

6. Diskussion

6.1. Biegefestigkeit

6.1.1. Prüfmethodik

6.1.1.1. Einflussnahme der Nachbehandlung auf die Biegefestigkeit

Die Ergebnisse der verschiedenen vorbehandelten Keramiken verdeutlichen, dass sowohl eine abschließende thermische Behandlung der untersuchten Materialien als auch der Schleifgrad einen Einfluss auf die Biegefestigkeit der Keramiken ausübte. Aus der Gegenüberstellung der optimal gebrannten Keramiken mit den ungebrannten, ausschließlich polierten Werkstoffen (siehe Tabelle 6.1.) wird ersichtlich, dass die thermische Behandlung der Keramiken DC Cristall, DC Cream und ProCAD eine signifikante Steigerung der Biegefestigkeit hervorrief.

Tab. 6.1.: Gegenüberstellung der erzielten Biegefestigkeit der optimal gebrannten und der ungebrannten, ausschließlich polierten Keramik

Keramik	Mittlere Biegefestigkeit der polierten Keramik [MPa]	Mittlere Biegefestigkeit der optimal gebrannten Keramik [MPa]	Ergebnis der statistischen Auswertung (Signifikanzniveau $p=0,05$)
DC Cristall	81,48 ± 15,30	109,99 ± 24,20 ($T_{max}= 900^{\circ}C$)	F = 7,93 t = 2,82 p = 0,012 signifikant
DC Cream	96,94 ± 13,33	117,20 ± 19,37 ($T_{max}= 900^{\circ}C$)	F = 8,41 t = 2,90 p = 0,008 signifikant
20/9/1A	136,00 ± 14,45	125,39 ± 15,58 ($T_{max}= 900^{\circ}C$)	F = 2,29 t = -1,51 p = 0,154 nicht signifikant
D 08/01	148,97 ± 15,31	150,03 ± 12,78 ($T_{max}= 800^{\circ}C$)	F = 0,02 t = 0,15 p = 0,883 nicht signifikant
Cerec Vita Mark II	84,14 ± 15,31	94,81 ± 8,21 ($T_{max}= 1000^{\circ}C$)	F = 4,20 t = 2,05 p = 0,056 nicht signifikant
ProCAD	120,36 ± 21,11	152,34 ± 23,54 ($T_{max}= 1000^{\circ}C$)	F = 8,62 t = -2,94 p = 0,009 signifikant

Lediglich die Keramiken D 08/01 und 20/9/1A erreichten im ungebrannten Zustand das Biegefestigkeitsmaximum oder eine vom Höchstwert nur nicht signifikant abweichende Biegefestigkeit. Beide

Keramiken weisen einen erhöhten Aluminiumoxidanteil auf. Die temperaturabhängige Erhöhung der Biegefestigkeit kann aus der Bildung von Leuzitkristallen resultieren, die bei der Kristallisation von Orthoklasgläsern entstehen [16]. Der Leuzitkristallgehalt wird im Wesentlichen durch den Feldspatanteil des keramischen Materials und durch die Temperaturführung bestimmt. Dagegen beeinflusst der Na_2O -Gehalt den amorphen Glasanteil der Keramik. Je höher der Na_2O -Gehalt der jeweiligen Keramik ist, um so geringer fällt der Glasanteil in der Keramik aus.

Es ist ebenfalls denkbar, dass eine thermische Nachbehandlung einer Glaskeramik mit einer Defektminimierung einhergeht. Diese kann aus dem Verschluss oberflächlicher Defekte (Schleifspuren) infolge der Ausbildung einer glasierten Oberfläche resultieren und/oder durch eine thermische Verdichtung hervorgerufen werden. Auch BAHARAV beschrieb die Reduktion der Defekttiefe bei Erzeugung einer glasierten Keramikoberfläche [4].

Die Ergebnisse lassen erkennen, dass für die untersuchten fräsbaren Feldspatkeramiken die Notwendigkeit eines abschließenden Brandes besteht, da mit Ausnahme der aluminiumoxidverstärkten Keramiken 20/9/1A und D 08/01 eine thermische Nachbehandlung zu einem höheren Biegefestigkeitswert führte. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert auch CAD/CAM-gearbeitete Restaurationen einer thermischen Nachbehandlung zu unterziehen, um eine Aufwertung der Restauration zu erzielen.

Auch der Grad der Politur scheint einen Einfluss auf die Biegefestigkeit der ungebrannten Keramiken auszuüben, der allerdings auf einem Signifikanzniveau von 0,05 als nicht signifikant einzustufen ist. Je kleiner die Korngröße des Schleifkörpers gewählt wurde, um so höhere Biegefestigkeitswerte resultierten. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die erzeugten Schleifspuren als Defekte oder Mikrorisse angesehen werden können, von denen eine Keilwirkung ausgeht. Wie schon im Kapitel 2 erläutert wurde, steigt mit der Tiefe des Risses die lokal wirkende Spannung. Die auftretenden Kräfte konzentrieren sich an Defekten und erreichen an der Rissspitze ein Vielfaches der außen wirkenden Spannung [81, 104]. Bei kontinuierlich ansteigender Krafteinwirkung führt das Risswachstum des tiefsten Risses zum katastrophalen Bruch, was einem überkritischen Risswachstum entspricht. Aus diesem Grund ist der Wert der Biegefestigkeit bei Vorliegen tieferer Defekte, wie sie beispielsweise bei einer gröberen Körnung des Poliermittels auftreten, reduziert. Die Politur mit einem gröberen

Schleifkörper ist aufgrund der Potenzierung der wirkenden Kräfte mit Zunahme der Risstiefe als kritisch einzuschätzen, da die kritische Spannung früher erreicht wird.

Entscheidend für den Wert der Biegefestigkeit ist ebenfalls die Lage des Schleifdefektes. Defekte auf der Zugseite einer Restauration schwächen eine Keramik stärker als gleichdimensionierte Defekte auf der druckbelasteten Seite einer Keramik, da die Rissflanken bei Auftreffen von Zug-, Scher- und Torsionskräften geöffnet werden; eine Rissverlängerung resultiert [60, 81]. Im Gegensatz dazu schließen sich die Rissflanken auf der druckbeanspruchten Seite, wodurch das Risswachstum stagniert. Sowohl auf der Restorationsinnenseite als auch auf der Außenseite einer vollkeramischen Restauration treten durch Unebeneinheiten der Kavitätenwände, ungebrochene Kavitätenränder und durch Inkongruenzen zwischen Präparationsform und Restauration Kombinationen von Druck-, Zug- und Scherkräfte auf. Durch die Imitation der natürliche Zahnform (Fissuren- und Höckerrelief) bei der Anfertigung vollkeramischen Zahnersatzes wird abhängig von der Lage des okklusalen Kontaktes ebenfalls eine Kombination aus Zug-, Scher- und/oder Druckkräften erzeugt. Aus diesem Grund schwächt sowohl das okklusale Einschleifen einer keramischen Restauration als auch die Bearbeitung der Passgenauigkeit an der Restorationsinnenseite die Keramik gleichermaßen.

6.1.1.2. Mögliche Fehlerquellen bei der Bestimmung der Biegefestigkeit

Einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Biegefestigkeit übt die Lagerung der Keramik aus. Um eine Abhängigkeit von der Lagerung aufzuzeigen, wurden die Werte der unverzüglich nach der Herstellung gebrochenen Prüfkörper mit einer weiteren Versuchsreihe der gleichen Keramik (DC Cristall, gebrannt bei einem Brenntemperaturmaximum von 1000°C) verglichen, bei der eine Lagerung der Prüfkörper in 37°C warmem, destilliertem Wasser über einen Zeitraum von 7 Tagen erfolgte. Anschließend wurden die Prüfkörper unter Beibehaltung der Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/min im Dreipunkt-Biegeversuch gebrochen. Die Lagerung in destilliertem Wasser führte zu einer Reduktion der Biegefestigkeit von 100,05 MPa auf 63,50 MPa. Dies entspricht einer Senkung der mittleren Biegefestigkeit um 37%.

Die beobachtete Abhängigkeit des Biegefestigkeitswertes von der Lagerungsart wirft die Frage auf, was einer derartigen Festigkeitssenkung zugrunde liegt. Denkbar ist eine Reduktion der Biegefestigkeit durch die Einlagerung von Wasser in bestehende Defekte der Keramik, so dass der Wasser-

druck die Rissflanken auseinanderdrängt und somit das unterkritische Risswachstum beschleunigt. Das Auftreten eines Risswachstums setzt eine Trennung der Tetraederbindungen im silikatischen Anteil der Keramiken voraus. Bei Anlagerung der Wassermoleküle an ein SiO_4 -Tetraeder tritt eine Vorverformung der Tetraeder ein, wodurch die für einen Rissfortschritt benötigte Energie reduziert wird. Die Senkung der für einen Rissfortschritt erforderlichen Energie fällt bei einer Belastung der Keramik während eines korrosiven Angriffs am stärksten aus („Spannungsrisskorrosion“). Das Risswachstum wird dadurch erleichtert [3, 33, 37, 78, 81, 83, 103].

Eine weitere Fehlerquelle stellt die unvollständige Entfernung von oberflächlichen Defekten während des Trimmvorganges dar. Dies kann durch eine ungleiche Politur hervorgerufen werden. Ausrisse, die bei dem Schneiden der Prüfkörper erzeugt werden, können bei nicht exakter Brechung der Kanten als Riss wirken. Derartige Schleifdefekte reduzieren den Wert der Biegefestigkeit, da der katastrophale Bruch aufgrund der vorliegenden Oberflächendefekte früher eintritt. Sowohl die Defektanzahl als auch die Defekttiefe übt einen Einfluss auf die Höhe der gemessenen Werte aus. Eine Politur keramischer Restaurationen ist dringend zu empfehlen, um eine Verringerung der Risstiefe zu erreichen. Bei der Vorbereitung der Biegefestigkeitsmessung ist auf eine gleichmäßige Politur der Prüfkörper sowie auf die Entfernung sämtlicher Ausrisse und Abplatzungen zu achten.

Das Einwirken einer Druckbelastung außerhalb der Prüfkörpermitte stellt einen weiteren möglichen Fehler dar.

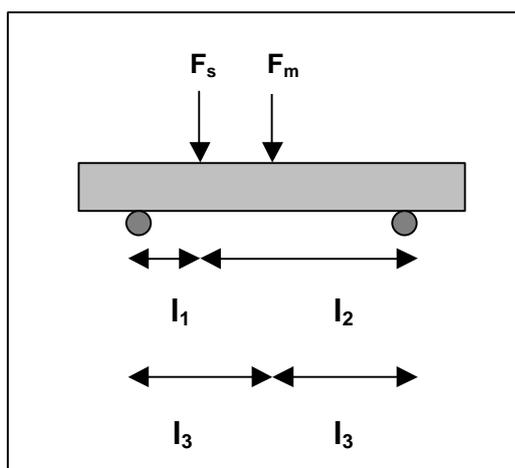


Abb. 6.1.: Aufbau des Dreipunkt-Biegeversuches bei seitlicher Verschiebung (F_s) des Druckstempels sowie bei mittlerer Belastung (F_m)

Um eine mögliche Abhängigkeit zu erkennen, wurden die Ergebnisse der regelrecht gebrochenen Prüfkörper der Keramik DC Cristall (Brenntemperatur 1000°C) mit den Biegefestigkeitswerten einer weiteren Versuchreihe verglichen, bei der eine seitliche Verschiebung des Stempels vorgenommen worden ist (siehe Abb. 6.1.), so dass die Kraft außerhalb der Probenmitte auftraf. Die seitliche Verschiebung des Druckstempels verursachte eine Senkung der Biegefestigkeit auf 67,45 MPa, was einer Verringerung der Festigkeit um 32,58% entsprach. Es wird deutlich, dass eine mittige Belastung der Prüfkörper eingehalten werden muss, um eine Verzerrung der Ergebnisse zu verhindern. Als weitere Fehlerquelle kommt die Lage des Prüfkörpers im Brennofen in Betracht, die zu einer Ausbildung unterschiedlich glasierter Keramikoberflächen führt. Bei einer flachen Lagerung der Proben entstand auf der einen Prüfkörperseite eine gut glasierte Oberfläche und eine weniger glasierte Oberfläche auf der entgegengesetzten Seite. Die weniger glasierte Oberfläche spiegelte somit die Unebenheiten der Unterlage wieder. Sie diente als Auflagefläche des Prüfkörpers. Um diese Beobachtung aufzugreifen, wurde die Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Verwendung der besser glasierten Oberfläche als Druck- oder Zugseite untersucht. Die Biegefestigkeitswerte der zwei Messgruppen unterschieden sich lediglich um 0,43 MPa, so dass eine Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Lage der glasierten Prüfkörperoberfläche ausgeschlossen werden kann. In diesem Versuch wurde die ausschließlich glasierte Oberfläche untersucht, die keine künstlich gesetzten Defekte aufwies. Aus diesem Grund bleibt die Auswirkung des Einschleifens keramischer Restaurationen in diesem Versuch unberücksichtigt und kann somit nicht beurteilt werden.

Ebenfalls denkbar ist, dass Abweichungen in der Prüfkörpergröße den Wert der Biegefestigkeit beeinflussen. Die Zunahme des Prüfkörpervolumen geht mit einem relativen Anstieg der Porenanzahl einher. Die höhere Porenanzahl schwächt die Keramik aufgrund der Defektwirkung, die von jeder einzelnen Pore ausgeht. Die Einflussnahme des Größeneffektes auf den Wert der Biegefestigkeit kann durch die Vereinheitlichung der Prüfkörpergröße ausgeschlossen werden. Allerdings erwies sich die Herstellung von exakt gleichdimensionierten Prüfkörpern aufgrund der abweichenden Preformgröße der untersuchten Keramiken als nur schwer umsetzbar.

6.1.2. Materialprüfung

6.1.2.1. Gegenüberstellung der geprüften Keramiken

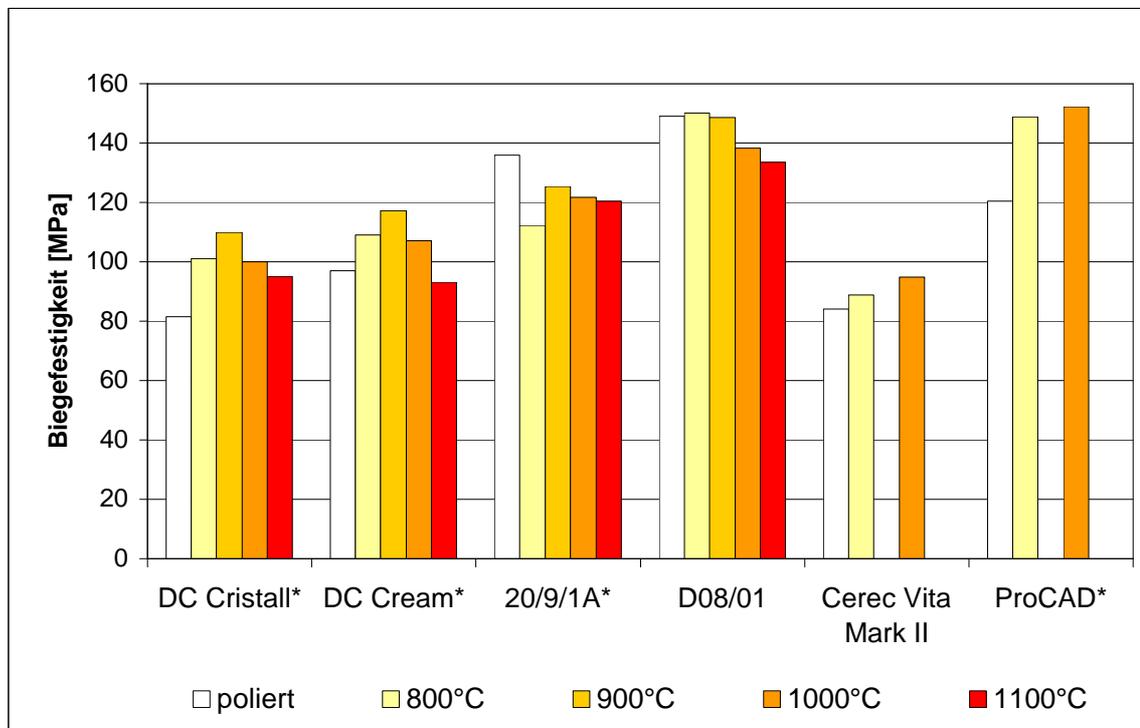


Abb. 6.2.: Gegenüberstellung der mittleren Biegefestigkeitswerte der untersuchten Keramiken

Die Abbildung 6.2. bietet einen Überblick über die optimale thermische Behandlung der untersuchten Keramiken. Die mit einem Sternchen markierten Keramiken wiesen zwischen der optimalen Vorbehandlung und der ungünstigsten Vorbehandlungsart eine signifikante Abweichung der Biegefestigkeitswerte auf. Gleichzeitig ermöglicht das Diagramm der Abbildung 6.2. einen Vergleich der keramischen Materialien anhand der mittleren Biegefestigkeitswerte. Statistisch wird die mittlere Biegefestigkeit der optimal thermisch behandelten Keramiken in der Tabelle 6.2. ausgewertet.

