -0,42 p= 0,678 nicht signifikant	F= 0,09 t= 0,29 p= 0,771 nicht signifikant	

#### 5.4. 20/9/1A

##### 5.4.1. Biegefestigkeit der Keramik 20/9/1A

Die erzielten Biegefestigkeitswerte der verschieden nachbehandelten Keramik 20/9/1A sind in Abb. 5.13. zusammenfassend dargestellt. Die erhaltenen Messwerte sind in den Tabellen 9.30. - 9.34. des Anhangs aufgeführt.

Die Dentalkeramik 20/9/1A unterschied sich in der Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Nachbehandlung von den vorher betrachteten Keramiken. Das Biegefestigkeitsmaximum lag für 20/9/1A bei einem Wert von 136,00 MPa. Dieser Wert wurde an der thermisch nicht nachbehandelten, polierten Keramik erzielt. Die geringste Biegefestigkeit konnte nach einer Temperung bei 800°C beobachtet werden. Sie erreichte einen Wert von 112,36 MPa. Bei einer Erhöhung der Brenntemperatur auf 900°C stieg die Biegefestigkeit auf den zweithöchsten Wert an, und fiel bei einem weiteren Anstieg des Temperaturmaximums wieder ab.

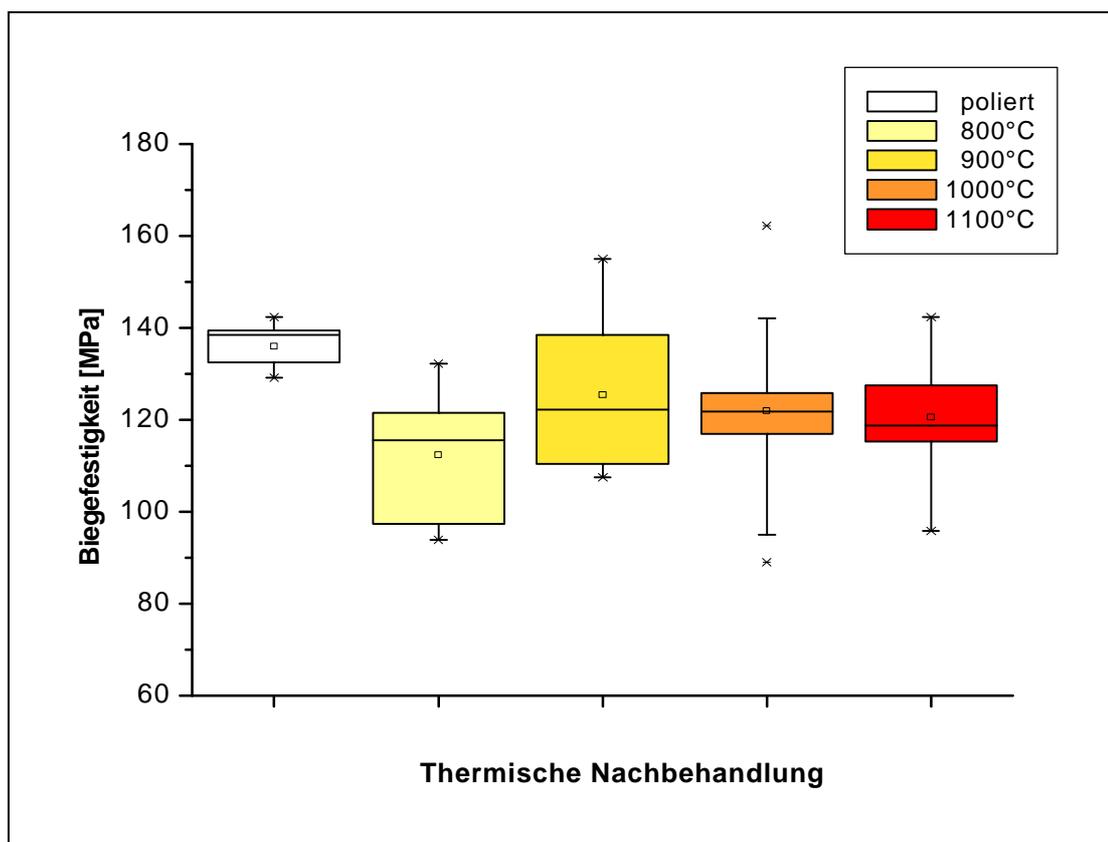


Abb. 5.13.: Abhängigkeit der Biegefestigkeit der Keramik 20/9/1A von der Nachbehandlung

Die Tabelle 5.17. enthält die Ergebnisse der statistischen Analyse. Der Unterschied der Biegefestigkeitswerte der verschiedenen gebrannten Prüfkörper befand sich im nicht signifikanten Bereich, deren Ursache in der großen Streuung der Messwerte gelegen haben könnte. Ausschließlich die polierte, ungebrannte Keramik wich signifikant von den Prüfkörpern ab, die bei 800°C, 1000°C und 1100°C gebrannt wurden.

Tab. 5.17.: Statistische Auswertung der Biegefestigkeitsuntersuchung von 20/9/1A

	<b>poliert</b> $\bar{x}$ =136,00MPa s = 4,45MPa v = 0,03	<b>800°C</b> $\bar{x}$ =112,36MPa s = 13,50MPa v = 0,12	<b>900°C</b> $\bar{x}$ =125,39MPa s = 15,58MPa v = 0,12	<b>1000°C</b> $\bar{x}$ =121,82MPa s = 13,88MPa v = 0,11	<b>1100°C</b> $\bar{x}$ =120,46MPa s = 12,97MPa v = 0,11
<b>800°C</b>	F=14,87 t= -3,86 p= 0,002 <b>signifikant</b>				
<b>900°C</b>	F= 2,29 t= -1,51 p= 0,154 nicht signifikant	F= 3,20 t= 1,79 p= 0,093 nicht signifikant			
<b>1000°C</b>	F= 5,80 t= -2,41 p= 0,022 <b>signifikant</b>	F= 3,09 t= 1,76 p= 0,087 nicht signifikant	F= 0,41 t= -0,64 p= 0,526 nicht signifikant		
<b>1100°C</b>	F= 6,92 t= -2,63 p= 0,021 <b>signifikant</b>	F= 1,50 t= 1,22 p= 0,239 nicht signifikant	F= 0,47 t= -0,69 p= 0,501 nicht signifikant	F= 0,07 t= -0,26 p= 0,800 nicht signifikant	

Die Keramik zeichnete sich bei allen Brenntemperaturen durch eine hohe Kantenfestigkeit aus. Auffallend war die geringe Transparenz, die das Material auch nach dem Brennvorgang behielt.

#### 5.4.2. Die Weibullanalyse der Keramik 20/9/1A

Die Weibullanalyse der Keramik 20/9/1A wird im Diagramm der Abbildung 5.14. graphisch dargestellt. Entsprechend des Anstiegs der Geraden lag ein Weibullmodul von 10,37 vor.

