



Diplomarbeit

**Oberflächenrisse unter
Kontaktbelastung**

Gernot Kolb

2013

Institut für Struktur- und Funktionskeramik
an der Montanuniversität Leoben

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

.....

Datum

.....

Unterschrift

Danksagung

Sehr herzlich bedanken möchte ich mich bei den MitarbeiterInnen des Instituts für Struktur- und Funktionskeramik, dem Vorstand des Instituts o. Univ. Prof. Dr. Robert Danzer sowie Ass. Prof. Dr. Tanja Lube, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen, immer ein offenes Ohr für meine Probleme und Anliegen hatten und mich mit ihrem Wissen unterstützt haben.

Die Forschungsarbeiten, die zu diesen Ergebnissen geführt haben, wurden gemäß der Finanzhilfvereinbarung Nr. 263476 im Zuge des Siebten Rahmenprogramms der Europäischen Union RP7/2007-2013 gefördert.

Abschließend möchte ich mich sehr herzlich bei meinen Eltern bedanken, die mir mein Studium erst ermöglicht haben und bei meiner Freundin Stephanie Buchegger, die mich in allen Lebenslagen unterstützt, mir stets Mut zugesprochen und mich fortwährend motiviert hat.

Abstract

Favourable properties like a low density, high strength and stiffness combined with a good wear resistance up to high temperatures make structural ceramics candidate materials for applications like tools for metal forming or balls in bearings. In such applications the components often do not fail by sudden brittle fracture but by growth of preexisting surface flaws due to contact loading.

In this thesis the crack growth of artificially introduced (by Knoop indents) surface cracks in silicon nitride plates was investigated using acoustic emission detection. Contact loading was realised by pressing a ball onto the plate.

Several practical aspects had to be investigated prior to the tests. Suitable settings for the acoustic emission detection, a practical surface finish of the plates and a possibility for the marking of the contact position were identified. The size and shape of surface cracks introduced with loads between 5 kg and 20 kg were determined. Long cracks (crack depth much smaller than crack surface length) were produced by aligning several indents in a row.

These surface cracks were stressed by normal loading with a ball at various distances until an acoustic signal was detected. The load necessary for acoustic events increased with increasing distance of the loading point from the crack. For some of the cracks, an elongation was found at the surface. A simple fracture mechanical analysis showed, that not all cracks reach a mode I stress intensity factor that is sufficiently high for crack growth. Unfortunately, further fracture mechanical analyses regarding mixed-mode loading conditions were not possible since no information on mode II and mode III stress intensity factors was available.

The obtained results showed that it is possible to grow surface cracks by contact loading and to detect the crack growth acoustically as well as by microscopic observations.

Kurzfassung

Die Kombination der vorteilhaften Eigenschaften keramischer Werkstoffe, wie die geringe Dichte, die hohe Steifigkeit und hohe Härte mit einer hohen Verschleißbeständigkeit, auch bei hohen Temperaturen, qualifiziert Keramiken als Werkstoffe für Rollen zur Drahtwalzung oder Kugeln für Kugellager. In solchen Anwendungen versagen diese keramischen Bauteile nicht sofort bei einer ersten Belastung, sondern die Schädigung erfolgt durch das Wachstum von vorhandenen Oberflächenrissen durch die herrschende Kontaktbelastung.

In dieser Diplomarbeit wurde das Risswachstum von künstlich (durch Knoop-Härteeindrücke) erzeugten Oberflächenrissen in ebenen Platten aus Siliziumnitrid mithilfe akustischer Detektion untersucht. Die Belastung erfolgte durch eine Kugel. Um die Kontaktversuche durchführen zu können mussten verschiedenen Teilaspekte der Versuchsdurchführung in Vorversuchen untersucht werden. Geeignete Einstellungen zur akustischen Detektion und eine geeignete Oberflächenqualität der Platten wurden ermittelt und eine Möglichkeit zur Markierung der Kontaktposition gefunden. Mithilfe von Biegeversuchen konnten die Größe und Form von Eindruckrissen, die mit Knoop-Härteeindrücken mit Lasten zwischen 5 kg und 20 kg erzeugt wurden, ermittelt werden. Durch das Aneinanderreihen von mehreren Knoop-Eindrücken in einer Linie konnten auch lange Oberflächenrisse (Tiefe viel kleiner als Länge) hergestellt werden.