Die aluminiumoxidangereicherte Feinpartikel-Feldspatkeramik Cerec Vita Mark II erreichte bei der Gegenüberstellung der untersuchten Keramiken die geringste Biegefestigkeit. Die aus den drei Versuchsreihen ermittelten Biegefestigkeitswerte lagen jeweils unter 100 MPa. Tendenziell konnte festgestellt werden, dass eine thermische Behandlung der Dentalkeramik Cerec Vita Mark II mit einer Festigkeitssteigerung einherging, auch wenn die gemessene Abweichung auf einem Signifikanzniveau von $p=0,05$ nicht signifikant ausfiel. Die Ursache dieser Festigkeitsentwicklung könnte in der

Ausbildung von Leuzitkristallen liegen, deren Anteil, wie schon erwähnt, wesentlich durch die Brennführung und den Pottaschegehalt (K_2O) beeinflusst wird. Ein abschließender Brand ist somit empfehlenswert.

Tab. 6.2.: Statistische Untersuchung der Biegefestigkeitswerte (Versuchsreihen, die zum Biegefestigkeitsmaximum führten)

	DC Cristall (900°C)	DC Cream (900°C)	20/9/1A (poliert)	D 08/01 (800°C)	Cerec Vita Mark II (1000°C)	ProCAD (1000°C)
	$\sigma=109,99\text{MPa}$	$\sigma=117,20\text{MPa}$	$\sigma=136,00\text{MPa}$	$\sigma=150,03\text{MPa}$	$\sigma=94,81\text{MPa}$	$\sigma=152,34\text{MPa}$
DC Cream	F= 0,43 t= 0,66 p= 0,520 nicht sign.					
20/9/1A	F= 5,87 t= 2,42 p= 0,031 signifikant	F= 4,73 t= 2,17 p= 0,049 signifikant				
D 08/01	F=17,12 t= 4,14 p= $8 \cdot 10^{-4}$ signifikant	F=16,00 t= 4,00 p= 0,001 signifikant	F= 5,80 t= 2,41 p= 0,032 signifikant			
Cerec Vita Mark II	F= 3,12 t= -1,77 p= 0,095 nicht sign.	F= 9,97 t= -3,16 p= 0,006 signifikant	F=112,30 t= -10,60 p= $5 \cdot 10^{-8}$ signifikant	F=114,52 t= -10,70 p= $6 \cdot 10^{-9}$ signifikant		
Pro CAD	F=13,35 t= 3,65 p= 0,002 signifikant	F=11,14 t= 3,34 p= 0,004 signifikant	F= 2,48 t= 1,57 p= 0,138 nicht sign.	F= 0,06 t= 0,25 p= 0,807 nicht sign.	F=47,91 t= -6,92 p= $2 \cdot 10^{-6}$ signifikant	

Lediglich die Biegefestigkeit der Keramik DC Cristall wich nicht signifikant von Cerec Vita Mark II ab, während sich die anderen betrachteten Keramiken signifikant von Cerec Vita Mark II unterschieden.

Aus dem Diagramm der Abbildung 6.2. ist ersichtlich, dass das Optimum der thermischen Behandlung für die Keramiken DC Cristall und DC Cream bei einem Temperaturmaximum von 900°C erreicht wurde. Bei einer derartigen Vorbehandlung unterschieden sich die beiden Keramiken in der Biegefestigkeit nicht signifikant. Sowohl eine weitere Erhöhung der Brenntemperatur als auch eine Verringerung des Temperaturmaximum senkte die Widerstandsfähigkeit beider Keramiken gegen Biegebeanspruchung. Die Biegefestigkeit fiel sowohl im ungebrannten Zustand, als auch bei einer maximal gewählten Brenntemperatur von 1100°C auf einen Wert von unter 100 MPa. Für DC Cristall und für DC Cream ist die Notwendigkeit einer abschließenden Temperung bei einem

Temperaturmaximum zwischen 800°C und 1000°C gegeben, wodurch die beiden betrachteten Keramiken eine signifikante Festigkeitssteigerung erfahren. Bei beiden Keramiken korrelieren die Messergebnisse mit der empfohlenen Brennführung des Herstellers.

Bei der Gegenüberstellung der untersuchten Keramiken erzielte ProCAD die höchste Biegefestigkeit. Der gemessene Biegefestigkeitswert hob sich signifikant von den zuvor betrachteten Keramiken DC Cristall, DC Cream und Cerec Vita Mark II ab. Das Biegefestigkeitsmaximum wurde bei einer Brenntemperatur von 1000°C erreicht. Auffällig war, dass die Biegefestigkeit in jeder der drei Versuchsreihen 100 MPa überstieg. Der Biegefestigkeitswert der thermisch unbehandelten Keramik unterschied sich signifikant von der maximal erzielten Biegefestigkeit ($T_{\max} = 1000^\circ\text{C}$). Aus diesem Grund ist auch für ProCAD eine thermische Nachbehandlung empfehlenswert. Ein abschließender Brennvorgang bewirkt eine Aufwertung der keramischen Restauration, da der Leuzitgehalt der Keramik unter anderem von der Wärmebehandlung beeinflusst wird [16, 112]. Auch CHEN beschrieb, dass die glasierte Keramik ProCAD eine signifikant höhere Bruchfestigkeit im Vergleich zur ungetemperten, ausschließlich polierten Keramik besitzt [15]. ProCAD besitzt im Vergleich zu den zuvor genannten Keramiken den höchsten K_2O -Gehalt, was auf einen hohen Leuzitkristallanteil schließen lässt. Gleichzeitig weist die entsprechende Keramik den höchsten SiO_2 -Anteil auf, was ebenfalls zu einer Festigkeitssteigerung führt. ProCAD bietet im Vergleich zu den anderen Keramiken eine größere Sicherheit.

Die Keramiken D 08/01 und 20/9/1A sind Weiterentwicklungen der Keramik DC Cream. Beide werden derzeit noch nicht vermarktet. Sie besitzen im Vergleich zu DC Cream einen höheren Aluminiumoxidanteil, welcher sich deutlich auf den Wert der Biegefestigkeit auswirkt. Beide Weiterentwicklungen erzielten in allen durchgeführten Versuchsreihen Biegefestigkeitswerte, die deutlich die 100 MPa überstiegen. Von der leuzitverstärkten Glaskeramik ProCAD unterschieden sie sich nicht signifikant, während DC Cristall, DC Cream und Cerec Vita Mark II signifikant in ihrer Biegefestigkeit abwichen. Es zeigte sich, dass die Biegefestigkeit von D 08/01 durch eine thermische Behandlung fast unverändert blieb, während ein abschließender Brand der Keramik 20/9/1A sogar mit einer Senkung der Biegefestigkeit einherging. Bei beiden Keramiken kann auf einen abschließenden Brand verzichtet werden.

6.1.2.2. Vergleich der Messergebnisse mit veröffentlichten Biegefestigkeitswerten der Keramiken Cerec Vita Mark II und ProCAD

Vergleicht man die erzielte Biegefestigkeit von Cerec Vita Mark II mit den in der Literatur publizierten Werten (siehe Kap. 2.7.2.), so kann eine Übereinstimmung zu den von THOMPSON [128], TINSCHERT [132] und MARX [82] veröffentlichten Angaben festgestellt werden. Die von LAWN [69], SEGHI [120], BIENIEK [9], und KÜMIN [64] publizierten Werte liegen 20-30 MPa über den erhaltenen Messwerten, was einer Abweichung von 20-30% entspricht. ROSENBLUM [104] und SCHWICKERATH [114] gaben für Cerec Vita Mark II eine Biegefestigkeit von über 150 MPa an. Diese Angaben weichen annähernd 60% von der erzielten Biegefestigkeit ab. Eine Überbewertung der Keramik könnte die Folge sein.

Die Fa. Ivoclar gibt in dem Technischen Datenblatt zu ProCAD eine Biegefestigkeit von 140 MPa für die unglasierte Keramik an. Weiterhin ist in der wissenschaftlichen Dokumentation, die die Firma auf interne Angaben stützt, eine Biegefestigkeit von 180-200 MPa für die glasierte Keramik publiziert [139]. Diese Werte übersteigen die Messergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen um mindestens 20 MPa, was einer Differenz von wenigstens 15% entspricht. Die Abweichung der veröffentlichten Biegefestigkeitswerte zu den erhaltenen Messwerten liegt innerhalb der Standardabweichung der vorgenommenen Versuchsreihen.

GIORDANO et al veröffentlichte ebenfalls Ergebnisse aus Versuchsreihen, in denen die Abhängigkeit der Biegefestigkeit vom Grad der Politur untersucht worden ist [38]. Diese werden in der Tabelle 6.3. den Ergebnissen der vorgenommenen Versuchsreihen sowie der Wissenschaftlichen Dokumentation von ProCAD der Fa. Ivoclar [139] gegenübergestellt.

Tab. 6.3.: Vergleich der von der GIORDANO [38] und Fa. Ivoclar [139] veröffentlichten Biegefestigkeit sowie der gemessenen Biegefestigkeit für die Keramik ProCAD und Cerec Vita Mark II

	30 µm	15 µm	10 µm	8 µm	3 µm
Cerec Vita Mark II					
GIORDANO et al FA. IVOCLAR Messungen	113,14 MPa 46 MPa	53 MPa	83,72 MPa	52 MPa	120,36 MPa
ProCAD					
FA. IVOCLAR Messungen	49 MPa	73 MPa	120,35 MPa	78 MPa	

Die Wissenschaftliche Dokumentation von ProCAD [139] stützt sich auf Untersuchungen, die von GRAF durchgeführt worden sind. In der beschriebenen Versuchsreihe wurden die Keramiken Cerec Vita Mark II und ProCAD gegenübergestellt, die jeweils auf 30 μm , 15 μm und 8 μm getrimmt wurden. Wie erwartet, ist ein Anstieg der Biegefestigkeit bei Verringerung der Oberflächenrauheit beschrieben. Stellt man die Ergebnisse der durchgeführten Messreihe, bei der die Keramikprüfkörper auf 10 μm polierte wurden, den aus der Wissenschaftlichen Dokumentation gegenüber, weichen diese deutlich voneinander ab. Beim Vergleich der entsprechenden Biegefestigkeitswerte stellt sich die Frage, woraus diese große Differenz zwischen Messwerten und veröffentlichten Werten resultiert. GIORDANO ermittelte die Biegefestigkeit im Vierpunkt-Biegeversuch [38].

In der Versuchsvorbereitung konnte festgestellt werden, dass die gemessenen Biegefestigkeitswerte der ungebrannten Prüfkörper stark mit der Trocknungszeit nach dem vorgenommenen Schleifvorgang korrelieren. Prüfkörper, die nach der Politur über Nacht trocken gelagert wurden, erreichten höhere Biegefestigkeitswerte als solche, die sofort nach der vorgenommenen Politur gebrochen worden sind. Eine Ursache des veränderten Festigkeitsverhalten könnte in der Einflussnahme des Wassers auf die Ausbreitung bestehender Risse liegen. Die Kombination von einer hohen Kraftereinwirkung auf den Riss und der Senkung der Oberflächenenergie an der Risspitze, die bei einer feuchten Lagerung hervorgerufen wird, bewirkt ein Risswachstum [78, 83]. MARX beschrieb, dass Wasser die „Geschwindigkeit des Risswachstums um mehr als das Millionenfache beschleunigen“ kann [81]. Aus der Wissenschaftlichen Dokumentation ProCAD der Fa. Ivoclar [139] wird nicht ersichtlich, ob die Prüfkörper unverzüglich nach dem Trimmvorgang gebrochen wurden oder eine Trocknung der Keramik erfolgte. In den vorgenommenen Untersuchungen erfolgte eine trockene Lagerung der Prüfkörper von mindestens 24 Stunden. Eine abweichende Vorgehensweise könnte die Ursache einer derartigen Abweichung darstellen. Es ist fraglich, ob eine Vergleichbarkeit der Werte durch die möglicherweise verschieden gewählten Versuchsbedingungen gegeben ist.

6.1.3. Weibullfestigkeit

Die graphische Darstellung der Weibullanalyse spiegelt sowohl im Anstieg des Weibullplots (m) als auch in seinem Niveau (σ_0) das natürliche Risspektrum der betreffenden Keramik wider [82]. Die Weibullschen Parameter m und σ_0 charakterisieren laut KHALILI „die „Schwächeverteilung“ der einzelnen Glieder“ in einem Werkstoff [60]. Die Bestimmung des Weibullmoduls m ermöglicht die Beurteilung der Zuverlässigkeit einer Keramik, da er die Streuung in der Verteilung der Festigkeitswerte erfasst. In der Größe m findet die Defektgrößenverteilung Ausdruck [140]. Somit weisen Keramiken, die einen kleinen Weibullmodul besitzen, eine enge Rissverteilung auf. In der Verteilung der ermittelten Festigkeitswerte treten bei diesen keramischen Materialien verstärkt „Ausreißer“ auf, wodurch deren Zuverlässigkeit als kritisch einzuschätzen ist. Bei Herstellung einer vollkeramischen Restauration mit niedrigem Weibullmodul besteht das Risiko des vorzeitigen Versagens aufgrund der Wahrscheinlichkeit unterer „Ausreißer“.

6.1.3.1. Gegenüberstellung der geprüften Keramiken

Das Diagramm in der Abbildung 6.3. stellt die ermittelten Weibullmodule der untersuchten Keramiken dar.

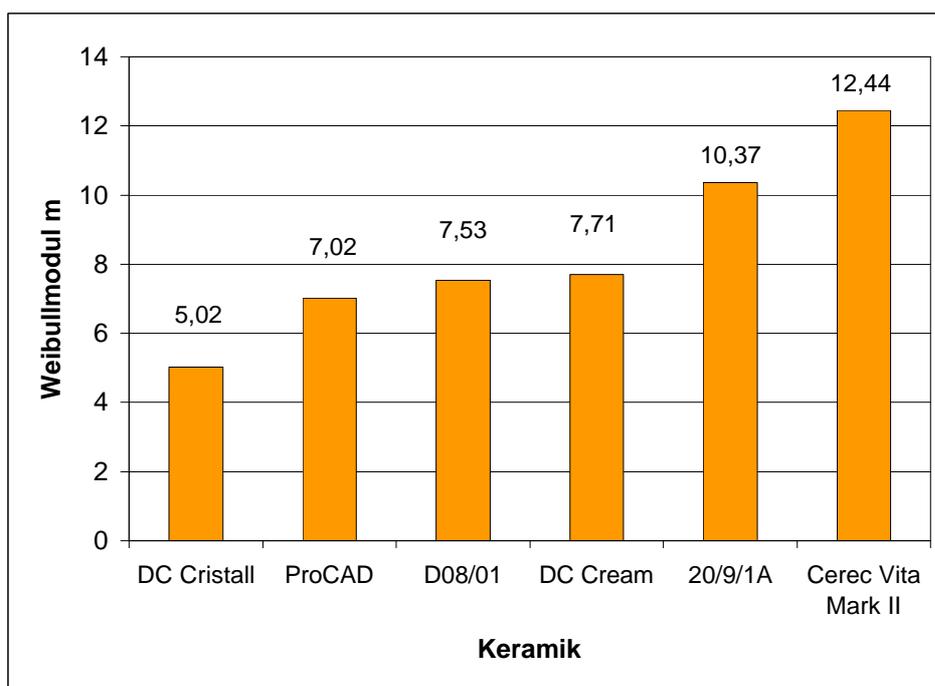


Abb. 6.3.: Gegenüberstellung der Weibullmodule der untersuchten Keramiken

Die Keramik Cerec Vita Mark II erzielte mit 12,44 den höchsten Weibullmodul der betrachteten Keramiken. Demnach trat eine geringe Streuung ihrer Festigkeitswerte auf.