Tab. 5.18.: Ergebnisse der Weibullanalyse für 20/9/1A

<b>20/9/1A</b>	
<b>Weibullmodul</b>	10,37
<b>s [MPa]</b>	121,82
<b>S<sub>0</sub> [MPa]</b>	127,74

Mit 127,74 MPa überstieg die Weibullfestigkeit ( $\ln \sigma_0 = 4,85$ ) um ungefähr 6 MPa die mittlere Biegefestigkeit, was innerhalb der Standardabweichung ( $\pm 13,88$  MPa) der gemessenen Biegefestigkeit lag.

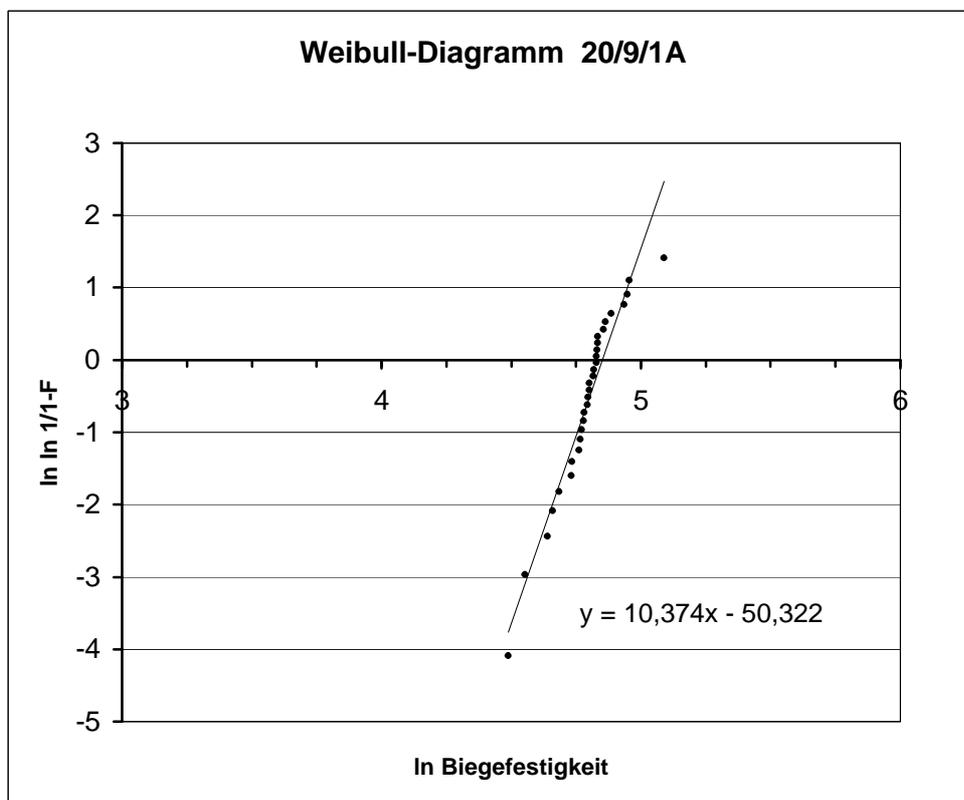


Abb. 5.14.: Weibulldiagramm der Keramik 20/9/1A

#### 5.4.3. Risszähigkeitsbestimmung der Keramik 20/9/1A

Die Abbildung 5.15. zeigt das Rissmuster auf der Dentalkeramik 20/9/1A, dass beim Aufbringen eines Vickershärteeindrucks entstanden ist. Die verursachten Risse wiesen einen geraden Verlauf der Rissflanken auf. Aufgrund der gering glasierten, inhomogenen Prüfkörperoberfläche waren die Rissmuster in ihrer Dimension nur relativ schwer bestimmbar.

In der Tabelle 5.19. wurden die resultierenden  $K_{Ic}$ -Werte der bei 900°C, 1000°C und 1100°C gebrannten Keramik aufgeführt, die mit den unterschiedlichen Rechenansätzen berechnet worden sind. Die gemessenen Werte sind dem Anhang (Tab. 9.35.-9.37) zu entnehmen.

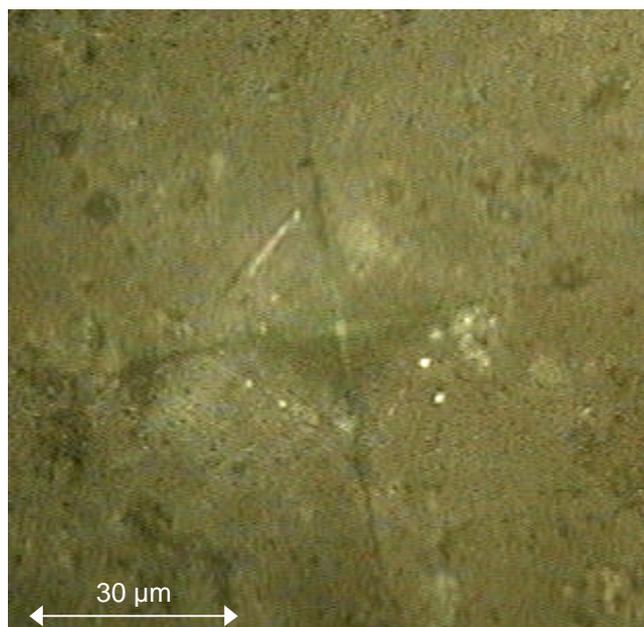


Abb. 5.15.: Lichtmikroskopisches Bild eines Vickers-Härte-  
eindrucks auf der Keramik 20/9/1A ( $T_{max}=1000^{\circ}\text{C}$ )

Tab. 5.19.: Vergleich der aus den verschiedenen Rechenansätzen resultierenden Risszähigkeits-  
werte für die Keramik 20/9/1A in  $\text{MPa m}^{1/2}$

	900°C	1000°C	1100°C
<b>Rissübergreifend <math>K_{IC}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>			
Anstis (12)	$1,18 \pm 0,10$	$1,22 \pm 0,09$	$1,21 \pm 0,14$
<b>Medianer-Riss <math>K_{IC}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>			
Lawn/ Evans/ Marshall (13)	$1,00 \pm 0,08$	$1,02 \pm 0,08$	$1,02 \pm 0,12$
Niihara (14)	$1,89 \pm 0,18$	$1,93 \pm 0,16$	$1,94 \pm 0,22$
<b>Palmqvist-Riss <math>K_{IC}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</b>			
Anstis <sub>Munz/Fett</sub> (15)	$1,18 \pm 0,10$	$1,22 \pm 0,09$	$1,21 \pm 0,14$
Niihara (17)	$1,48 \pm 0,11$	$1,49 \pm 0,10$	$1,48 \pm 0,12$
Evans/ Charles (18)	$1,79 \pm 0,25$	$1,78 \pm 0,20$	$1,74 \pm 0,19$
Lawn/ Fuller (19)	$1,73 \pm 0,24$	$1,72 \pm 0,20$	$1,68 \pm 0,19$

Mit den betrachteten Gleichungen konnte für die Keramik 20/9/1A eine Risszähigkeit von mindestens  $1 \text{ MPa m}^{1/2}$  berechnet werden. Der kleinste Risszähigkeitswert wurde mit der Formel von LAWN/ EVANS/ MARSHALL (Gleichung 13) erhalten, der für die bei  $900^{\circ}\text{C}$  getemperte Keramik bei  $1,00 \text{ MPa m}^{1/2}$  lag, während die bei  $1000^{\circ}\text{C}$  und  $1100^{\circ}\text{C}$  gebrannten Prüfkörper einen  $K_{IC}$ -Wert von  $1,02 \text{ MPa m}^{1/2}$  erzielten. Die ANSTIS-Gleichungen führten zu einem Risszähigkeitswert von annähernd  $1,2 \text{ MPa m}^{1/2}$  (Gleichungen 12,15). Mit den Formeln von NIIHARA für

mediane Rissmuster (Gleichung 14) und EVANS/ CHARLES für Palmqvistrisse (Gleichung 18) konnten  $K_{Ic}$ -Werte von rund  $1,90 \text{ MPa m}^{1/2}$  bzw.  $1,75 \text{ MPa m}^{1/2}$  ermittelt werden, die damit das Maximum der berechneten Werte bildeten.

Der Vergleich der resultierenden  $K_{Ic}$ -Werte der unterschiedlich gebrannten Keramiken zeigte, dass die Risszähigkeit von der Brenntemperatur unbeeinflusst blieb. Es bestanden ausschließlich nicht signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen gebrannten Prüfkörpern, was aus der Tabelle 5.20. zu entnehmen ist.

Tab. 5.20.: Ergebnisse der statistischen Auswertung der Keramik 20/9/1A in  $\text{MPa m}^{1/2}$

	<b>900°C</b>	<b>1000°C</b>	<b>1100°C</b>
	$\bar{x} = 1,18$ $s = 0,10$ $v = 0,08$	$\bar{x} = 1,22$ $s = 0,09$ $v = 0,07$	$\bar{x} = 1,21$ $s = 0,14$ $v = 0,12$
<b>1000°C</b>	$F = 0,46$ $t = 0,68$ $p = 0,506$ nicht signifikant		
<b>1100°C</b>	$F = 0,26$ $t = 0,51$ $p = 0,614$ nicht signifikant	$F = 3 \cdot 10^{-4}$ $t = -0,02$ $p = 0,986$ nicht signifikant	

## 5.5. D 08/01

## 5.5.1. Biegefestigkeitsuntersuchung der Keramik D 08/01

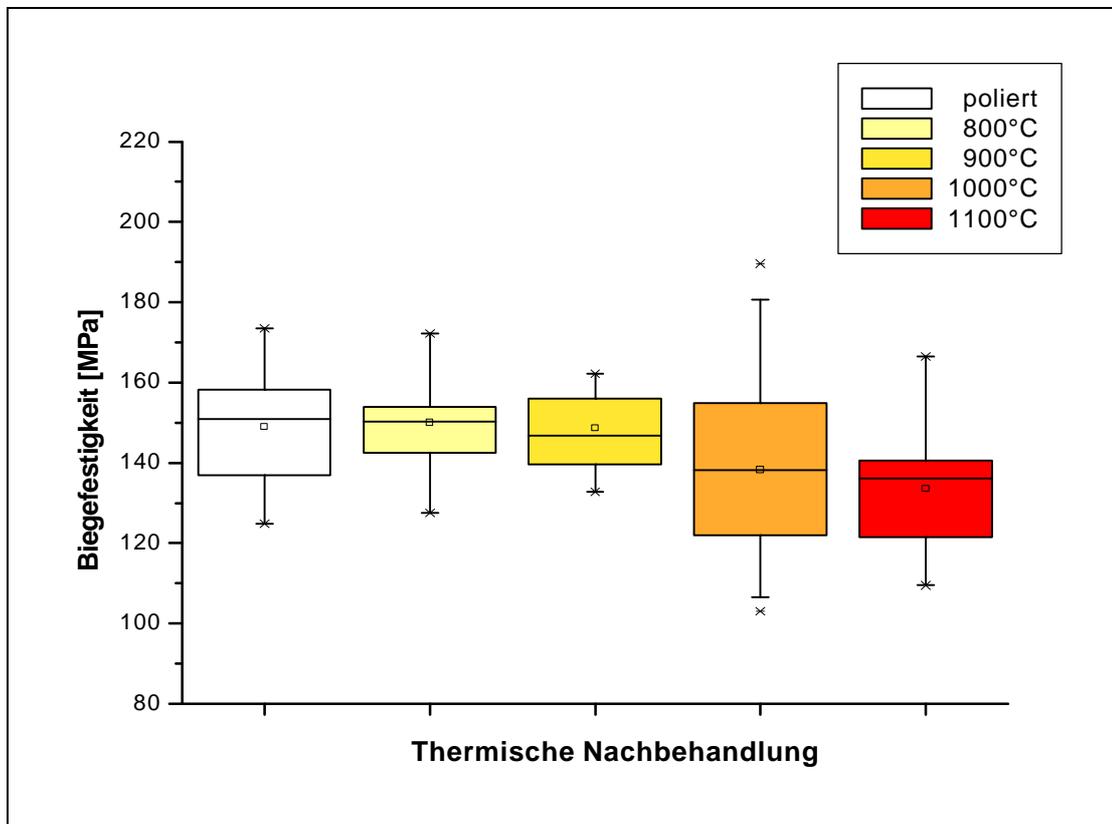


Abb. 5.16.: Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Nachbehandlung der Keramik D 08/01

In Abbildung 5.16. wurden die Biegefestigkeitswerte graphisch gegenübergestellt, die unter Veränderung des Temperungsgrades gemessen worden sind. Eine tabellarische Auflistung der Messwerte erfolgte in den Tabellen 9.38. bis 9.42. (siehe Anhang).

Mit 150,03 MPa wurde die höchste Biegebruchfestigkeit von der bei 800°C gebrannten Keramik erreicht. Die Biegefestigkeitswerte der ausschließlich polierten und der bei 900°C getemperten Keramik unterschritten nur minimal den Maximalwert. Mit einer Erhöhung der Brenntemperatur kam es zu einem kontinuierlichen Abfall der Biegefestigkeit. Bei einer Brenntemperatur von 1100°C lag ein mittlerer Biegefestigkeitswert von 133,56 MPa vor, der dem kleinsten erreichten Wert entsprach. Die statistische Analyse (siehe Tab. 5.21.) ergab, dass die Nachbehandlung keinen signifikanten Einfluss auf die Biegefestigkeit ausübte.

Die Keramik D 08/01 besaß eine starke Opazität, die auch bei höher gewählten Brenntemperatur erhalten blieb.