Auch die Keramik 20/9/1A wies eine relativ enge Weibullverteilung auf. Dadurch bietet deren Festigkeitsangabe eine gewisse Zuverlässigkeit.

Den geringsten Weibullmodul erreichte von den betrachteten Keramiken DC Cristall. Auch ProCAD, D 08/01 und DC Cream erlangten nur einen geringen Weibullmodul. Sie wiesen eine relativ hohe Streuung in ihren Festigkeitswerten auf.

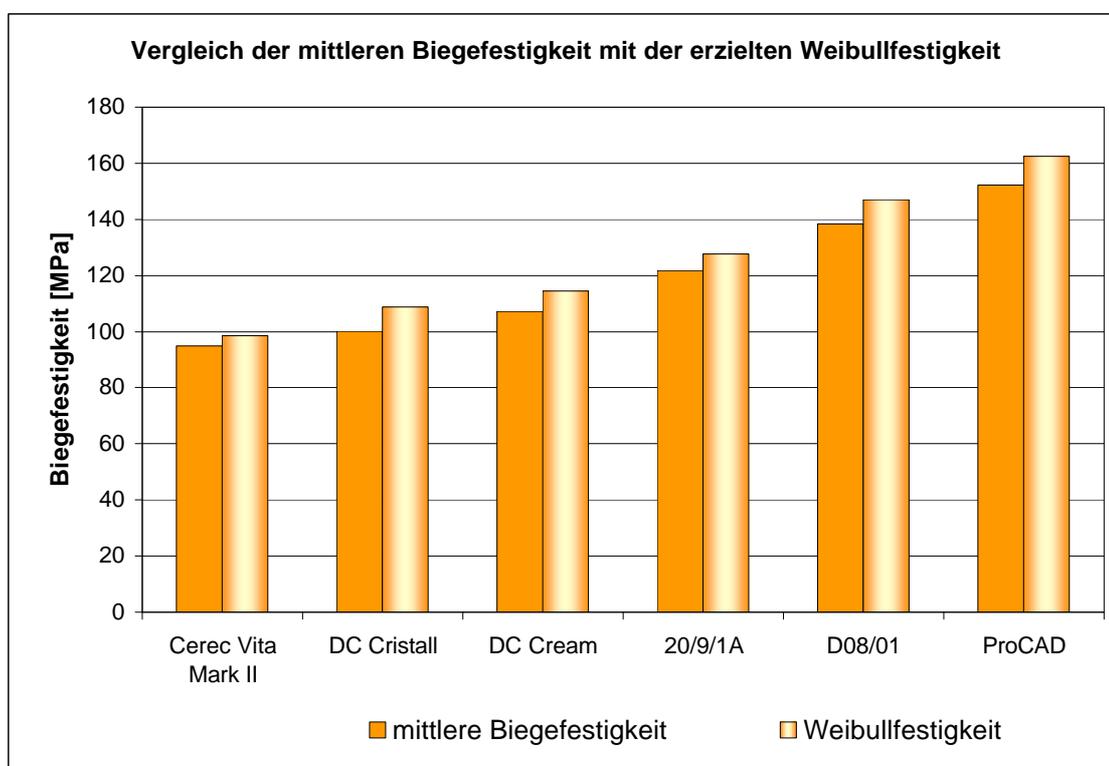


Abb. 6.4.: Vergleich der mittleren Biegefestigkeit σ und Weibullfestigkeit σ_0

Betrachtet man das Diagramm der Abbildung 6.4., das die Weibullfestigkeit σ_0 der mittleren Biegefestigkeit gegenüberstellt, wird ersichtlich, dass Cerec Vita Mark II die geringste Weibullfestigkeit besaß. Ausschließlich für die Keramik Cerec Vita Mark II resultierte eine mittlere Biegefestigkeit und Weibullfestigkeit, die unter 100 MPa lag. Auf der anderen Seite erreichte ProCAD als einzige Keramik eine mittlere Biegefestigkeit und Weibullfestigkeit von über 150 MPa.

6.1.3.2. Vergleich der Messergebnisse mit veröffentlichten Weibullfestigkeitswerten der

Keramiken Cerec Vita Mark II und ProCAD

Vergleicht man die Werte der vorgenommene Weibullanalyse mit veröffentlichten Werten der Keramik Cerec Vita Mark II, stimmen diese in Bezug auf die Weibullfestigkeit weitestgehend überein. Eine Abweichung von rund 10% besteht zu den Werten von TINSCHERT [132] und FISCHER [26].

Tab. 6.4.: Vergleich der vorgenommenen Weibull-Analyse mit veröffentlichten Werten für die Keramik Cerec Vita Mark II und ProCAD

	s	s_0	m
Cerec Vita Mark II			
Durchgeführte Weibull-Analyse	94,81 MPa	98,49 MPa	12,44
Chen [15]			8,80
Tinschert [132]	86,30 MPa	88,20 MPa	23,60
Marx [82]	88,00 MPa	103,00 MPa	23,60
Kunzelmann [65]			8,80
Fischer [26]		88,00 MPa	24,00
ProCAD			
Durchgeführte Weibull-Analyse	152,34 MPa	162,39 MPa	7,02
Chen [15]			(poliert) 9,70
			(glasiert) 12,50

Eine große Abweichung wird beim Vergleich der Weibullmodule ersichtlich. Während TINSCHERT [132], MARX [82] und FISCHER [26] für Cerec Vita Mark II einen Weibullmodul von 23,6 bzw. 24 ermittelt haben, erzielte die entsprechende Keramik in der durchgeführten Analyse einen Weibullmodul von 12,44. KUNZELMANN [65] und CHEN [15] gaben für die Keramik einen Weibullmodul von 8,8 an. CHEN [15] ermittelte auch den Weibullmodul für die ausschließlich polierte (9,7) und für die glasierte Keramik ProCAD (12,55). Diese liegen über dem für ProCAD ermittelten Weibullmodul von 7,02. Die vorgenommenen Weibullanalysen der Keramiken Cerec Vita Mark II und ProCAD zeigten ausschließlich eine Tendenz des Festigkeitsverhalten beider Materialien, da für beide Keramiken nur eine geringe Prüfkörperzahl von jeweils 10 vorlag. Bei einer kleinen Anzahl an Prüfkörpern besteht nur ein geringer Unterschied zwischen σ und σ_0 . Für die Bestimmung der Weibullfestigkeit σ_0 wird eine Prüfkörperanzahl von mindestens 20 empfohlen [82], während für die Ermittlung des Weibullmoduls m eine Prüfkörpermindestanzahl von 30 gefordert wird. Eine Verifizierung der Weibullparameter für diese beiden Keramiken ist erforderlich.

6.2. Risszähigkeit

6.2.1. Prüfmethodik

MARX beschrieb [81], dass die Höhe der gemessenen Biegefestigkeit einer Vollkeramik entscheidend von der „Güte und Sorgfalt der Präparation (Verdichtung, Poren- und Lunkerfreiheit, Oberflächen-güte)“ beeinflusst wird. Ein Vorteil der Bruchzähigkeitsbestimmung liegt in der sehr viel geringeren Abhängigkeit des Wertes von präparativen Einflüssen.

Die kritische Risszähigkeit K_{Ic} erfasst die Widerstandsfähigkeit keramischer Materialien gegen Sprödbrüche. Sie kann wie im Kapitel 2.8. erwähnt durch verschiedene Methoden ermittelt werden. Bei der Prüfung von Dentalkeramiken besteht neben der Erzeugung von Defekten mit einer nachvollziehbaren Rissgeometrie unter Aufbringung einer definierten Kraft das Problem, dieses auf kleinen Prüfkörperflächen umsetzen zu müssen. Es stellte sich die Frage, welche der im Kapitel 2.8. beschriebenen Methoden favorisiert werden sollte hinsichtlich einer möglichst genauen Erfassung der Materialeigenschaft bei gleichzeitig einfacher Durchführbarkeit. Die Indentermethode stellt eine wenig aufwendige Methode dar [19, 108, 119, 125]. Bei ihrer Anwendung entstehen unter Einwirkung einer festgelegten Kraft gut messbare Eindrücke und Risse mit einer nachvollziehbaren Rissgeometrie. Die Indentermethode wurde im Rahmen dieser Arbeit gewählt, da sie in jedem Labor anwendbar und somit gut reproduzierbar ist. Ein weiterer Vorteil der Bestimmung des K_{Ic} -Wertes mit Hilfe von Vickershärteeindrücken liegt in der Möglichkeit sehr kleine Prüfkörper zu nutzen.

Neben der Vielzahl an Bestimmungsmethoden besteht, wie bereits im Kapitel 2.8.2. aufgelistet worden ist, auch für die Berechnung der Risszähigkeit eine große Anzahl an Rechenansätzen.

Die Verwendung verschiedener Berechnungsarten führt zu Differenzen in der Höhe des K_{Ic} -Wertes, so dass eine Vergleichbarkeit von publizierten Risszähigkeitswerten nicht mehr gegeben ist. Die Verlässlichkeit der Indentermethode hängt somit entscheidend von der Wahl der Berechnungsmethode ab. Auch Abweichungen in der Härtewertberechnung und die Verwendung eines standardisierten E-Modulwertes für Keramiken verhindern eine Vergleichbarkeit der in der Literatur angegebenen Bruchzähigkeitswerte. Eine Reproduzierbarkeit veröffentlichter Werte wird aus diesen Gründen unmöglich.

6.2.1.1. Die Berechnung des Härwertes

Die verschiedenen publizierten Rechenansätze weichen unter anderem in der Verwendung des Härwertes ab. Die Differenzen bei der Härwertberechnung entstehen aus einer Aufrundung der Vickershärte.

$$H(20) = 0,5 F/a^2$$

$$H(21) = 0,47 F/a^2$$

$$H(22) = 0,4635 F/a^2$$

Gleichung zur rissmusterübergreifenden Berechnung der Risszähigkeit

(12) Nach ANSTIS	$K_{Ic} = 0,016 (E/H)^{1/2} Fc^{-3/2}$	H(20)
------------------	--	-------

Gleichungen zur Berechnung der Risszähigkeit für mediane, halbkreisförmige Rissmuster:

(13) Nach LAWN, EVANS, MARSHALL	$K_{Ic} = 0,028 Ha^{1/2} (E/H)^{1/2} (c/a)^{-3/2}$	H(22)
---------------------------------	--	-------

(14) Nach NIIHARA	$K_{Ic} = 0,067 Ha^{1/2} (E/H)^{0,4} (c/a)^{-3/2}$	H(22)
-------------------	--	-------

Gleichungen für die Risszähigkeitsbestimmung bei Vorliegen von Palmqviststrissen:

(15) Nach ANSTIS in Munz / Fett	$K_{Ic} = 0,032 Ha^{1/2} (E/H)^{1/2} (c/a)^{-3/2}$	H(20)
---------------------------------	--	-------

(16) Nach ANSTIS in Munz	$K_{Ic} = 0,057 Ha^{1/2} (E/H)^{2,4} (c/a)^{-3/2}$	H(22)
--------------------------	--	-------

(17) Nach NIIHARA	$K_{Ic} = 0,018 Ha^{1/2} (E/H)^{0,4} ((c/a) - 1)^{-1/2}$	H(20)
-------------------	--	-------

(18) Nach EVANS und CHARLES	$K_{Ic} = 0,16 Ha^{1/2} (c/a)^{-3/2}$	H(21)
-----------------------------	---------------------------------------	-------

(19) Nach LAWN und FULLER, TANAKA	$K_{Ic} = 0,0726 F/c^{3/2}$	
-----------------------------------	-----------------------------	--

Eine Vereinheitlichung der Härwertberechnung sollte angestrebt werden. Sinnvoll erscheint die exakte Berechnung des Härwertes nach der Vickers-Formel H(22), wie es unter anderem von MUNZ [92] empfohlen wurde.

Die Tabelle 6.5. demonstriert, wie stark sich der Aufrundungsfehler bei Verwendung der jeweils empfohlenen Härwertberechnung im Vergleich zur Nutzung eines exakt nach Vickers berechneten Härwertes auf den K_{Ic} -Wert auswirkt. Die resultierenden Risszähigkeitswerte der Keramiken DC Cristall, DC Cream, 20/9/1A, D 08/01, Cerec Vita Mark II und ProCAD wurden für die in der Literatur empfohlenen Berechnungsmöglichkeiten und den modifizierten Rechenansätzen mit Berechnung der jeweils exakten Vickershärte gegenübergestellt.

Verglichen wird die Einflussnahme der Härtewertberechnung für die Rechenansätze von ANSTIS (12), NIIHARA für mediane Risse (14), ANSTIS_{Munz/Fett} (15), NIIHARA für Palmqvistrisse (17) und EVANS/CHARLES (18), da der Rechenansatz nach LAWN/ EVANS/ MARSHALL (13) von einer exakten Vickershärteberechnung ausgeht [11, 71]. Im Rechenansatz nach LAWN/ FULLER (19) bleibt die Härte unberücksichtigt, weshalb dieser ebenfalls nicht aufgeführt wurde. Die Gleichung von ANSTIS_{Munz} (16) führt zu stark abweichenden K_{Ic} -Werten, weshalb dieser Ansatz keine Berücksichtigung fand.

Tab. 6.5.: Die Abhängigkeit des Risszähigkeitswertes von der Wahl der Härtewertberechnung

	DC Cristall	DC Cream	20/9/1A	D 08/01	Cerec Vita Mark II	ProCAD
(12) ANSTIS [MPa m^{1/2}]						
H(20) = 0,5 F/a² [2, 68, 108, 109, 125, 134]	1,00 ± 0,05	0,97 ± 0,09	1,22 ± 0,09	1,41 ± 0,13	1,11 ± 0,05	1,21 ± 0,07
H(21) = 0,47 F/a² [3, 37, 119, 121]	1,03 ± 0,05	1,00 ± 0,10	1,25 ± 0,10	1,46 ± 0,14	1,15 ± 0,05	1,25 ± 0,07
H(22) = 0,4635 F/a² [11, 63, 68, 71, 105]	1,04 ± 0,05	1,01 ± 0,10	1,26 ± 0,10	1,47 ± 0,14	1,15 ± 0,04	1,26 ± 0,07
(14) NIIHARA [MPa m^{1/2}]						
H(20) = 0,5 F/a² [94]	1,67 ± 0,08	1,61 ± 0,15	2,02 ± 0,17	2,35 ± 0,22	1,85 ± 0,09	2,01 ± 0,12
H(22) = 0,4635 F/a² [11]	1,59 ± 0,07	1,54 ± 0,14	1,93 ± 0,16	2,25 ± 0,21	1,77 ± 0,06	1,92 ± 0,12
(15) ANSTIS_{Munz/Fett} [MPa m^{1/2}]						
H(20) = 0,5 F/a² [19]	1,00 ± 0,05	0,97 ± 0,09	1,22 ± 0,09	1,41 ± 0,13	1,11 ± 0,05	1,21 ± 0,07
H(22) = 0,4635 F/a²	0,96 ± 0,04	0,93 ± 0,09	1,17 ± 0,09	1,36 ± 0,13	1,07 ± 0,04	1,17 ± 0,07
(17) NIIHARA [MPa m^{1/2}]						
H(20) = 0,5 F/a² [94]	1,33 ± 0,04	1,29 ± 0,06	1,49 ± 0,10	1,69 ± 0,12	1,41 ± 0,05	1,49 ± 0,07
H(22) = 0,4635 F/a² [71]	1,27 ± 0,04	1,23 ± 0,06	1,42 ± 0,10	1,61 ± 0,12	1,35 ± 0,05	1,42 ± 0,07
(18) EVANS/CHARLES [MPa m^{1/2}]						
H(21) = 0,47 F/a² [22]	1,51 ± 0,08	1,42 ± 0,12	1,78 ± 0,20	2,12 ± 0,21	1,67 ± 0,13	1,77 ± 0,15
H(22) = 0,4635 F/a² [71]	1,49 ± 0,08	1,40 ± 0,11	1,75 ± 0,20	2,10 ± 0,20	1,64 ± 0,12	1,75 ± 0,14

Vergleicht man die auf Anstis basierenden Rechenansätze (Gleichung 12 und 15), wird deutlich, dass der unter Nutzung der gerundeten Härte $H(20) = 0,5 F/a^2$ erzielte K_{Ic} -Wert in beiden Fällen

übereinstimmte. Aus der Verwendung der genauen Vickershärte $H(22)$ resultierte bei der Risszähigkeitsberechnung mit der ANSTIS-Gleichung (12) eine Erhöhung des K_{Ic} -Wertes um $0,04 - 0,06 \text{ MPa m}^{1/2}$. Der Einsatz der nicht gerundeten Vickershärte führte in der von Munz/ Fett modifizierten Anstis-Formel zu einer Senkung des K_{Ic} -Wertes um $0,04 - 0,05 \text{ MPa m}^{1/2}$. Diese berechneten Differenzen lagen innerhalb der Standardabweichung der jeweiligen Risszähigkeitsmesswerte und führten somit zu keiner veränderten Bewertung einer Keramik. Die festgestellten Abweichungen fielen nicht signifikant aus.