Tab. 5.21.: Ergebnisse der statistischen Analyse der Keramik D 08/01 in MPa  $m^{1/2}$

	poliert	800°C	900°C	1000°C	1100°C
	$\bar{x}$ =148,97MPa s = 15,31MPa v = 0,10	$\bar{x}$ =150,03MPa s = 12,78MPa v = 0,09	$\bar{x}$ =148,65MPa s = 9,90MPa v = 0,07	$\bar{x}$ =138,30MPa s = 21,87MPa v = 0,16	$\bar{x}$ =133,56MPa s = 18,16MPa v = 0,14
800°C	F= 0,02 t= 0,15 p= 0,883 nicht signifikant				
900°C	F= 0,003 t= -0,05 p= 0,961 nicht signifikant	F= 0,06 t= -0,24 p= 0,813 nicht signifikant			
1000°C	F= 1,77 t= -1,33 p= 0,191 nicht signifikant	F= 2,23 t= -1,49 p= 0,140 nicht signifikant	F= 1,80 t= -1,34 p= 0,188 nicht signifikant		
1100°C	F= 3,37 t= -1,84 p= 0,085 nicht signifikant	F= 4,40 t= -2,10 p= 0,052 nicht signifikant	F= 4,26 t= -2,06 p= 0,056 nicht signifikant	F= 0,33 t= -0,58 p= 0,768 nicht signifikant	

### 5.5.2. Weibullanalyse der Keramik D 08/01

In der Tabelle 5.22. wurde die mittlere Biegefestigkeit  $\sigma$  der Keramik D 08/01 der Weibullfestigkeit  $\sigma_0$  gegenübergestellt. Die Weibullfestigkeit kann aus dem Schnittpunkt der Trendlinie mit der x-Achse ( $\ln \sigma_0 = 4,99$ ) bestimmt werden. Sie erreichte einen Wert von 146,94 MPa und überstieg somit den durchschnittlichen Wert der Biegefestigkeit um 8,64 MPa. Diese Differenz liegt innerhalb der Standardabweichung von  $\pm 21,87$  MPa für den Werkstoff D 08/01.

Weiterhin wurde der Weibullmodul aufgeführt, der bei einem Wert von 7,53 lag.

Tab. 5.22.: Ergebnisse der Weibullanalyse für D 08/01

<b>D 08/01</b>	
<b>Weibullmodul</b>	7,53
<b>s [MPa]</b>	138,30
<b>s<sub>0</sub> [MPa]</b>	146,94

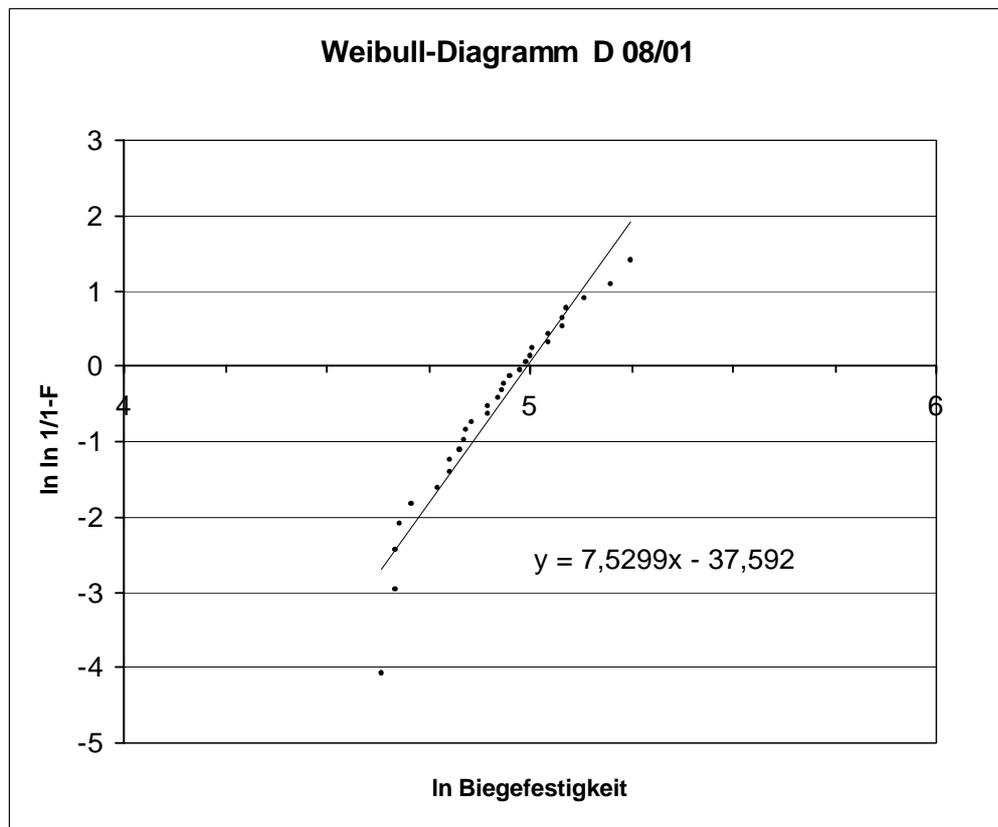


Abb. 5.17.: Weibulldiagramm der Keramik D 08/01 ( $T_{max}=1000^{\circ}\text{C}$ )

### 5.5.3. Risszähigkeitsbestimmung der Keramik D 08/01

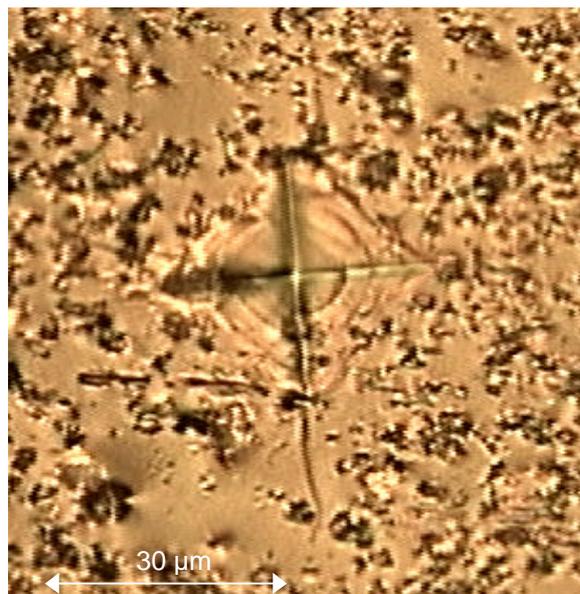


Abb. 5.18.: Lichtmikroskopisches Bild eines Vickershärteeindrucks auf der Keramik D 08/01

Die Abbildung 5.18. zeigt den Rissverlauf innerhalb der Keramik D 08/01 ausgehend von einem Vickershärteeindruck. Die nur schwach glasierte Prüfkörperoberfläche der bei 1000°C gebrannten Keramik wies eine inhomogene Struktur auf, so dass in den kristallinen Bereichen eine genaue Abgrenzung der Rissflanken nur schwer möglich war.

Die Mittelwerte sowie die Standardabweichung der mit den verschiedenen Rechenansätzen berechneten Risszähigkeitswerten wurden in der Tabelle 5.23. wiedergegeben. Die gemessenen Risslängen und Härteeindrucksdiagonalen sind dem Anhang aus der Tabelle 9.43. zu entnehmen.

Bei Verwendung der betrachteten Gleichungen überstieg die ermittelte kritische Risszähigkeit stets  $1 \text{ MPa m}^{1/2}$ . Der geringste Risszähigkeitswert entstand bei Anwendung des Rechenansatzes nach LAWN/ EVANS/ MARSHALL (Gleichung 13). Die Risszähigkeit kam in diesem Fall auf einen Wert von  $1,19 \text{ MPa m}^{1/2}$ .

Tab. 5.23.: Vergleich der aus den verschiedenen Rechenansätzen resultierenden Risszähigkeitswerte für die Keramik D 08/01 in  $\text{MPa m}^{1/2}$

<b>1000°C</b>	
<b><u>Rissübergreifend <math>K_{IC}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</u></b>	
Anstis (12)	$1,41 \pm 0,13$
<b><u>Medianer-Riss <math>K_{IC}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</u></b>	
Lawn/ Evans/ Marshall (13)	$1,19 \pm 0,11$
Niihara (14)	$2,25 \pm 0,21$
<b><u>Palmqvist-Riss <math>K_{IC}</math> [<math>\text{MPa m}^{1/2}</math>]:</u></b>	
Anstis <sub>Munz/Fett</sub> (15)	$1,41 \pm 0,13$
Niihara (17)	$1,69 \pm 0,12$
Evans/ Charles (18)	$2,12 \pm 0,21$
Lawn/ Fuller (19)	$2,05 \pm 0,20$

Die Rechenansätze, die von ANSTIS (Gleichung 12, 15) abgeleitet worden sind, lieferten einen  $K_{IC}$ -Wert von  $1,41 \text{ MPa m}^{1/2}$ . Werte von über  $2 \text{ MPa m}^{1/2}$  wurden mit den Formeln von NIIHARA für mediane Risse (Gleichung 14), LAWN/ FULLER (Gleichung 19) und EVANS/ CHARLES (Gleichung 18) für Palmqvist-Rissmuster erreicht.

## 5.6. Cerec Vita Mark II

### 5.6.1. Biegefestigkeit der Keramik Cerec Vita Mark II

Die Abbildung 5.19. bietet eine Übersicht über die gemessenen Biegefestigkeitswerte, die die Abhängigkeit von der Nachbehandlung aufzeigen. Die mit einem Temperaturmaximum von 800°C vom Hersteller empfohlene Brennführung wurde den Ergebnissen aus einer Temperung bei 1000 °C gegenübergestellt. Ebenfalls wurde die Biegefestigkeit für die ungebrannte Keramik bestimmt. Die erhalten Messwerte sind im Anhang aufgeführt (Tab. 9.44.-9.46).

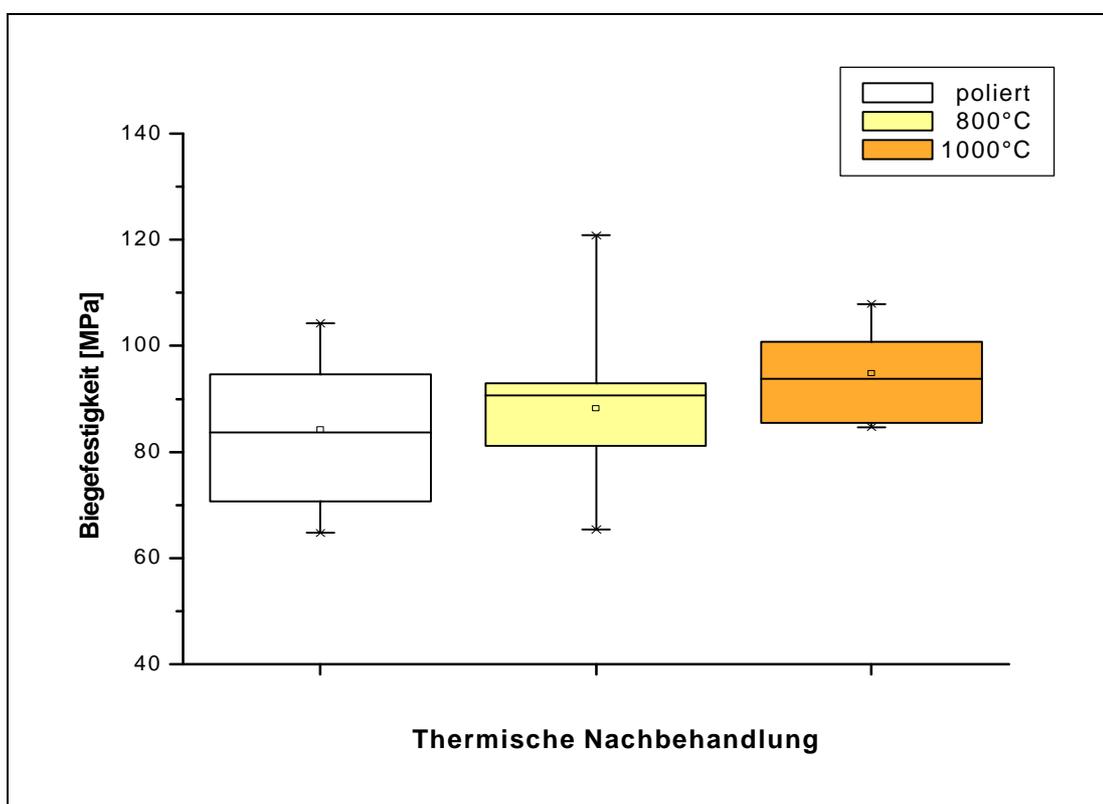


Abb. 5.19.: Gegenüberstellung der Biegefestigkeitswerte der unterschiedlich nachbehandelten Keramik Cerec Vita Mark II

Bei der maximal gewählten Brenntemperatur von 1000°C wurde die maximale Biegefestigkeit von 94,81 MPa erzielt. Die rein polierte, ungebrannte Keramik wies mit einem durchschnittlichen Wert von 84,14 MPa die geringste Biegefestigkeit auf.

Statistisch resultierte aus der abweichenden Nachbehandlung kein signifikanter Unterschied, was aus der Tabelle 5.24. zu entnehmen ist.