Bei den weiteren Rechenansätzen konnte bei Einsatz der gerundeten Vickers-Härte in jedem der Beispiele eine Erhöhung der berechneten Risszähigkeit festgestellt werden. Das heißt, dass die Nutzung des genauen Härtewertes nach Vickers mit einer Senkung des K_{Ic} -Wertes einherging. Am stärksten wurde eine Überbewertung der Keramiken durch die Rechenansätze nach NIIHARA (14, 17) hervorgerufen. Im Fall der Keramik DC Cristall lagen die realisierten Abweichungen der mit Hilfe der NIIHARA-Rechenansätze (14, 17) bestimmten Risszähigkeitswerte im signifikanten Bereich.

Um die Materialeigenschaften der Härte in die kritische Risszähigkeit einfließen zu lassen, sollte die Härte bei der Berechnung des K_{Ic} -Wertes berücksichtigt werden. Da, wie schon erwähnt, die Härte in dem von LAWN/ FULLER (19) empfohlenen Rechenansatz nicht enthalten ist, sollte diese Formel keine Anwendung finden.

Diese Problematik verdeutlicht die Notwendigkeit einer einheitlichen Härtewertberechnung. Eine Einigung über die Verwendung des Härtewertes ist unumgebar, um eine Vergleichbarkeit von publizierten Risszähigkeitswerten zu ermöglichen und um die Materialeigenschaften realistisch erfassen zu können. Es sollte dazu übergegangen werden, ausschließlich die exakte Vickershärte (22) zu verwenden.

6.2.1.2. Die Verwendung des E-Moduls

Der Elastizitätsmodul ist ein materialspezifischer Wert, der den Widerstand eines Werkstoffs gegen eine elastische Deformation beschreibt [33]. Er trifft eine Aussage über die Gesamtporosität eines Werkstoffes. Es besteht eine direkte Abhängigkeit des E-Moduls von der Dichte und gleichzeitig eine indirekt proportionale Abhängigkeit von der Porosität eines Materials [60]. Aus diesem Grund kann mit Hilfe des E-Moduls das Festigkeitsverhalten einer Keramik beschrieben werden. Um eine maxi-

male Aussagekraft der Bruchzähigkeit als materialspezifischen Kennwert zu erhalten, ist die Integration des E-Moduls in den Rechenwert notwendig. Wird die Materialkonstante E nicht für die Berechnung der Risszähigkeit genutzt, wie es bei den Rechenansätze von EVANS/ CHARLES (18) sowie von LAWN/ FULLER (19) der Fall zu sein scheint, bleibt diese wichtige werkstoffspezifische Eigenschaft im K_{Ic} -Wert unberücksichtigt. Aus den erwähnten Rechenansätzen von EVANS/ CHARLES (18) sowie LAWN/ FULLER (19) geht nicht hervor, ob ein pauschaler E-Modulwert in dem Basiswert der Gleichung impliziert ist. Die Verwendung eines pauschalen E-Modules ist als kritisch einzuschätzen, da er in diesem Fall stoffgruppenübergreifend Einsatz findet und somit nur bedingt materialspezifische Eigenschaften beschreiben kann. Laut EVANS [22] und SCHERRER [108] wird bei einem bekanntem E-Modul eine Genauigkeit für die kritische Risszähigkeit von 10% erzielt, während bei einem unbekanntem Elastizitätsmodul Abweichungen von 30% auftreten.

Die für Keramiken in der Literatur aufgeführten E-Modulwerte differieren stark. Der Sachverhalt birgt die Problematik in sich, dass unter dieser Bedingung keine Vergleichbarkeit der verschiedenen in der Literatur beschriebenen K_{Ic} -Werte gegeben ist, da meist unterschiedliche E-Module für die Berechnung der Risszähigkeit der gleichen Keramik Verwendung finden. Auch die Verlässlichkeit der veröffentlichten Werte muss unter solchen Gesichtspunkten hinterfragt werden. Eine objektive und vergleichende Bewertung einer Keramik wird somit unmöglich.

*Tab. 6.6.: Tabellarische Auflistung der publizierten
Elastizitätsmodule für Cerec Vita Mark II*

Keramik	E-Modul [GPa]	Literatur
Cerec Vita Mark II	63	[133]
	68	[69]
	69	[24, 83]
	73,4	[121]
	78	[128]

Auch ein stoffgruppenspezifischer E-Modulwert ist einem Pauschalwert gleichzusetzen, da er die realistischen Werkstoffeigenschaften der einzelnen Keramiken nicht erfasst. Aus diesem Grund spiegelt der berechnete K_{Ic} -Wert bei Nutzung eines gruppenspezifischen Basiswertes nicht die tatsächliche Risszähigkeit der jeweiligen Keramik wider.

Sinnvoller erscheint die Verwendung eines keramikspezifischen E-Moduls für die jeweils geprüfte Keramik. Ist der entsprechende Elastizitätsmodul nicht bekannt, könnte mit Hilfe des HOOKEschen Gesetzes [13]

$$(23 \text{ a}) \quad \sigma = \varepsilon E$$

$$(23 \text{ b}) \quad E = \sigma / \varepsilon$$

auf einen Wert zurückgegriffen werden, der sich unter Annahme einer 0,1%-igen Verformung zum Zeitpunkt des Bruches aus dem Ergebnis der Biegefestigkeitsuntersuchung errechnen lässt. In diesem Fall entspräche

$$(24) \quad E_{\sigma} = \sigma / 0,001 \text{ [MPa]}.$$

In der Tabelle 6.7. sind die K_{IC} -Werte der Keramiken DC Cristall, DC Cream, 20/9/1A, D 08/01, Cerec Vita Mark II und ProCAD ($T_{max}=1000^{\circ}\text{C}$) gegenübergestellt, die auf unterschiedlichen Elastizitätsmodulen basieren. Auf der einen Seite wurde ein E-Modulwert von 73,4 GPa verwendet, der auch von GEIS-GERSTORFER für Glaskeramiken [37] genutzt wurde sowie von WIEDERHORN [138] angewendet wurde. Diesem Wert wurde der von FISCHER publizierte Elastizitätsmodulwert von 69 GPa entgegengestellt [24]. Vergleichend wurde der für die jeweilige Keramik aus der mittleren Biegefestigkeit ermittelte E-Modulwert gegenübergestellt. Um die Abhängigkeit des Risszähigkeitswertes von der Wahl des E-Moduls zu demonstrieren, wurde ausschließlich ein Rechenansatz zur Verdeutlichung der Ergebnisse verwendet. Der K_{IC} wurde nach ANSTIS entsprechend der Formel (12)

$$K_{IC} = 0,016 (E/H)^{1/2} F_C^{-3/2} \quad H(22) = 0,463 F/a^2$$

berechnet. Der Härtewert wurde entsprechend dem Härteprüfverfahren nach Vickers aus der Formel $H(22)$ errechnet.

Die Möglichkeit der Berechnung des E-Moduls basierend auf der Biegefestigkeit bietet den Vorteil, dass die Materialeigenschaften der entsprechenden Keramik Berücksichtigung finden. Mit Hilfe dieser Methode können pauschale E-Modulwerte umgangen werden. Die Bestimmung des E-Modules aus dem Biegefestigkeitswert des jeweils verwendeten Prüfkörpers sollte angedacht werden, während für die vorgenommenen Berechnungen der Tabelle 6.7. die mittlere Biegefestigkeit herangezogen wurde.

Tab. 6.7.: Einflussnahme des E-Modulwertes auf die kritische Risszähigkeit K_{Ic}

Keramik	S [MPa]	K_{Ic} [MPa m ^{1/2}] E = 73,4 GPa	K_{Ic} [MPa m ^{1/2}] E = 69 GPa	K_{Ic} [MPa m ^{1/2}] E = S / 0,001	K_{Ic} [MPa m ^{1/2}] E = S _{90%} / 0,001
DC Cristall	100,05	1,04 ± 0,05	1,00 ± 0,04	1,21 ± 0,05	1,15 ± 0,05
DC Cream	107,14	1,01 ± 0,10	0,98 ± 0,09	1,22 ± 0,12	1,16 ± 0,11
20/9/1A	121,82	1,26 ± 0,10	1,22 ± 0,09	1,63 ± 0,12	1,54 ± 0,12
D 08/01	138,30	1,47 ± 0,14	1,42 ± 0,14	2,01 ± 0,19	1,91 ± 0,18
Cerec Vita Mark II	94,81	1,15 ± 0,04	1,12 ± 0,05	1,31 ± 0,05	1,24 ± 0,05
ProCAD	152,34	1,26 ± 0,07	1,22 ± 0,07	1,82 ± 0,10	1,72 ± 0,10

Aus der Nutzung der berechneten E-Modulwerte resultierte eine Erhöhung der Risszähigkeit, die statistisch signifikant ausfiel. Es müsste in weiteren Untersuchungen verifiziert werden, ob dieses Vorgehen zu einer realistischeren Bewertung einer Keramik beiträgt, da die Materialeigenschaft des Elastizitätsmoduls keramikspezifisch eingesetzt werden könnte. Um einer Überbewertung der keramischen Werkstoffe entgegenzuwirken, sollte eine Reduktion des Biegefestigkeitswertes auf 90% für die Berechnung des E-Moduls angedacht werden. Im Gegensatz zu der von FISCHER [24] publizierten Methode ermöglicht diese Vorgehensweise mit einem geringen technischen und zeitlichen Aufwand die Einbringung eines keramikspezifischen Wertes in die kritische Risszähigkeit.

Aus der Verwendung von Messwerten ist eine Verlässlichkeit der resultierenden Ergebnisse eher gegeben als beim Zurückgreifen auf pauschale Tabellenwerte. Aufgrund dessen entsteht eine Vergleichbarkeit der Risszähigkeitswerte verschiedener Keramiken.

6.2.1.3. Die Wahl des Rechenansatzes

Das Diagramm in der Abbildung 6.5. stellt die große Variationsbreite der Risszähigkeitswerte dar, die bei der Berechnung mit den verschiedenen Rechenansätzen auftrat. Um die Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Rechenwegen zu demonstrieren, wurde die Keramik DC Cristall ($T_{max}=1000^{\circ}C$) als Beispiel gewählt.

Die Höhe der Bruchzähigkeit variierte zwischen 0,84 MPa m^{1/2} und 1,59 MPa m^{1/2}. Ebenfalls wurde den der Literatur entnommenen Rechenansätzen der favorisierte Rechenansatz nach ANSTIS (Gleichung 12) gegenübergestellt, bei dem die Härte nach Vickers H(22) Einsatz findet und der E-Modul aus der gemessenen Biegefestigkeit ($E = \sigma_{90\%} / 0,001$) bestimmt wurde.

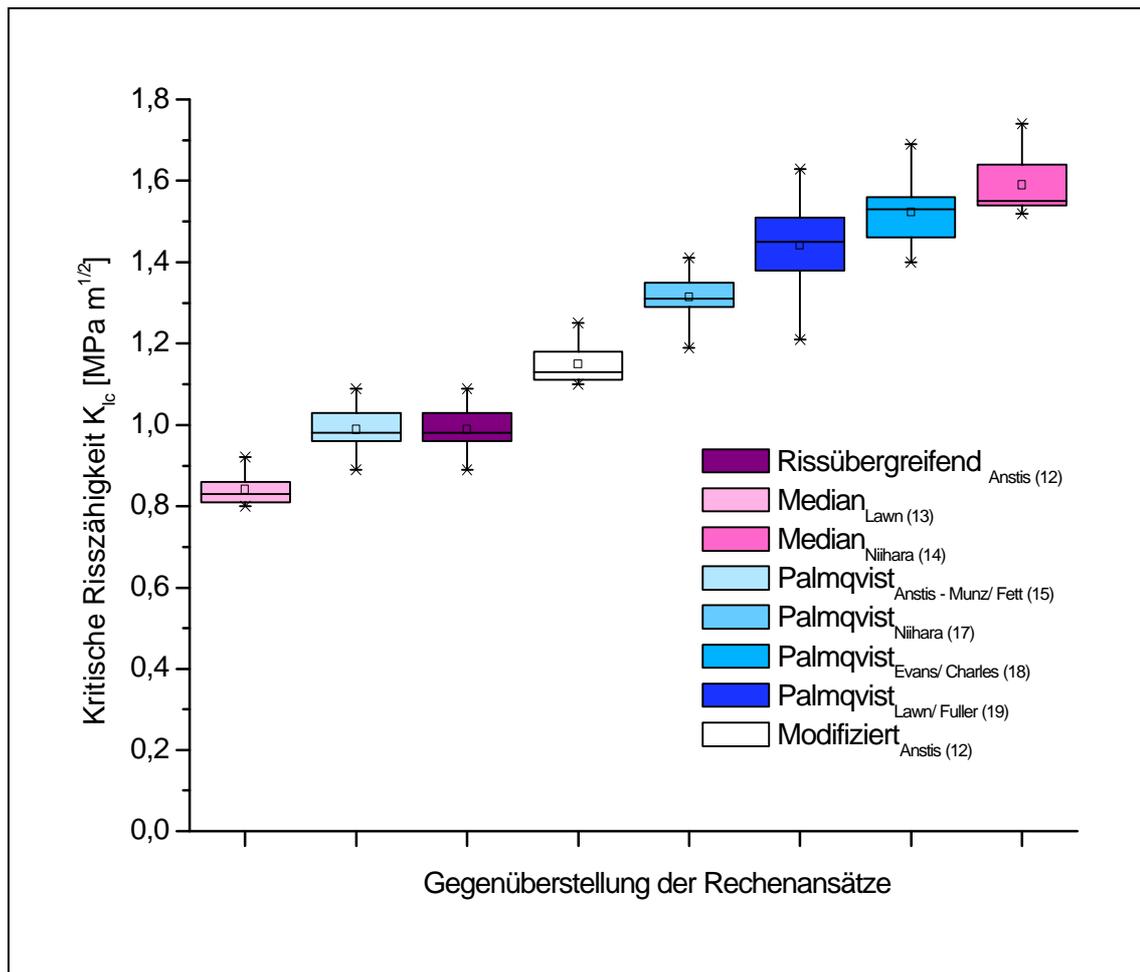


Abb. 6.5.: Gegenüberstellung der berechneten K_{Ic} -Werte der Keramik DC Cristall, die aus den veröffentlichten Rechenansätzen und der modifizierten ANSTIS-Gleichung (12) resultierten ($T_{max}=1000^{\circ}\text{C}$)

Die Tabelle 6.8. gibt Auskunft über die Signifikanz der erzielten Unterschiede. Sie verdeutlicht, dass sich die betrachteten Rechenansätze fast ausschließlich signifikant unterschieden. Ausnahmen betrafen die von ANSTIS (12) rissübergreifend verwendete Gleichung und die von MUNZ/ FETT modifizierte ANSTIS-Formel (15). Diese beiden Rechenansätze führten bei Nutzung der gerundeten Vickershärte zu einem übereinstimmenden Risszähigkeitswert. Auch das Ergebnis des LAWN/ FULLER-Rechenansatzes (19), der für Palmqvistrisse empfohlen wurde, wich nicht signifikant von der EVANS/ CHARLES-Gleichung (18) ab, die ebenfalls für Palmqvistrisse Verwendung findet.