Tab. 5.24.: Statistische Auswertung der Biegefestigkeitsuntersuchung für die Keramik Cerec Vita Mark II

	poliert	800°C	1000°C
	$\bar{x}$ =84,14 MPa s =12,94 MPa v = 0,15	$\bar{x}$ =88,20 MPa s =15,05 MPa v = 0,17	$\bar{x}$ =94,81 MPa s = 8,21 MPa v = 0,09
800°C	F= 0,33 t= 0,58 p= 0,570 nicht signifikant		
1000°C	F= 4,20 t= 2,05 p= 0,056 nicht signifikant	F= 1,30 t= 1,14 p= 0,271 nicht signifikant	

### 5.6.2. Weibullanalyse der Keramik Cerec Vita Mark II

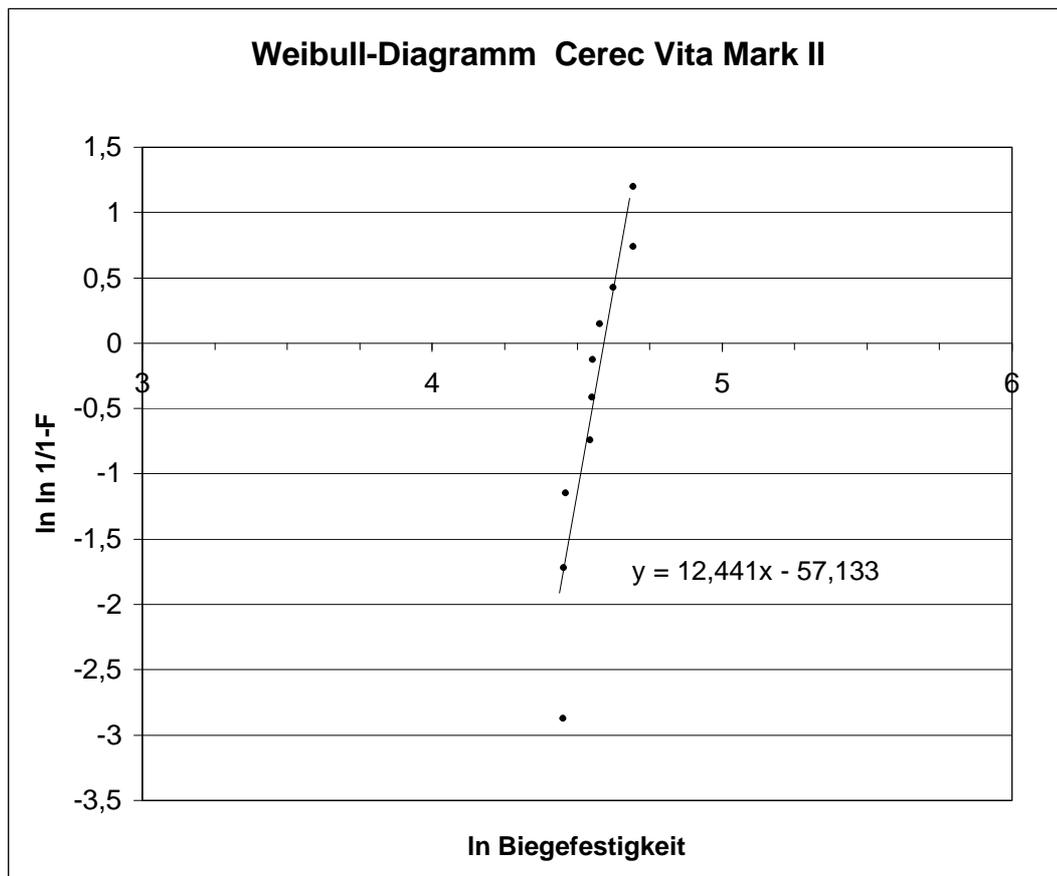


Abb. 5.20.: Weibulldiagramm der Keramik Cerec Vita Mark II

Für die Dentalkeramik Cerec Vita Mark II konnte eine Weibullfestigkeit  $\sigma_0$  von 98,49 MPa ermittelt werden ( $\ln \sigma_0 = 4,59$ ). Bei einer Brenntemperatur von 1000°C wurde eine mittlere Biegefestigkeit von 94,81 MPa erreicht. Der Weibullmodul entsprach einem Wert von 12,44.

Tab. 5.25.: Ergebnisse der Weibullanalyse für Cerec Vita Mark II

Cerec Vita Mark II	
Weibullmodul	12,44
$s$ [MPa]	94,81
$s_0$ [MPa]	98,49

### 5.6.3. Risszähigkeit der Keramik Cerec Vita Mark II

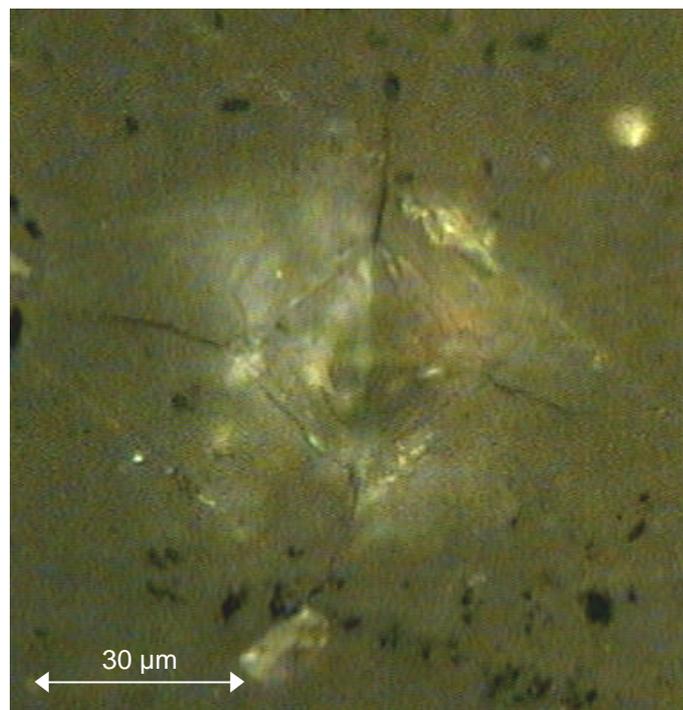


Abb. 5.21.: Lichtmikroskopisches Bild eines Härteeindrucks auf der Keramik Cerec Vita Mark II

Die Prüfkörperoberfläche der bei 1000°C gebrannten Keramik Cerec Vita Mark II wies nur eine dünne Brennhaut auf, wodurch die Oberfläche der Keramik im Lichtmikroskopischen Bild (Abb. 5.21.) leicht inhomogen erschien. Die erzeugten Risse zeigten sich teilweise in ihrem Verlauf abgelenkt. Die gesetzten Härteeindrücke waren in ihrer Dimension nur schwer erkennbar. Die

gemessenen Rissdimensionen und Härteeindrucksdiagonalen sind aus der Tabelle 9.47. des Anhangs ersichtlich.

Die Keramik erzielte nach den auf ANSTIS basierenden Formeln (Gleichung 12, 15) eine kritische Bruchzähigkeit von  $1,11 \text{ MPa m}^{1/2}$ . Ausschließlich die von LAWN/ EVANS/ MARSHALL favorisierte Gleichung (Gleichung 13) führte zu einem  $K_{IC}$ -Wert, der mit  $0,94 \text{ MPa m}^{1/2}$  unter dem Grenzwert von  $1 \text{ MPa m}^{1/2}$  blieb.