Zwischen dem maximal bestimmten K_{Ic} -Wert und dem errechneten Risszähigkeitsminimum liegt eine Differenz von $0,75 \text{ MPa m}^{1/2}$. Die Formel nach LAWN für mediane Risse (13) lieferte den geringsten Wert der kritischen Risszähigkeit.

Tab. 6.8.: Statistische Bewertung der Abweichungen in der Risszähigkeit, die aus den verschiedenen Rechenansätzen entstehen (am Beispiel der Keramik DC Cristall, $T_{max}=1000^\circ\text{C}$)

	Anstis (12)	Lawn (13)	Niihara (14)	Anstis _{M/F} (15)	Niihara (17)	Evans/ Charles (18)	Lawn/ Fuller (19)	Anstis _{mod} (12) H(22), $E_{\sigma 90\%}$
	$\bar{x} = 1,00$ $s = 0,05$ $v = 0,05$	$\bar{x} = 0,84$ $s = 0,04$ $v = 0,05$	$\bar{x} = 1,59$ $s = 0,07$ $v = 0,04$	$\bar{x} = 1,00$ $s = 0,05$ $v = 0,05$	$\bar{x} = 1,33$ $s = 0,04$ $v = 0,03$	$\bar{x} = 1,51$ $s = 0,08$ $v = 0,05$	$\bar{x} = 1,46$ $s = 0,08$ $v = 0,05$	$\bar{x} = 1,15$ $s = 0,05$ $v = 0,04$
Lawn (13)	F= 60,67 t= -7,79 p= $4 \cdot 10^{-7}$ sign.							
Niihara (14)	F= 424,18 t= 20,60 p= $6 \cdot 10^{-14}$ sign.	F= 748,11 t= 27,35 p= $4 \cdot 10^{-16}$ sign.						
Anstis _{M/F} (15)	F= 1 p= 0 nicht sign.	F= 60,67 t= 7,79 p= $4 \cdot 10^{-7}$ sign.	F= 424,18 t= -20,60 p= $6 \cdot 10^{-14}$ sign.					
Niihara (17)	F= 254,40 t= 15,95 p= $5 \cdot 10^{-12}$ sign.	F= 681,42 t= 26,10 p= $9 \cdot 10^{-16}$ sign.	F= 91,00 t= -9,54 p= $2 \cdot 10^{-8}$ sign.	F= 254,40 t= 15,95 p= $5 \cdot 10^{-12}$ sign.				
Evans/ Charles (18)	F= 262,40 t= 16,20 p= $4 \cdot 10^{-12}$ sign.	F= 483,26 t= 21,98 p= $2 \cdot 10^{-14}$ sign.	F= 4,47 t= -2,12 p= 0,049 sign.	F= 262,40 t= 16,20 p= $4 \cdot 10^{-12}$ sign.	F= 36,68 t= 6,06 p= $1 \cdot 10^{-5}$ sign.			
Lawn/ Fuller (19)	F= 220,22 t= 14,84 p= $2 \cdot 10^{-11}$ sign.	F= 428,43 t= 20,70 p= $5 \cdot 10^{-14}$ sign.	F= 12,78 t= -3,58 p= 0,002 sign.	F= 220,22 t= 14,84 p= $2 \cdot 10^{-11}$ sign.	F= 19,89 t= 4,46 p= $3 \cdot 10^{-4}$ sign.	F= 1,80 t= -1,34 p= 0,197 nicht sign.		
Anstis _{mod} (12) H(22), $E_{\sigma 90\%}$	F= 44,53 t= 6,67 p= $3 \cdot 10^{-6}$ sign.	F= 215,71 t= 14,69 p= $2 \cdot 10^{-11}$ sign.	F= 224,14 t= -14,97 p= $1 \cdot 10^{-11}$ sign.	F= 44,53 t= 6,67 p= $3 \cdot 10^{-6}$ sign.	F= 67,11 t= -8,19 p= $2 \cdot 10^{-7}$ sign.	F= 125,56 t= -11,21 p= $2 \cdot 10^{-9}$ sign.	F= 95,56 t= -9,78 p= $1 \cdot 10^{-8}$ sign.	

Das Risszähigkeitsmaximum ergab der Rechenansatz von NIIHARA (14) für mediane Risse. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Rechenansätze von EVANS/ CHARLES (18) und NIIHARA (14) zu einer Überbewertung des keramischen Materials führen könnten. Die Rechenansätze von EVANS/ CHARLES (18) sowie LAWN/ FULLER (19) sollten keine Anwendung finden, da der Elastizitätsmodul unberücksichtigt bleibt und aus diesem Grund eine realistische Einschätzung der

Keramik nur beschränkt möglich ist. Der modifizierte Rechenansatz nach ANSTIS (12), bei dem die genaue Vickershärte $H(22)$ Einsatz findet sowie der Biege-E-Modul ($E=\sigma_{90\%}/0,001$) verwendet wird, unterscheidet sich ebenfalls signifikant von den Ergebnissen der publizierten, unveränderten Rechenansätzen. Die für DC Cristall berechnete durchschnittliche Risszähigkeit liegt mit $1,15 \text{ MPa m}^{1/2}$ im mittleren Bereich der erzielten K_{Ic} -Werte, so dass die Keramik bei Nutzung der modifizierten Gleichung weder überbewertet noch unterschätzt wird.

ANSTIS [2] nahm an, dass bei Anwendung der Indenter-Methode ausschließlich mediane oder Palmqvistrisse entstehen. Fraglich ist, ob die Unterteilung der Rechenansätze entsprechend der Rissmuster einer strikten Einhaltung bedarf oder ob eine rissmusterübergreifende Anwendung der Rechenansätze möglich ist. Die genaue Festlegung des erzielten Rissmusters erweist sich bei der lichtmikroskopischen Auswertung der Indentermethode als problematisch, da in diesem Verfahren nur das oberflächliche Bild des Rissverlaufes für diese Einteilung herangezogen werden kann. Eine schichtweise Abtragung der Keramik oder eine fraktographische Auswertung würden die Vorteile der Indentermethode aufheben, da diese mit einem erheblichen technischen und zeitlichen Aufwand einhergehen würden.

NIHARA [94] beobachtete, dass bei Aufbringung einer hohen Last mediane Risse erzeugt werden. Diese Rissmusterart soll bei einem Verhältnis von $2,5 < c/a < 3$ vorliegen, während Palmqvistrisse einem Quotienten von $3 < c/a < 3,5$ entsprechen.

Auf der anderen Seite beschrieb SCHERRER [108] die Ausbildung von radialen Rissen ausgehend von jedem Härteeindruck, bei dem ein Verhältnis von $c/a > 2,3$ bzw. $c/a > 2$ besteht. Das Verhältnis c/a lag bei den durchgeführten Versuchsreihen stets unter 2,5.

GEIS-GERSTORFER empfahl [37], die Kraft so zu wählen, dass ein Rissmuster gebildet wird, deren Risslänge c die Größe der Härteeindrucksdiagonale $2a$ nicht überschreitet. Er erzielte für Glaskeramiken ein derartiges Rissmuster bei einer Kräfteinwirkung von 9,8 N. In den durchgeführten Versuchsreihen wurde eine relativ geringe Kraft von 4,9 N aufgebracht, um ein gut erkennbares und damit messbares Rissmuster mit sicherer Ausbildung von vier Rissen zu erhalten.

In dem lichtmikroskopischen Bild 6.6. ist aus der Lage der Risse erkennbar, dass die Rissentstehung von der Pyramidenspitze ihren Ausgang nimmt. GRELLMANN unterteilte die erzeugten Rissmuster in reguläre, in Richtung der Eindrucksdiagonalen verlaufenden Risse sowie davon abweichende irre-

guläre Risse [41]. Die Rissausbreitung nimmt den Weg des geringsten Widerstandes, wodurch das Risswachstum zur Oberfläche hin erfolgt. Teilweise verlaufen die Risse nicht durch die äußeren Eckpunkte der Vickerspyramide, weshalb das Vorliegen eines radialen Rissmusters (Palmqvistrisse) unwahrscheinlich ist, obwohl das Verhältnis c/a für ein Palmqvistrisse sprechen würde. Das im lichtmikroskopischen Bild (Abb. 6.6.) sichtbare Spannungsfeld könnte auch einen Hinweis auf das Vorliegen eines lateralen Rissmusters geben. Swab dagegen beschrieb, dass die Ursache derartiger „Halos“ in einem unterkritischen Risswachstum liegen könnte [124], so dass die Frage nach der vorliegenden Rissmusterart nicht eindeutig geklärt werden konnte.

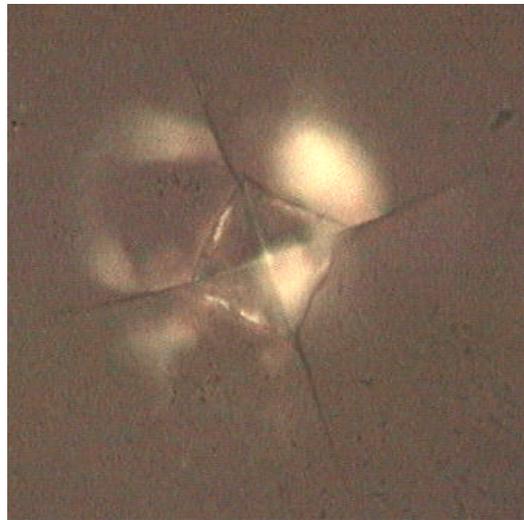


Abb. 6.6.: Im lichtmikroskopischen Bild wurde vereinzelt sichtbar, dass die erzeugten Risse nicht durch die Härteeindruckseckpunkte verliefen.

Vergleicht man die resultierenden Risszähigkeitswerte der favorisierten ANSTIS-Gleichungen, so werden trotz der Unterscheidung zwischen Palmqvistrisen (Gleichung 12 [3, 37, 119, 121]; Gleichung 15 [94]) und mediane Risse (Gleichung 12 [11, 68, 71, 108, 109]) sowie der rissmusterübergreifenden Berechnung (Gleichung 12 [2, 39, 63, 105, 125, 134]) ausschließlich nicht signifikante Unterschiede in der Höhe des K_{Ic} -Wertes realisiert. Aus dieser Feststellung kann geschlossen werden, dass eine übergreifende Anwendung der ANSTIS-Rechenansätze keine Verzerrung der Risszähigkeitswerte bedingt, so dass der K_{Ic} -Wert trotzdem die Materialeigenschaft der Keramik widerspiegelt.

Auffällig wird beim Vergleich der verschiedenen Rechenwege, dass die jeweils verwendeten Proportionalitätsfaktoren differieren. MUNZ/ FETT [94] gaben an, dass der Proportionalitätsfaktor nach ANSTIS et al. „die beste Übereinstimmung mit auf andere Weise ermittelten K_{Ic} -Werten ergab“.

Um eine Vergleichbarkeit und Verlässlichkeit der Risszähigkeit zu erreichen, ist wie schon erwähnt, eine Vereinheitlichung der Gleichungen notwendig. Diese Vereinheitlichung sollte die ausschließliche Verwendung des Rechenansatzes von ANSTIS (12) beinhalten. Gleichzeitig sollte die Berechnung des exakten Vickershärtewertes sowie die Nutzung eines aus der Biegefestigkeit ermittelten E-Moduls eingeführt werden.

6.2.1.4. Genauigkeit bei der Verwendung des Lichtmikroskopes

Um die Genauigkeit der lichtmikroskopischen Ausmessung zu erfassen, wurde anhand der Keramik ProCAD eine Besputterung der Prüfkörper vorgenommen, um eine nachfolgende Elektronenmikroskopische Ausmessung vorzunehmen. Hierbei wurden verschiedene Vorgehensweisen verfolgt. In der ersten Versuchsreihe wurden die Härteeindrücke auf den unbesputterten Prüfkörpern gesetzt und anschließend lichtmikroskopisch aufgenommen. Anschließend wurden die Prüfkörper mit einer Gold-Platin Schicht besputtert. Nach dem Besputtern wurden die vorliegenden Härteeindrücke lichtmikroskopisch ausgemessen, um eine eventuelle Veränderung der Rissdimension aufgrund der Besputterung erkennen zu können. Es folgte die elektronenmikroskopische Betrachtung der erzeugten Härteeindrücke.

Ebenfalls wurden Härteeindrücke nach dem Besputtern von Prüfkörpern vorgenommen, die anschließend lichtmikroskopisch und elektronenmikroskopisch beurteilt werden sollten. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um die Verlässlichkeit der Messwerte, die aus der lichtmikroskopischen Auswertung der hervorgerufenen Rissmuster resultieren, zu untersuchen. Gleichzeitig sollte der Möglichkeit einer besseren Einschätzung der Risslängen nachgegangen werden. Erhofft wurde eine deutlichere Abgrenzung der bestehenden Risse und der vorliegenden Härteeindrücke. Dieses Vorgehen sollte ebenfalls aufzeigen, ob das Aufbringen der Gold-Platin-Schicht, eine Verkürzung der Rissflanken bedingt. Dieses entspräche einer Verfälschung der realen Rissdimension.

Vergleicht man die Härteeindrücke der besputterten und unbesputterten Prüfkörper lichtmikroskopisch, so waren die Härteeindrücke und die Rissausdehnung auf den anschließend besputterten

Prüfkörpern besser beurteilbar. Das Setzen der Härteeindrücke nach dem Besputtern der Probenoberfläche führte zu einem Einreißen der Beschichtung. Die Form und die Größe des Härteeindrucks konnten nicht beurteilt werden, da sowohl die Ränder des Eindrucks durch das Abreißen der Beschichtung ungleichmäßig erschienen als auch die Pyramidenspitze nicht erkennbar war. Die Ausmessung der Risslänge konnte nur nach Abschätzung des Pyramidenspitze erfolgen. Auch die Rissausdehnung konnte nur vermutet werden. Die elektronenmikroskopische Betrachtung der Proben führte zu keinem Ergebnis, da die Härteeindrücke und Rissausdehnung nur ungenau zu erkennen waren.

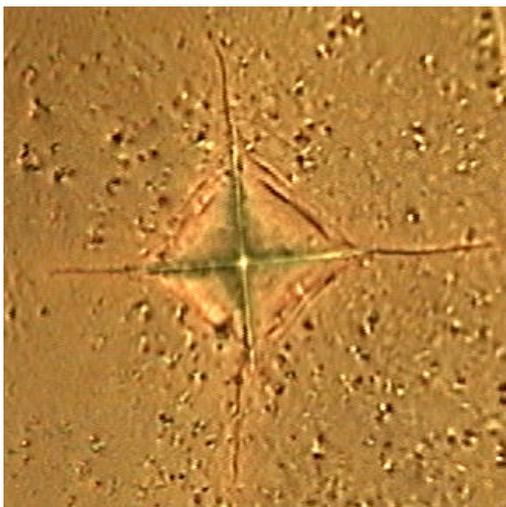
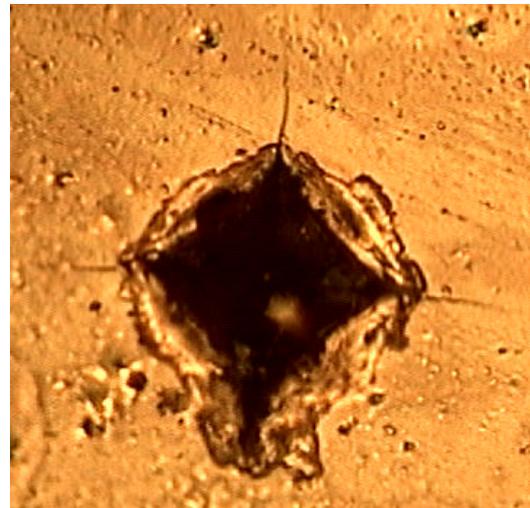
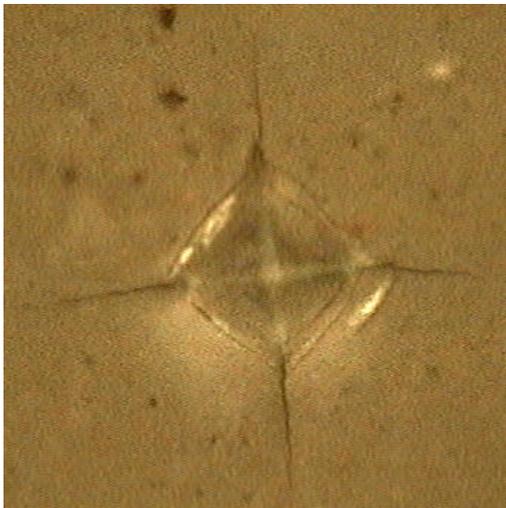


Abb. 6.7.: Rissmuster der unbesputterten Keramik ProCAD (oben links), des nach Besputterung auf-
gebrachten Härteeindrucks (oben rechts) sowie der nach Setzen der Eindrücke besputter-
ten Keramik (unten links) ($T_{max}=1000^{\circ}\text{C}$)

Entgegen der Erwartung führte eine nachfolgende Beschichtung der Prüfkörperoberfläche zu einer relativen Erhöhung der Risslänge. Verursacht wurde diese scheinbare Rissverlängerung durch eine deutlichere Abgrenzung der Rissflanken, die die Ausmessung der Risse in ihrer gesamten Ausdehnung erleichterte. Die entstandene Abweichung des K_{IC} -Wertes betrug jedoch nur $0,02 \text{ MPa m}^{1/2}$ und ist somit zu vernachlässigen. Diese Differenz kann aus der Zeitdifferenz zwischen Eindrucksetzung und Ausmessung entstanden sein. Eine solche Zeitverzögerung kann ein unterkritisches Risswachstum hervorrufen. Auch das Eindringen der Beschichtung in die bestehenden Risse kann eine minimale Rissflankenöffnung induzieren, was ebenfalls eine Ursache für die realisierte Rissverlängerung gewesen sein kann. Des Weiteren kann dieser minimale Unterschied aus der normalen Fehlerbreite bei einer lichtmikroskopischen Ausmessung resultieren. Das nachträgliche Setzen von Härteeindrücken auf die besputterte Oberfläche erwies sich als problematisch, da die Auswertung der erzeugten Rissmuster deutlich erschwert wurde. Diese Vorgehensweise führte zu einer Erhöhung des gemessenen Risszähigkeitswertes um $0,07 \text{ MPa m}^{1/2}$.

Die Tabelle 6.9. verdeutlicht den Einfluss der Vorgehensweise auf den Wert der kritischen Risszähigkeit. Der Wert der Bruchzähigkeit wurde mit Hilfe der ANSTIS-Gleichung (12) ermittelt. Der Härtewert wurde nach Vickers entsprechend der Gleichung H(22) berechnet.

Tab. 6.9.: Einfluss der Vorgehensweise auf den K_{IC} -Wert am Beispiel der Keramik ProCAD

	Durchschnittliche Risslänge c [μm]	K_{IC} -Wert [$\text{MPa m}^{1/2}$]
Unbesputterte Prüfkörper	35,24	1,26
Nach dem Setzen der Härteeindrücke besputtert	36,37	1,24
Nach dem Besputtern Härteeindrücke gesetzt	33,83	1,33

Aus der Gegenüberstellung wird erkennbar, dass die lichtmikroskopische Ausmessung von Rissen auf Feldspatkeramiken, wie es auch Morena beschrieb [88], verlässliche Werte liefert. Der Vorteil der lichtmikroskopischen Aufnahmen liegt in dem geringen technischen Aufwand. Die Messung ist in jedem Labor durchführbar und der zeitliche Umfang ist im Vergleich zu einer elektronenmikroskopischen Auswertung erheblich geringer. Auch wenn mit der Indentermethode die Genauigkeit der Fraktographie nicht erreicht werden kann, könnte sie aufgrund ihrer einfachen Handhabung den Weg zum routinemäßigen Einsatz der Risszähigkeit ebnen.

6.2.1.5. Mögliche Fehlerquellen bei der Bestimmung der Risszähigkeit

Ein Problem der Indentermethode besteht in der Erzeugung von Defekten, bei der nicht immer vier Risse von der Eindruckspyramide ausgehen. In manchen Fällen entstehen mehr als vier Risse, in anderen Fällen treten weniger als 4 Risse auf.

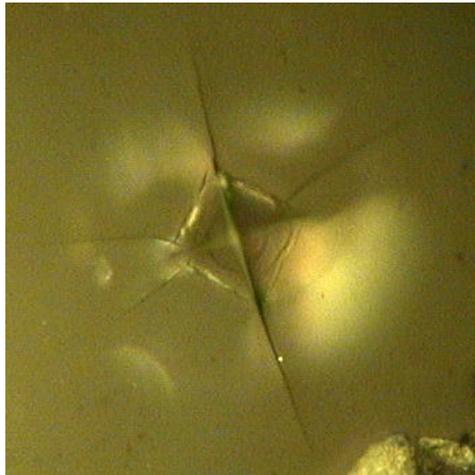


Abb. 6.8.: Härteeindruck, von dem fünf Risse ausgehen

Fraglich ist, ob neben der Defekttiefe die Rissanzahl einen Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit keramischer Materialien gegen Sprödbrüche ausübt. Ist dieses anzunehmen, so müsste sich die Variabilität der Rissanzahl in der Größe c wiederfinden oder es müssten Rissmuster mit einer festgelegten Risszahl für die Bestimmung der kritischen Risszähigkeit herangezogen werden. Aufgrund dieser Problematik stellt sich die Frage, was die Größe c beinhalten sollte. Es bieten sich drei Möglichkeiten, die Größe c zu definieren. Eine Möglichkeit besteht in der Bildung des arithmetischen Mittels (a) aus den Risslängen aller vorliegenden Risse. In diesem Fall wäre es gleichgültig, wie viele Risse vorliegen. Die zweite Möglichkeit der Bestimmung von c liegt in der Festlegung einer gewünschten Rissanzahl (b) im Rissmuster. Ebenfalls denkbar ist die alleinige Verwendung des längsten Risses (c) im Rissmuster als Größe c .

Wird das c der Gleichungen dem arithmetische Mittel aus den Risslängen aller vorliegenden Risse gleichgesetzt (a), entsteht ein anderer Risszähigkeitswert als bei Verwendung ausschließlich des längsten Risses. Fraglich ist, ob bei Vorliegen von nur drei Rissen das arithmetische Mittel zu einer Unterschätzung der Keramik führt, da bei einer erhöhten Rissanzahl der Eintritt des katastrophalen

Bruches wahrscheinlicher ist als in einer rissärmeren Keramik. Wäre die Rissanzahl ebenfalls entscheidend, muss untersucht werden, ob nur Rissmuster Verwendung finden sollten, die eine einheitliche Rissanzahl aufweisen. Auf diese Weise wäre es möglich, die Risszähigkeit ohne Vernachlässigung der Bedeutung der Rissanzahl für die verschiedenen Keramiken zu ermitteln. Soll die Rissanzahl berücksichtigt werden (b), könnte dies durch die Bildung der Summe aller bestehenden Risse geschehen, die durch die erwartete Rissanzahl geteilt wird (beispielsweise vier Risse bei Verwendung eines Vickers-Indenters). In diesem Fall würde beim Entstehen von nur drei Rissen der nicht vorhandene vierte Riss gleich null gesetzt werden. Die Risslänge c , die aus dieser Überlegung resultiert, wäre verringert. Auf der anderen Seite würde bei einer Ausbildung von mehr Rissen deren Summe ebenfalls durch die festgelegte Rissanzahl dividiert werden, so dass eine relative Rissverlängerung erzielt werden würde. Es bedarf einer genauen Verifizierung, ob diese Vorgehensweise eine Verzerrung der realen Risszähigkeit verursacht oder ob die Berücksichtigung der Rissanzahl die Keramikeigenschaften genauer erfasst. Die Wahl des längsten Risses (c) als Risslänge c bietet den Vorteil, dass dieser Riss der Schwachstelle einer Keramik entspricht, von der das überkritische Risswachstum am wahrscheinlichsten ausgeht. Dementsprechend ist der längste Riss als kritischster Defekt zu werten, da er der wahrscheinliche Ursprung des katastrophalen Bruchs ist. In diesem Fall würde der längste Riss die Festigkeit bestimmen.

In der Tabelle 6.10. werden die drei Bestimmungsmöglichkeiten (a-c) der Größe c gegenübergestellt. Es werden Vickershärteeindrücke verglichen, die drei, vier oder fünf Risse aufweisen. Der Vergleich dieser Rissmuster wurde an je einem Beispiel der Keramik DC Cristall durchgeführt. Berechnet wurde die Risszähigkeit mit Hilfe des rissmusterübergreifenden Rechenansatzes von ANSTIS (12)

$$(12) \quad K_{IC} = 0,016 (E/H)^{1/2} F_c^{-3/2} \quad H(22) = 0,463 F / a^2$$

unter Nutzung der exakten Vickershärte.

Die Tabelle 6.10. verdeutlicht, dass der Wert der Risszähigkeit bei Verwendung des arithmetischen Mittels zwischen den drei gegenübergestellten Härteeindrücken nur gering differiert (a).

Die größte Differenz entsteht bei einer Berücksichtigung der Rissanzahl (b). Aus dieser Form der Berechnung entstehen Schwankungen von über 50% zwischen den K_{IC} -Werten der drei verschiedenen Rissmuster. Es gilt zu verifizieren, ob die Rissanzahl einen Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit gegen den katastrophalen Bruch ausübt. Sollte dies der Fall sein, kann die Integration des

Weibullmoduls in den Wert der Risszähigkeit eine Möglichkeit darstellen, die Defektverteilung der Keramiken zu erfassen.

Tab. 6.10.: Einfluss der Größe c auf den Risszähigkeitswert am Beispiel der Keramik DC Cristall

	3 Risse	4 Risse	5 Risse
Härteeindrucksdiagonale = 2a	34,68 μm	34,84 μm	35,50 μm
Risslängen (gemessen von der Pyramidenspitze)	36,12 μm	36,51 μm	35,17 μm
	38,12 μm	37,90 μm	37,79 μm
	43,09 μm	39,90 μm	39,73 μm
		40,50 μm	42,56 μm
			44,85 μm
(a) c = Arithmetisches Mittel K_{Ic} [MPa m^{1/2}]	39,11 μm 1,00	38,70 μm 1,02	40,02 μm 0,99
(b) c = Risslängensumme / 4 K_{Ic} [MPa m^{1/2}]	29,33 μm 1,54	38,70 μm 1,02	50,03 μm 0,71
(c) c = längster Riss K_{Ic} [MPa m^{1/2}]	43,09 μm 0,86	40,50 μm 0,95	44,85 μm 0,83

Da, wie schon im Kapitel 2.5. erwähnt, der längste Riss über den katastrophalen Bruch entscheidet, ist dieser dem kritischen Riss gleichzusetzen. Die Ursache hierfür liegt im überdimensionalen Anstieg der am Rissgrund wirkenden Spannung mit zunehmender Risslänge, was dazu führt, dass die von ihm ausgehende Keilwirkung verstärkt wird. Findet jeweils der längste Riss für die Größe c Berücksichtigung (c), resultiert aus den drei gewählten Beispielen ein verringerter Risszähigkeitswert. Eine Überbewertung der keramischen Materialeigenschaft kann in diesem Fall ausgeschlossen werden, da der Schwachpunkt der Keramik für die Berechnung des K_{Ic} -Wertes herangezogen wird. Diese Vorgehensweise bietet bei der Einschätzung der kritischen Risszähigkeit eine gewisse Sicherheit, da dem ungünstigsten Fall Rechnung getragen wird.

Die Ursache für eine abweichende Rissanzahl oder erhöhte Risslänge kann auch in der Verwendung nicht planparalleler Prüfkörper liegen. Bei Auftreffen des Indenters auf eine schräge Ebene wird die stärkste Belastung dort erzeugt, wo der erste Kontakt zwischen Prüfkörper und Diamantenpyramide entsteht. Von der betreffenden Pyramidenseite kann aufgrund der höheren Krafteinwirkung eine größere Rissanzahl als auch ein verlängerter Riss ausgehen, während die schwächer belasteten Bereiche des Prüfkörpers unter Umständen keine Risse ausbilden bzw. ausgebildete Risse verkürzt erscheinen. Wird unter diesen Bedingungen die Größe c aus dem arithmetischen Mittel (a) der erzeugten Rissen gebildet, so bleibt die Höhe des K_{Ic} -Wertes trotz des abweichenden Rissmusters

unbeeinflusst. Findet in diesem Fall die Länge des größten entstandenen Risses als Größe c Einsatz, führt dies zu einer erheblichen Senkung der kritischen Risszähigkeit. Der Wert der kritischen Risszähigkeit ist somit bei Nutzung des längsten Risses als Größe c stärker von präparativen Einflüssen abhängig. Eine Planparallelität der Prüfkörper stellt dementsprechend eine Grundvoraussetzung dar.

SCHERRER empfahl [108] die Verwendung von Härteeindrücken, von denen ausschließlich vier Risse ausgehen. Ebenfalls sollten keine Abplatzungen und Risseilungen vorliegen. Diese Empfehlung wurde in den durchgeführten Messreihen umgesetzt. Der Nachteil dieser Vorgehensweise liegt in einer relativ hohen Verwerfungsrate an gesetzten Härteeindrücken.

Eine weitere Fehlerquelle der Indentermethode stellt die Vermessung der erzeugten Härteeindrücke und der von ihnen ausgehenden Risse dar, wie es auch schon von QUINN beschrieben worden ist [101]. Die Rissenden sind zum Teil nur ungenau erkennbar, so dass die Dimension der erzielten Risse in diesen Fällen sehr schwer zu beurteilen ist. Dieses Problem besteht hauptsächlich bei schlecht glasierten und unzureichend polierten Oberflächen. Die Abgrenzung der erzeugten Risse zu Schleifspuren ist vor allem bei den ungebrannten Keramiken problematisch (siehe Abb. 6.9.). Aus diesem Grund wurde die Bestimmung der Risszähigkeit auf die thermisch nachbehandelten Keramiken beschränkt, wodurch die Abhängigkeit der kritischen Risszähigkeit K_{Ic} von der thermischen Behandlung nur eingeschränkt beurteilt werden kann.

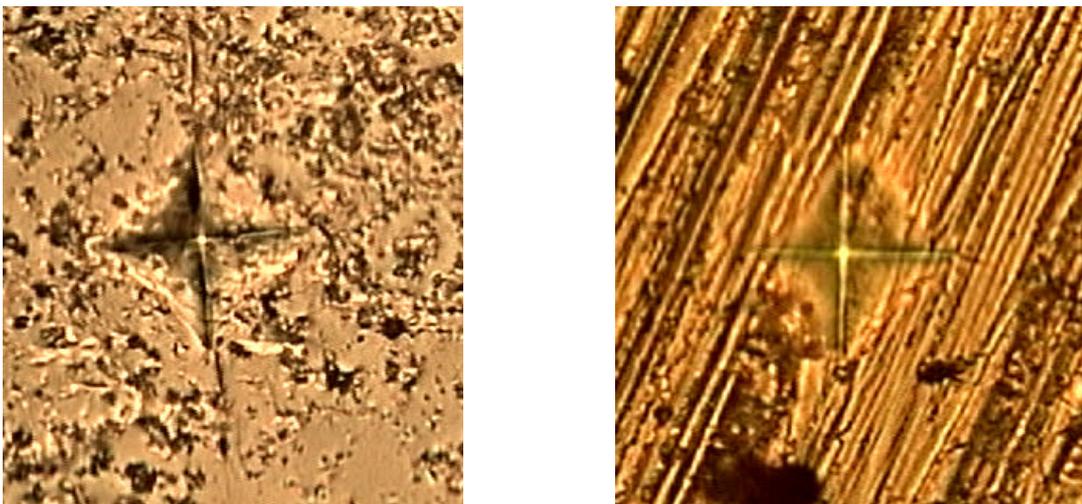


Abb. 6.9.: Der Rissverlauf ist in manchen Fällen aufgrund der kristallinen Oberfläche und der bestehenden Schleifspuren nur schwer beurteilbar.

An dieser Stelle müssen weitere Untersuchungen folgen, um die Risszähigkeitsmessung auch auf ungebrannte Keramiken evtl. durch eine feinere Politur oder durch Markierung der eingetretenen Defekte ausweiten zu können. Neben der ungenauen Risslängenerfassung kann auch das subkritische Risswachstum die initiale Risslänge verfälschen [108].