Tab. 5.26.: Vergleich der aus den verschiedenen Rechenansätzen resultierenden Risszähigkeitswerte für die Keramik Cerec Vita Mark II

<b>1000°C</b>	
<b><u>Rissübergreifend <math>K_{IC}</math> [MPa m<sup>1/2</sup>]:</u></b>	
Anstis (12)	$1,11 \pm 0,05$
<b><u>Medianer-Riss <math>K_{IC}</math> [MPa m<sup>1/2</sup>]:</u></b>	
Lawn/ Evans / Marshall (13)	$0,94 \pm 0,04$
Niihara (14)	$1,77 \pm 0,08$
<b><u>Palmqvist-Riss <math>K_{IC}</math> [MPa m<sup>1/2</sup>]:</u></b>	
Anstis <sub>Munz/Fett</sub> (15)	$1,11 \pm 0,05$
Niihara (17)	$1,41 \pm 0,05$
Evans/ Charles (18)	$1,67 \pm 0,13$
Lawn/ Fuller (19)	$1,61 \pm 0,12$

## 5.7. ProCAD

### 5.7.1. Biegefestigkeit der Keramik ProCAD

Für die Keramik ProCAD wurde die Biegefestigkeit der ungebrannten Keramik mit der den Herstellerangaben entsprechend gebrannten (800°C) Keramik verglichen. Gleichzeitig wurde die Biegefestigkeit einer weiteren Versuchsreihe geprüft, die bei einer maximalen Temperatur von 1000°C getempert worden ist.

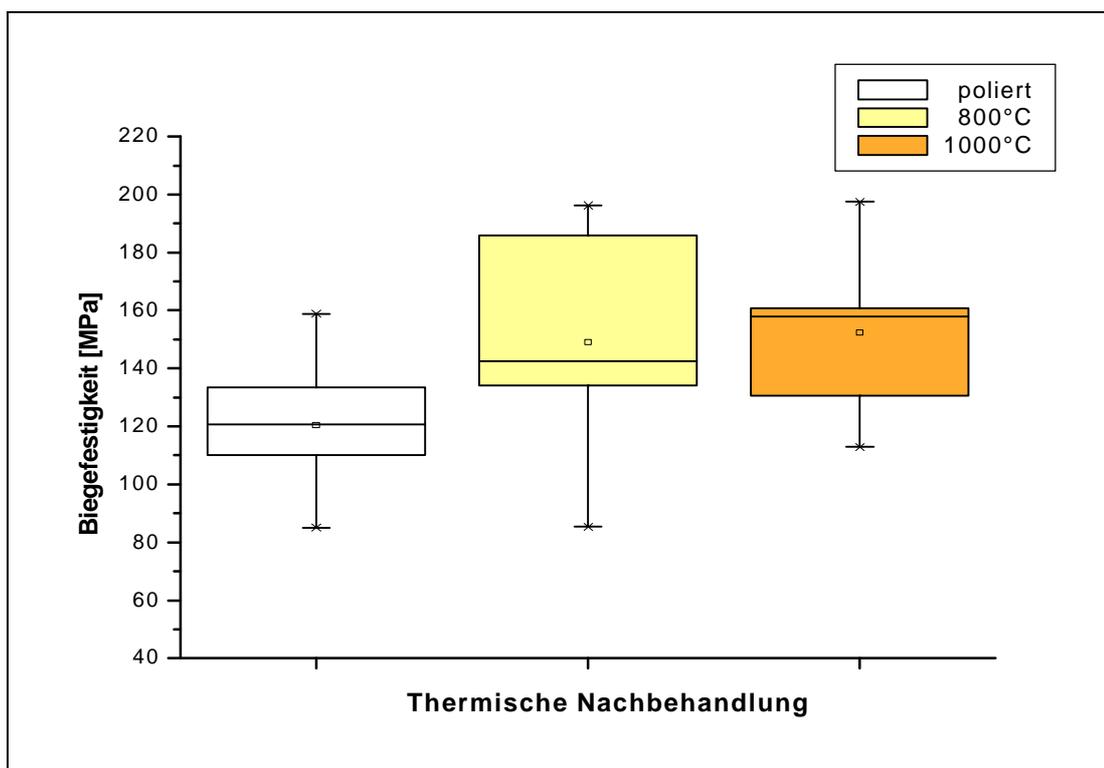


Abb. 5.22.: Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Nachbehandlung der Keramik ProCAD

Das Biegefestigkeitsmaximum wurde bei einer Brenntemperatur von 1000°C erreicht. Mit 152,34 MPa lag dieser Wert signifikant über dem minimalen Biegefestigkeitswert von 120,36 MPa, der für die thermisch unbehandelte, polierte Keramik gemessen wurde. Die entsprechend der Herstellerempfehlung gebrannte Keramik erzielte eine mittlere Biegefestigkeit von 148,92 MPa. Dieser Wert wich nicht signifikant von der höher gebrannten Keramik ab. Graphisch wurden die Ergebnisse der Biegefestigkeitsuntersuchung in der Abbildung 5.22. dargestellt. Die Messwerte sind im Anhang in den Tabellen 9.48.-9.50. dargelegt. Die statistische Auswertung erfolgt in der Tabelle 5.27.

Tab. 5.27.: Statistische Auswertung der Biegefestigkeitsuntersuchung für die Keramik ProCAD

	poliert	800°C	1000°C
	$\bar{x} = 120,36 \text{ MPa}$ $s = 21,11 \text{ MPa}$ $v = 0,18$	$\bar{x} = 148,92 \text{ MPa}$ $s = 34,84 \text{ MPa}$ $v = 0,23$	$\bar{x} = 152,34 \text{ MPa}$ $s = 23,54 \text{ MPa}$ $v = 0,15$
800°C	F= 3,93 t= 1,98 p= 0,065 nicht signifikant		
1000°C	F= 8,62 t= 2,94 p= 0,009 <b>signifikant</b>	F= 0,06 t= 0,24 p= 0,814 nicht signifikant	