Die Keramiken, die eine gröbere Kristallstruktur besitzen, weisen wie schon erwähnt eine starke Rissablenkung auf. Auch hier bleibt die Frage offen, wie der Rissverlauf bewertet werden sollte. Da die Größe c dem Abstand zwischen Ausgangs- und Endpunkt des Risses gleichgesetzt wird, kann bei Vorliegen einer Rissablenkung die wahre Dimension des Risses nicht erfasst werden. Ein erhöhter K_{Ic} -Wert könnte resultieren. KVAM berücksichtigte in der Größe c die mit Hilfe eines SEM ausgemessenen Rissablenkungen (siehe Abb. 6.10.) [67]. Es resultierte aus dieser Vorgehensweise eine erhöhte Streuung der Bruchzähigkeitswerte, die wie von KVAM diskutiert wurde, aus der heterogenen Struktur der entsprechenden Keramiken entstanden sein kann. Auch der aus einer Rissablenkung erzielte Energieabbau bleibt bei dieser Vorgehensweise unberücksichtigt.

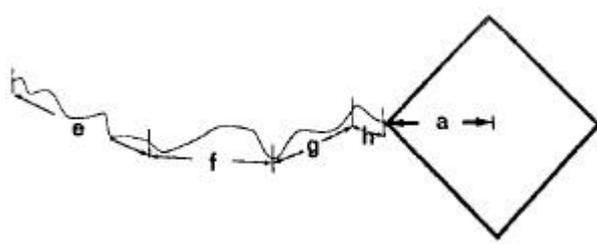


Abb. 6.10.: Mit Hilfe eines SEM ist es möglich, Rissablenkungen in die Größe c einzubeziehen ($c = a + e + f + g + h$) [67]

Geprüft werden muss ebenfalls, ob die Bestimmung des Härtewertes an Hand der vorgenommenen Härteeindrücke zu Abweichungen führt, da, laut GRELLMANN [41], für die Ermittlung der physikalische Messgröße der Härte rissfreie Eindrücke herangezogen werden sollten. Sollten Unterschiede festgestellt werden, müsste die Bestimmung des Härtewertes getrennt von der Risszähigkeitsermittlung an rissfreien Härteeindrücken erfolgen.

Um die Abhängigkeit der Rissdimension von der Wasserlagerung zu untersuchen, wurden die mit der Indentermethode erzeugten Rissmuster in einer weiteren Versuchsreihe über einem bestimmten Zeitraum einer Wasserlagerung (dest. Wasser, 37°C) ausgesetzt. Anschließend wurden sowohl die

Risslängen als auch die Härteeindrucksdiagonalen erneut ausgemessen. Die Messung erfolgte täglich über einen Zeitraum einer Woche. Auch diese Versuchsreihe wurde an der bei 1000°C gebrannten Keramik DC Cristall durchgeführt.

Das Diagramm der Abbildung 6.11. zeigt, dass die Defektgröße auf der Oberfläche einer Keramik nicht stabil ist. Die Rissdimension variiert abhängig von der Dauer der Feuchtlagerung des keramischen Materials. Innerhalb des ersten Tages der Wasserlagerung konnte ein Risswachstum festgestellt werden, deren Ursache in einer Rissflankenöffnung durch den wirkenden Wasserdruck liegen könnte. Die Rissdimension zeigte sich nach einem weiteren Tag der Feuchtlagerung wieder rückläufig. Ab diesem Zeitpunkt trat eine scheinbare Verkürzung der vorliegenden Risse ein, was durch die Ausbildung einer Schmierschicht an der Rissspitze hervorgerufen sein könnte.

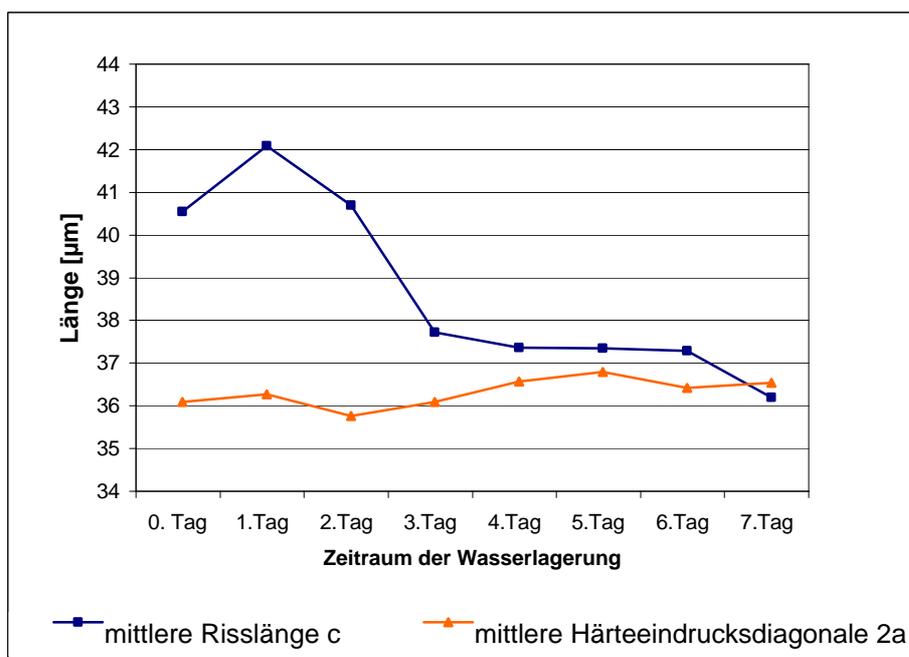


Abb. 6.11.: Einflussnahme von Wasser auf die Rissdimension und Härteeindrucksdiagonale

6.2.2. Materialprüfung

6.2.2.1. Gegenüberstellung der geprüften Keramiken

Vergleicht man die Risszähigkeitswerte der geprüften Feldspatkeramiken (Brenntemperatur 1000°C), die bei Verwendung der favorisierten ANSTIS-Gleichung (12) mit Nutzung der genauen Vickershärte $H(22)$ erzielt worden sind, so wiesen die Keramiken DC Cristall und DC Cream die ge-

ringste Bruchzähigkeit auf. Der K_{Ic} -Wert von DC Cream ($1,01 \text{ MPa m}^{1/2}$) lag nicht signifikant unter dem der Keramik DC Cristall ($1,04 \text{ MPa m}^{1/2}$).

Findet der jeweils aus der Biegefestigkeit bestimmte Biege-E-Modul Berücksichtigung ($\sigma_{90\%} / 0,001$), erreicht DC Cristall einen K_{Ic} -Wert von $1,15 \text{ MPa m}^{1/2}$, während DC Cream eine kritische Risszähigkeit von $1,16 \text{ MPa m}^{1/2}$ erzielte.

Entgegen der Erwartung wurde für die Keramik Cerec Vita Mark II mit $1,15 \text{ MPa m}^{1/2}$ eine höhere Risszähigkeit ermittelt als für die Keramiken DC Cream und DC Cristall. Dieser höhere Wert kann aus einer verstärkten Leuzitkristallbildung resultieren.

Tab. 6.11.: Statistischer Vergleich der untersuchten Keramiken in Bezug auf die erzielte Risszähigkeit

	DC Cristall	DC Cream	20/9/1A	D 08/01	Cerec Vita Mark II	ProCAD
	$1,04 \pm 0,05 \text{ MPa m}^{1/2}$	$1,01 \pm 0,10 \text{ MPa m}^{1/2}$	$1,26 \pm 0,10 \text{ MPa m}^{1/2}$	$1,47 \pm 0,14 \text{ MPa m}^{1/2}$	$1,15 \pm 0,04 \text{ MPa m}^{1/2}$	$1,26 \pm 0,07 \text{ MPa m}^{1/2}$
DC Cream	F= 0,60 t = -0,78 p= 0,45 nicht sign.					
20/9/1A	F= 39,90 t = 6,32 p= $5,9 \cdot 10^{-6}$ sign.	F=30,67 t = 5,54 p= $2,9 \cdot 10^{-5}$ sign.				
D08/01	F=77,82 t = 8,82 p= $5,9 \cdot 10^{-8}$ sign.	F=65,51 t = 8,09 p= $2,1 \cdot 10^{-7}$ sign.	F=13,02 t = 3,61 p= 0,002 sign.			
Cerec Vita Mark II	F=25,92 t = 5,09 p= $7,6 \cdot 10^{-5}$ sign.	F=14,65 t = 3,83 p= 0,001 sign.	F=10,88 t = -3,3 p= 0,004 sign.	F= 43,70 t = -6,61 p= $3,3 \cdot 10^{-6}$ sign.		
ProCAD	F=61,08 t = 7,82 p= $3,4 \cdot 10^{-7}$ sign.	F=38,21 t = 6,18 p= $7,8 \cdot 10^{-6}$ sign.	F= 0,015 t = -0,13 p= 0,90 nicht sign.	F=16,12 t = -4,01 p= $8,1 \cdot 10^{-4}$ sign.	F=16,13 t = 4,02 p= $8,1 \cdot 10^{-4}$ sign.	

Die Leuzitkristalle bedingen eine Reduktion der rissantriebenden Kräfte. Sie erzeugen Misfit-Spannungen vom Typ 2, d.h. dass die thermische Ausdehnung der Leuzitkristalle größer ist als die der Matrix, wodurch die Kristalle während des Abkühlvorganges stärker kontrahieren als die amorphe Substanz. Radiale, auf den Teilchenmittelpunkt gerichtete Zug- und tangentiale, die Teilchen umfassende Druckkräfte werden initiiert. Bestehende Risse verlaufen an den Grenzflächen zwischen Kristalliten und Matrix. Die Bruchzähigkeit wird dadurch erhöht, dass eine größere Rissfläche zum

Risswachstum geschaffen werden muss sowie der benötigte Aufwand erhöht ist, um den Riss von der Grenzfläche hinter dem Kristall zu lösen [81]. Lichtmikroskopisch war im Rissmuster dieser kristallineren Keramik deutlich ein stark abgelenkter Rissverlauf erkennbar. Da, wie schon erwähnt, die Risslänge als Strecke zwischen Pyramidenspitze, entsprechend dem Rissursprung, und der Risspitze als Endpunkt ausgemessen wird, finden Richtungsänderungen durch Rissablenkungen entlang der Kristallgrenzen in der Größe c keine Berücksichtigung. Die geradlinige Ausmessung führt so zu einer der Realität nicht entsprechenden, unterbewerteten Risslänge.

Der K_{Ic} -Wert der Keramik Cerec Vita Mark II erhöht sich bei Nutzung des keramikspezifischen Biege-E-Moduls ($\sigma_{90\%} / 0,001$) auf $1,24 \text{ MPa m}^{1/2}$. Die resultierende Steigerung der Risszähigkeit fällt aufgrund der geringen Biegefestigkeit dieser Keramik weniger stark aus als bei den beiden zuvor betrachteten Keramiken DC Cristall und DC Cream.

In der Literatur wurden für Cerec Vita Mark II Risszähigkeitswerte veröffentlicht, die von $0,92 \text{ MPa m}^{1/2}$ bis $1,47 \text{ MPa m}^{1/2}$ reichen [9, 26, 69, 82, 121, 128]. In den beschriebenen Versuchen wurde die Risszähigkeit jedoch nicht mit Hilfe der Indentermethode ermittelt. Vergleicht man die publizierten Risszähigkeitswerte mit den Messwerten, die mit Hilfe der Indentermethode erzielt worden sind, wird deutlich, dass auch die Nutzung des Biege-E-Moduls zu einem K_{Ic} -Wert führt, der im mittleren Bereich der veröffentlichten Risszähigkeitswerte liegt.

Die Keramik ProCAD erreichte mit $1,26 \text{ MPa m}^{1/2}$ von den vier auf dem Dentalmarkt befindlichen Keramiken die höchste Bruchzähigkeit. Diese Glaskeramik weist ebenfalls eine Leuzitverstärkung auf, die durch einen K_2O -Gehalt von 10-14% erzeugt wird. Der vorliegende Pottaschegehalt übertrifft somit den Anteil des K_2O der Cerec Vita Mark II, deren Pottaschegehalt bei 6-8% liegt. Auffällig war, dass der erzeugte Rissverlauf innerhalb dieser Keramik weniger abgelenkt wurde. Im Lichtmikroskop war bei einer 50-fachen Vergrößerung ein geradliniger Rissverlauf erkennbar.

Die hohe Bruchzähigkeit stimmte mit der großen Biegefestigkeit überein. Kommt auch für diese Keramik der aus der Biegefestigkeit ermittelte E-Modulwert zum Einsatz ($\sigma_{90\%} / 0,001$), resultiert aufgrund der hohen Biegebruchfestigkeit ein relativ starker Anstieg des K_{Ic} -Wertes auf $1,72 \text{ MPa m}^{1/2}$.

Die Keramik 20/9/1A wies mit $1,26 \text{ MPa m}^{1/2}$ den gleichen K_{Ic} -Wert wie ProCAD auf. Bei der Berücksichtigung des Biege-E-Moduls ($\sigma_{90\%} / 0,001$) kommt es zu einer Erhöhung des Risszähigkeits-

wertes auf $1,54 \text{ MPa m}^{1/2}$. Der dabei auftretende K_{Ic} -Wertanstieg fällt infolge der geringeren Biegefestigkeit von 20/9/1A geringer aus als bei der Keramik ProCAD.

Die höchste Risszähigkeit wurde für D 08/01 erzielt. Sie erreichte einen Wert von $1,47 \text{ MPa m}^{1/2}$. Die Nutzung des aus der Biegefestigkeit ermittelten E-Modulus ($\sigma_{90\%} / 0,001$) führt zu einem K_{Ic} -Wert von $1,91 \text{ MPa m}^{1/2}$. Die Rissmuster der Keramiken 20/9/1A und D 08/01 waren nur schwer abgrenzbar, was die Ausmessung deutlich erschwerte. Beide Keramiken besitzen einen erhöhten Aluminiumoxidanteil, was zu einer Ausbildung von Misfit-Spannungen Typ 1 führt [81]. Diese gehen mit radialen, d.h. auf den Kristallmittelpunkt gerichteten Druckspannungen sowie tangentialen, die Kristallite umfassenden Zugspannungen einher. Bei Auftreten von Rissen, werden diese in Richtung der Al_2O_3 -Kristallite abgelenkt. Kann der auftreffende Riss das Teilchen nicht trennen, stagniert er an diesem Punkt oder er umläuft den Kristallit.

Für die Keramiken 20/9/1A und D 08/01 ist nur eine eingeschränkte Anwendbarkeit der Methode gegeben. Es muss in nachfolgenden Untersuchungen eine Möglichkeit gefunden werden, die gesetzten Risse eventuell durch Anfärbung der Rissflanken einer erleichterten Ausmessung zugänglich zu machen. Dadurch könnte die Anwendbarkeit der Methode auch auf höherkristalline Keramiken erweitert werden.

Entsprechend der Empfehlung für die Festlegung des Indikationsbereiches (siehe Tabelle 6.13.) ist bei Erreichen einer Risszähigkeit von $1 \text{ MPa m}^{1/2}$ die Herstellung von Frontzahneinzelkronen möglich. Jede der untersuchten Keramiken erreichte diesen Grenzwert. Liegt ein K_{Ic} -Wert von $1,5 - 2,5 \text{ MPa m}^{1/2}$ vor, so kann die Keramik für die Anfertigung einer Frontzahnbrücke oder Prämolarenkrone Einsatz finden. Diese Empfehlung wurde bei Berücksichtigung des jeweilig bestimmten Biege-E-Moduls von den Keramiken ProCAD, D08/01 und 20/9/1A erreicht. Indikationseinschränkend erwies sich bei diesen drei Keramiken die jeweilige Biegefestigkeit. Auch bei der Keramik Cerec Vita Mark II bildete die Biegefestigkeit die indikationseinschränkende Größe, da sie unter 100 MPa lag. Somit ist sie für die Anfertigung einer vollkeramischen Einzelkrone im Frontzahnbereich nicht geeignet.

6.2.3. Bestimmung der kritischen Rissgröße a_c bei Einwirken der Kaukräfte

Die kritische Risszähigkeit K_{Ic} bietet die Möglichkeit, die Rissgröße einer Keramik zu berechnen, die bei Auftreten einer bestimmten Bruchspannung als kritisch einzuschätzen ist. Die kritische Rissgröße a_c [60, 103, 135] ergibt sich aus der Umstellung der Formel (11)

$$a_c = 1/M (K_{Ic}/\sigma)^2$$

M = Geometriefaktor

K_{Ic} = kritische Risszähigkeit

σ = Bruchspannung.

Das Diagramm in der Abbildung 6.12. zeigt die Einflussnahme der Biegespannung auf die Dimension der kritischen Risslänge. Die Größe der kritischen Risslänge a_c ist logarithmisch gegen die Biegespannung bei entsprechendem Risszähigkeitswert der jeweiligen Keramik aufgetragen.

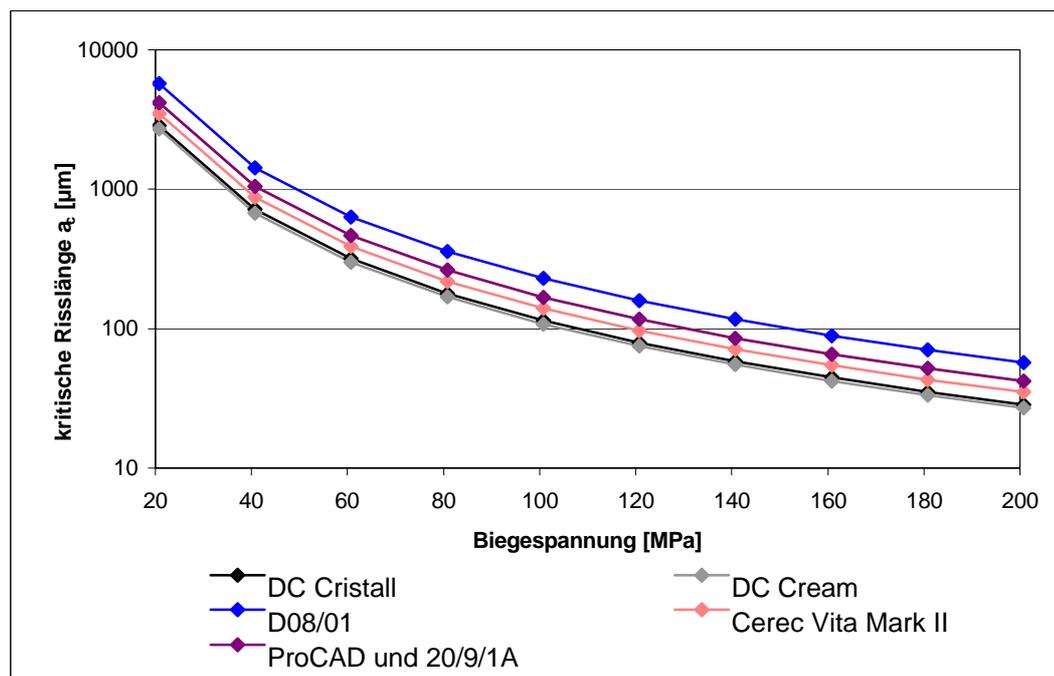


Abb. 6.12.: Abhängigkeit der kritischen Risslänge von der Biegespannung (Aufgrund eines gleichen K_{Ic} -wertes resultieren für ProCAD und 20/9/1A identische Kurven.)

In der Tabelle 6.12. sind die Rissgrößen für die untersuchten Keramiken gegenübergestellt, die bei Einwirken unterschiedlicher Bruchspannungen auf die entsprechenden Keramiken einen kritischen Wert annehmen. Beim Vergleich der geprüften Keramiken erreichen Risse auf der

Keramik D08/01 erst bei einer höheren Bruchspannung einen kritischen Wert bzw. bei Wirken der gleichen Biegespannung toleriert die Keramik D08/01 eine größere Defektdimension.

Tab. 6.12.: Kritische Rissgröße bei Auftreffen der Kaukräfte auf eine Fläche von 1 mm^2

	K_{Ic} [$\text{MPa m}^{1/2}$]	100 MPa	200 MPa	400 MPa	800 MPa
DC Cristall	1,04	92,44 μm	23,11 μm	5,78 μm	1,44 μm
DC Cream	1,01	87,19 μm	21,80 μm	5,45 μm	1,36 μm
20/9/1A	1,26	135,69 μm	33,92 μm	8,48 μm	2,12 μm
D08/01	1,47	184,69 μm	46,17 μm	11,54 μm	2,89 μm
Cerec Vita Mark II	1,15	113,03 μm	28,26 μm	7,06 μm	1,77 μm
ProCAD	1,26	135,69 μm	33,92 μm	8,48 μm	2,12 μm

ProCAD und 20/9/1A weisen aufgrund des übereinstimmenden K_{Ic} -Wertes die gleiche Abhängigkeit zwischen a_c und σ auf. Risse der Keramiken DC Cristall und DC Cream erlangen am schnellsten einen kritischen Wert.

Die im Front- und Seitenzahnbereich auftretenden Kaukraftbelastungen wurden in der Literatur zahlreich beschrieben. So stellte LUDWIG [74] in seiner Untersuchung eine mittlere Kaukraftentwicklung im Frontzahnbereich von 140 N fest bei gleichzeitigem Auftreten von maximalen Kraftspitzen bis 200 N. Er fordert eine Bruchfestigkeit von 200 N für den Einsatz von Frontzahnkronen. Bei der Restaurationsgestaltung empfehlen KÖRBER et al. sowie PRÖBSTER einen Sicherheitsbereich von 200 N [62, 99]. Dementsprechend empfiehlt SCHWICKERATH eine anfängliche Bruchfestigkeit von 400 N für einen vollkeramischen Frontzahnersatz sowie von 600 N für einen keramischen Seitenzahnersatz, um die mechanische Dauerbelastung sowie das korrosive Medium der Mundhöhle zu berücksichtigen [53]. SCHWICKERATH und COCA ermittelten für den Frontzahnbereich eine Kaukraftbelastungen von bis zu 200 N, während im Seitenzahnbereich Kaukräfte von bis 400 N auftraten, wie HÖLSCH beschrieb [17, 48]. Aufgrund der maximal wirkenden Kaukräfte sowie der zu erwartenden Materialermüdung forderte Tinschert [131] für vollkeramischen Brücken im Seitenzahnbereich sogar eine Festigkeit von mindestens 1000 N direkt nach der Herstellung.

6.2.4. Parallelen zwischen Indentermethode und zahnärztlicher Praxis

Die Erzeugung von Härteeindrücken mit Hilfe eines Vickersdiamanten kann für die zahnärztliche Praxis mit dem Vorliegen von Unebenheiten, die auf der Präparation bestehen oder mit Schleifspuren auf der Keramik verglichen werden. Die Erzeugung von Defekten oder Rissen durch ungebrochene Kavitätenränder, ein unregelmäßiges Bodenrelief der Präparation sowie Inkongruenzen zwischen keramischer Restauration und Präparation ist denkbar. Aber auch das Auftreffen des antagonistischen Zahnes auf eine keramische Restauration kann zur Erzeugung von Defekten führen.

Gleichzeitig ist es vorstellbar, dass die Befestigungsart einer vollkeramischen Restauration Einfluss auf die Ausbildung bzw. das Wachstum von Rissen nimmt. Verifiziert werden muss, ob bei Anwendung eines konventionelles Zementes von diesem eine Dornwirkung ausgeht. Diese Problematik ist denkbar, da die Funktion eines Phosphatzementes in der „zusätzlichen Retention durch Verkeilung“ liegt [10, 44]. Weiterhin muss geklärt werden, ob diese Problematik durch eine adhäsive Befestigung vollkeramischer Restauration vollständig umgangen werden kann. Der als „Sandwich-Konstruktion“ bezeichnete adhäsive Verbund bietet neben dem ästhetischen Vorteil die Möglichkeit der Stressverteilung [10, 49, 52, 85]. Der im Vergleich zum keramischen Material weichere, elastischere Kunststoff stimmt in Bezug auf seine Druckfestigkeit annähernd mit den Keramiken überein und schafft somit die Voraussetzung für eine Stressverteilung. Aus diesem Grund sollten Keramiken mit einer Biegefestigkeit von unter 200 MPa adhäsiv eingesetzt werden, was auf die untersuchten Keramiken zutrifft.

6.2.5. Einsatzbereich der Indentermethode und Grenzen

Anwendbar ist die Indentermethode für einfache bis teilverstärkte Glaskeramiken. Die Methode etablierte sich auch bei der Anwendung auf die Oxidkeramiken. Die Nutzung der Indentermethode für die Bestimmung der Risszähigkeit verstärkter Keramiken wird durch die Schwierigkeit der Erzeugung oberflächlich sichtbarer Risse eingeschränkt.

Zum einen entsteht diese Problematik durch die schlechte Polierbarkeit der Oxidkeramiken, wodurch die eventuell erzeugten Risse kaum von bestehenden Schleifspuren abzugrenzen waren. Zum anderen stellte sich die Erzeugung ausmessbarer Risse ohne Verursachung von Abplatzungen als schwierig dar.

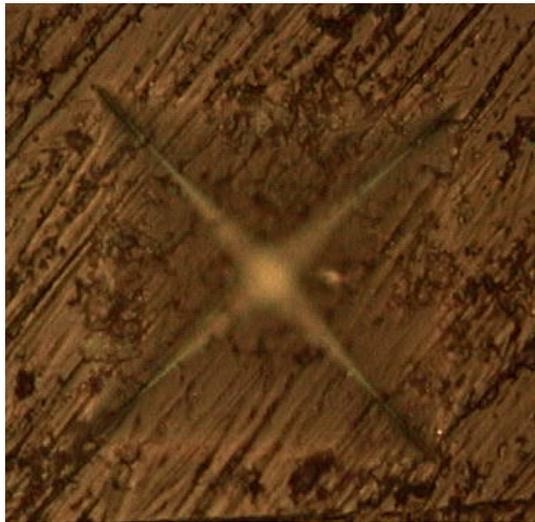


Abb. 6.12.: Schwierigkeit der Erzeugung sichtbarer Risse auf schlecht polierbaren Oxidkeramiken

Eine Möglichkeit der Umgehung dieser Problematik könnte in der Verfeinerung der Politur liegen, um die Schleifspuren zu reduzieren und so die Dimension der von den Härteeindrücken ausgehenden Risse erkennen zu können. Auch die Anfärbung der resultierenden Risse könnte dieses Problem lösen. GEIS-GERSTORFER [37] beschrieb die Möglichkeit einer Einfärbung der erzeugten Risse mittels in Eugenol kolloidal gelösten Graphits bzw. die Anätzung der Probenoberfläche mit Flusssäure, um eine Aufweitung der Rissflanken zu erzielen. BLEISE dagegen setzte eine Schräglichtbeleuchtung ein, um den hell-dunkel Kontrast der Rissflanken zu verstärken [11].

Die Indentermethode erwies sich als eine wenig aufwendige Methode, bei der auch kleine Prüfkörperabmessungen eingesetzt werden können [3, 19, 108, 119, 125], was den Größenverhältnissen in der Zahnmedizin entgegenkommt. Damit reduziert sich auch der Materialbedarf für die Herstellung der Prüfkörper. Weiterhin zeichnet sich die Methode durch eine einfache und schnelle Durchführbarkeit aus. Sie ist in jedem Labor durchführbar, welches über ein Vickershärtegerät und ein Lichtmikroskop verfügt, weshalb sie sich als sehr praxisnah erwies. Eine Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Risszähigkeitswerte ist bei einer Vereinheitlichung der Auswertung gegeben. Chargen industriell hergestellter Keramiken könnten mit Hilfe der Indentermethode in ihrer Qualität überprüft werden. Außerdem kann die Bestimmung des Indikationsbereiches verschiedener voll-

keramischer Systeme durch die Nutzung der Indentermethode als eine schnelle, wenig aufwendige Methode erfolgen.

Auch wenn die Indentermethode eine Möglichkeit der Risszähigkeitsbestimmung darstellt, mit der die Genauigkeit der Fraktographie nicht erreicht werden kann, könnte sie aufgrund ihrer einfachen Handhabung den routinemäßigen Einsatz der kritischen Risszähigkeit ermöglichen.

6.3. Festlegung der Indikationsbereiche für vollkeramische Restaurationen

Für die Erfolgssicherheit vollkeramischer Restaurationen sind die mechanischen und klinischen Anforderungen an den Werkstoff von entscheidender Bedeutung [75]. Der Indikationsbereich wird durch die Materialeigenschaften eines Werkstoffs definiert. Insbesondere der Elastizitätsmodul, die Biegefestigkeit, der Weibullmodul und die Risszähigkeit wurden im Falle der Dentalkeramiken zur Festlegung des Indikationsbereiches herangezogen. Im Indikationsbereich findet die unterschiedliche Belastung im Frontzahn- und Seitenzahngebiet Berücksichtigung, weshalb die Lage und auch die Größe einer Restauration für die Materialwahl entscheidend sind.

Die Anforderungen an dentalkeramische Materialien für die verschiedenen vollkeramischen Restaurationen sind zum heutigen Zeitpunkt nur uneinheitlich definiert, wobei gegenwärtig nur eine Materialeigenschaft der Keramiken, die Biegebruchfestigkeit (DIN), zur Festlegung der Indikationsstellung herangezogen wird. Aus diesem Grund sollte neben der Biegefestigkeit die kritische Risszähigkeit bei der Einteilung der Indikationsbereiche berücksichtigt werden.

Die denkbaren Anforderungen an keramische Materialien für die verschiedenen vollkeramischen Restaurationen sind in der Tabelle 6.13. gegenübergestellt.

Tab. 6.13.: Denkbare Anforderungen an Dentalkeramiken für vollkeramische Restaurationen

Biegefestigkeit	100 MPa	200-300 MPa	>350 MPa	>800MPa
Kritische Risszähigkeit	1 MPa m ^{1/2}	1,5-2,5 MPa m ^{1/2}	3,5 MPa m ^{1/2}	7 MPa m ^{1/2}
Indikationsbereich	▪ Frontzahn-einzelkrone	▪ Frontzahn-brücken ▪ Molarenkronen	▪ kleinspanni-ge Brücken im Seiten-zahngebiet	▪ keine Ein-schränkung

Keramiken, die für eine Frontzahneinzelkrone Verwendung finden sollen, müssen nach unserer Empfehlung eine Biegefestigkeit von mindestens 100 MPa und eine Risszähigkeit von $1 \text{ MPa m}^{1/2}$ aufweisen.

Für die Herstellung von vollkeramischen Frontzahneinzelkronen können demnach die Keramiken DC Cristall, DC Cream, 20/9/1A, D08/01 und ProCAD unter Berücksichtigung der optimalen Brennführung Anwendung finden. Lediglich die Keramik Cerec Vita Mark II erreichte in keiner Versuchsreihe eine Biegefestigkeit von 100 MPa.

Besitzen keramische Materialien eine Biegefestigkeit von 200 bis 300 MPa und eine Risszähigkeit von $1,5$ bis $2,5 \text{ MPa m}^{1/2}$ können sie für Frontzahnbrücken und Molarenkronen genutzt werden. Liegt eine Biegefestigkeit von über 350 MPa und eine Risszähigkeit von mehr als $3,5 \text{ MPa m}^{1/2}$ vor, sind diese Keramiken für kleinspannige Brücken im Molarenbereich einsetzbar. Über 800 MPa und über $7 \text{ MPa m}^{1/2}$ existiert keine Einschränkung in der Anwendung keramischer Materialien.

Entsprechend der 1998 veröffentlichten Norm ISO 6872 werden Vollkeramiken in zwei Gruppen unterteilt. Die Typ I-Keramiken umfassen keramische Materialien, die in Pulverform geliefert werden und somit einem Sinterbrand unterzogen werden. Als Typ II-Keramiken werden unter anderem fräsbare Keramiken bezeichnet. Die Typ II-Keramiken teilen sich wiederum in zwei Klassen auf. Die Klasse I beinhaltet Gerüstkeramiken, die abschließend verblendet werden müssen. Das keramische Material für die Inlay- und Onlay-Herstellung entspricht der Klasse II, es benötigt keine weitere Beschichtung. Entsprechend der DIN wird für Keramiken des Typ II Klasse I (Gerüstkeramiken) eine Mindestbiegefestigkeit von 100 MPa gefordert, während Keramiken der Klasse II mindestens 30 MPa aufweisen müssen [54, 137]. Die in der Tab. 6.12. geforderte Mindestbiegefestigkeit für Einzelkronen stimmt mit der in der DIN verankerten Anforderung überein.