5.7.2. Weibull-Analyse der Keramik ProCAD

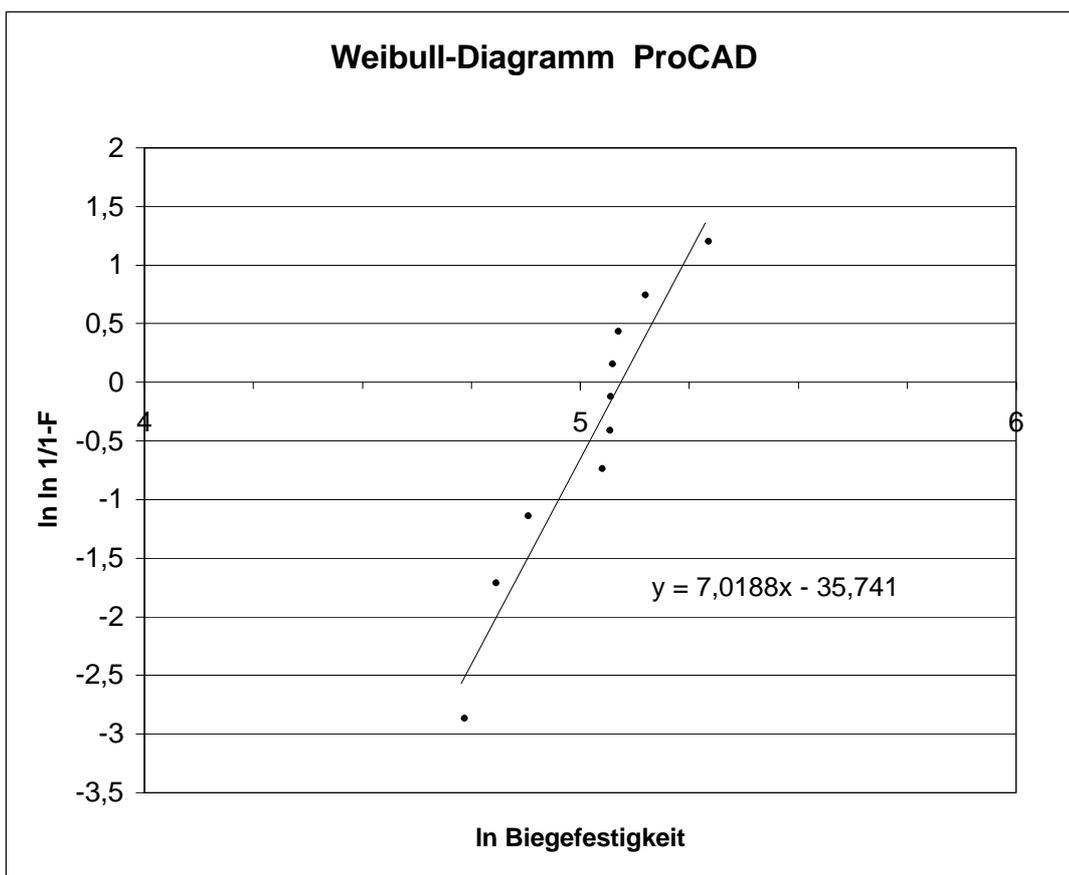


Abb. 5.23.: Weibulldiagramm der Keramik ProCAD ( $T_{max} = 1000^\circ\text{C}$ )

Die Keramik ProCAD besaß nach einer Temperung bei 1000°C eine Weibullfestigkeit von 162,39 MPa ( $\ln \sigma_0 = 5,09$ ). Bei einer mittleren Biegefestigkeit von 152,34 MPa überstieg die Weibull-

festigkeit die Biegefestigkeit um nur ca. 6%. Der Wert von 162,39 MPa lag innerhalb der Spanne der Standardabweichung, die für ProCAD festgestellt worden ist. Aus der graphischen Auftragung der Biegefestigkeitsmesswerte im Weibulldiagramm konnte für ProCAD ein Weibullmodul von 7,02 ermittelt werden.

Tab. 5.28.: Ergebnisse der Weibullanalyse für ProCAD

ProCAD	
Weibullmodul	7,02
$s$ [MPa]	152,34
$s_0$ [MPa]	162,39

### 5.7.3. Risszähigkeit der Keramik ProCAD

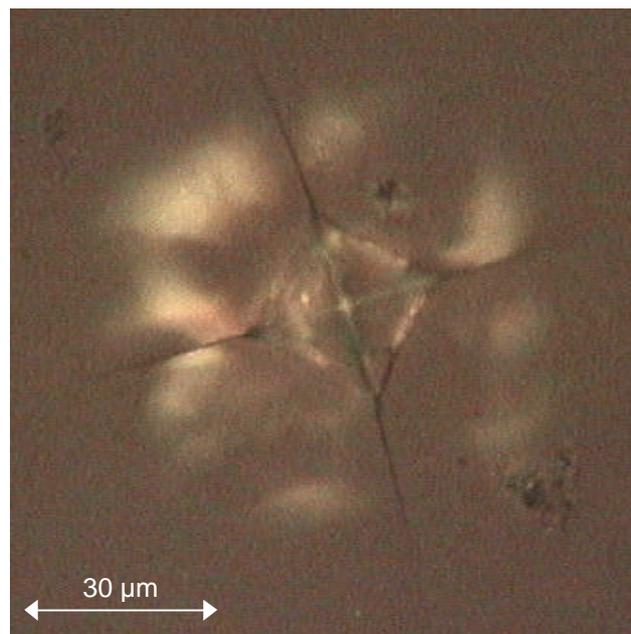


Abb. 5.24.: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Vickers-Härteeindrucks auf der Keramik ProCAD

Die Abbildung 5.24. gibt die lichtmikroskopische Aufnahme eines Vickershärteeindrucks auf der Keramik ProCAD wieder. Die Prüfkörper wurden vor Setzen des Härteeindrucks bei einem Temperaturmaximum von 1000°C gebrannt. Es bildete sich eine gut glasierte und homogen erscheinende Oberfläche aus. Die Härteeindrucksgrenzen und die Rissdimension waren gut zu

beurteilen. Die Dimensionen der erzeugten Rissmuster wurden in der Tabelle 9.51. des Anhangs angeführt.

Tab. 5.29.: Vergleich der aus den verschiedenen Rechenansätzen resultierenden Risszähigkeitswerte für die Keramik ProCAD

<b>1000°C</b>	
<b>Rissübergreifend [MPa m<sup>1/2</sup>]:</b>	
Anstis (12)	1,21 ± 0,07
<b>Medianer-Riss K<sub>IC</sub> [MPa m<sup>1/2</sup>]:</b>	
Lawn/ Evans/ Marshall (13)	1,02 ± 0,06
Niihara (14)	1,92 ± 0,12
<b>Palmqvist-Riss K<sub>IC</sub> [MPa m<sup>1/2</sup>]:</b>	
Anstis <sub>Munz/Fett</sub> (15)	1,21 ± 0,07
Niihara (17)	1,49 ± 0,07
Evans/ Charles (18)	1,77 ± 0,15
Lawn/ Fuller (19)	1,71 ± 0,14

ProCAD erzielte entsprechend der Berechnung nach ANSTIS (Gleichungen 12, 15) eine mittlere Risszähigkeit von 1,21 MPa m<sup>1/2</sup>. Den kleinsten Risszähigkeitswert lieferte der Rechenansatz nach LAWN/ EVANS/ MARSHALL (Gleichung 13), der für mediane Rissmuster gedacht ist. Auch dieser Wert lag mit 1,02 MPa m<sup>1/2</sup> über dem Grenzwert von 1 MPa m<sup>1/2</sup>. Das Risszähigkeitsmaximum wurde aus der Berechnung mit der Formeln von NIIHARA für mediane Risse (Gleichung 14) erhalten. Dieser Rechenansatz führte zu einem K<sub>IC</sub>-Wert von 1,92 MPa m<sup>1/2</sup>.