Diese Oberflächenrisse wurden durch einen Kugelkontakt in unterschiedlichen Abständen bis zur Detektion von akustischen Signalen belastet. Die dafür nötigen Lasten steigen mit steigendem Abstand der Belastungsposition vom Riss an. Für einige Risse konnte eine Verlängerung an der Oberfläche gemessen werden. Nicht alle Risse wachen allerdings an der Oberfläche, da dafür die ermittelten Werte für den Spannungsintensitätsfaktor K_I zu klein waren. Weiterführende bruchmechanische Analysen in Richtung mehrachsige Belastung waren nicht möglich, da die Spannungsintensitätsfaktoren für andere Belastungsmoden als Mode I nicht bekannt sind.

Die bis jetzt ausgewerteten Ergebnisse zeigen jedoch deutlich, dass es möglich ist, Risswachstum unter Kontaktspannungsbelastung sowohl akustisch zu detektieren als auch mikroskopisch nachzuweisen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Elastische Kontakttheorie	3
2.2 Risse im Kontaktspannungsfeld	6
2.3 Linear elastische Bruchmechanik (LEBM)	9
2.3.1 Energiefreisetzungsrates G , Spannungsintensitätsfaktor K	9
2.3.2 Mixed-Mode-Beanspruchungen	10
2.4 Weibulltheorie	12
3 Experimentelles	13
3.1 Untersuchte Werkstoffe	13
3.2 Kontaktversuche Kugeln auf Platten	15
3.3 Ermittlung der Form künstlicher Risse	19
3.4 Untersuchung von Rissen unter Kontaktbelastung	23
4 Ergebnisse und Diskussion	29
4.1 Schädigung beim Kugel – Platte Kontakt	29
4.1.1 Bedingungen für die Ringrissbildung	30
4.1.2 Einfluss der Oberflächenqualität auf die Ringrissbildung	30
4.1.3 Möglichkeiten zur Markierung der Kontaktposition	32
4.1.4 Oberflächenqualität und Geräteeinstellungen für weitere Versuche	34
4.2 Größe und Form von Knoop-Eindruckrissen	34
4.3 Risswachstum unter Kontaktbelastung	40
4.3.1 Untersuchung von halb-elliptischen Oberflächenrissen	40
4.3.2 Kontaktbelastung von langen Oberflächenrissen	45
4.3.3 Praktische Aspekte bei den Kontaktbelastungsversuchen	47
5 Zusammenfassung und Ausblick	49
6 Literaturverzeichnis	52
8 Tabellenverzeichnis	57
Anhänge	58
Anhang A1.: Acoustic Emission Mikrophoneinstellungen	58
Anhang A2.: Schädigungskraft bei Kugel - Platte Versuchen	59
Anhang A3.: Messwerte zu Risslängen und Risstiefe	63
Anhang A4.: Messwerte der Kontaktbelastungsversuche an Oberflächenrissen	64

Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
\emptyset	[m]	Durchmesser
a_c	[m]	Kontaktradius
P	[N]	Indenterkraft
P_{soll}	[N]	Indenterkraftvorgabe
R	[m]	Kugelradius
E	[Pa]	Elastizitätsmodul
E^*	[Pa]	Kombinierter Elastizitätsmodul
E_I	[Pa]	Elastizitätsmodul des Indentermaterials
E_2	[Pa]	Elastizitätsmodul des Probenmaterials
ν	[-]	Querkontraktionszahl
ν_1	[-]	Querkontraktionszahl des Indentermaterials
ν_2	[-]	Querkontraktionszahl des Probenmaterials
p_m	[Pa]	mittlerer Kontaktdruck
p_{max}	[Pa]	maximaler Kontaktdruck
$p(r)$	[Pa]	Kontaktdruck in Abhängigkeit des Ringradius
r	[m]	Ringradius
$\sigma_r(r)$	[Pa]	Radialspannung
$\sigma_{r \text{ max}}$	[Pa]	maximale Radialspannung
r_0	[m]	Typischer Radius für ringförmige Risse
ϕ	[rad]	Tiefster Punkt des Risses
c	[m]	Risslänge
c_0	[m]	Risslänge vor dem Abschleifen
a	[m]	Risstiefe
a_0	[m]	Risstiefe vor dem Abschleifen
d	[m]	Eindruckabstand
d_{soll}	[m]	Eindruckabstandvorgabe
σ_{ij}	[Pa]	allgemeine Form der globalen Spannung
σ	[Pa]	globale Spannung
K	[MPa \sqrt{m}]	Spannungsintensitätsfaktor
Y	[-]	Geometriefaktor
a_i	[m]	Startrissgröße
π	[-]	Kreiszahl
K_I	[MPa \sqrt{m}]	Spannungsintensitätsfaktor Mode I
K_{II}	[MPa \sqrt{m}]	Spannungsintensitätsfaktor Mode II
K_{III}	[MPa \sqrt{m}]	Spannungsintensitätsfaktor Mode III

K_{IC}	$[MPa\sqrt{m}]$	kritischer Spannungsintensitätsfaktor Mode I
K_{IIC}	$[MPa\sqrt{m}]$	kritischer Spannungsintensitätsfaktor Mode II
G	$[J/m^2]$	Energiefreisetzungsrate
G_c	$[J/m^2]$	kritische Energiefreisetzungsrate
γ_s	$[J/m^2]$	Oberflächenenergie
$F(\sigma, V)$	$[-]$	Versagenswahrscheinlichkeit
V	$[m^3]$	Probenvolumen
V_0	$[m^3]$	charakteristisches Volumen
σ_0	$[Pa]$	charakteristische Festigkeit
m	$[-]$	Weibullmodul
ρ	$[g/cm^3]$	Dichte
z_0	$[m]$	Tiefe der plastischen Zone des Härteeindruckes
L	$[m]$	Länge des Härteeindruckes
b	$[m]$	Breite des Härteeindruckes
x	$[m]$	Tiefe des Härteeindruckes
dB	$[B]$	Dezibel
HK	$[HK]$	Knoop Härte
UV	$[-]$	Ultraviolett

1 Einleitung

Keramische Werkstoffe zeichnen sich durch eine hohe Festigkeit bei geringer Materialdichte aus. Problematisch ist die Sprödigkeit von Keramiken, die in ihrem atomaren Aufbau begründet ist. Kombiniert man weitere, andere, vorteilhafte Eigenschaften wie die hohe Steifigkeit, die hohe Härte und die hohe Verschleißbeständigkeit auch bei hohen Temperaturen, so finden Keramiken bereits ein weites Einsatzspektrum [1]. Aufgrund dieser Eigenschaften ergeben sich typische Anwendungen technischer Keramiken beispielsweise als Rollen aus Si_3N_4 zur Drahtwalzung [2-7], Kugel für Kugellager [8] oder Walzen und Siebe für die Papierindustrie. Bei der Metallumformung durch Walzen können durch die Verwendung einer solchen Strukturkeramik als Rollen viel höhere Standzeiten als bei Hartmetallrollen erreicht und gleichzeitig mehr Rohmaterial verarbeitet werden [4, 6, 7]. Bei der Anwendung als Kugel für Hybridkugellager bietet sich einerseits der Vorteil, dass das Gewicht des gesamten Kugellagers durch Verwendung von keramischen Werkstoffen deutlich verringert und als Nebeneffekt die Lebensdauer erhöht wird [8]. Typische Versagensmuster solcher keramischen Anwendungen können Ausbrüche, Abplatzungen oder in Folge vieler Temperaturwechsel Thermoschockrisse sein.

In der Regel versagen diese keramischen Bauteile nicht sofort bei einer ersten Belastung, sondern die Schädigung erfolgt stufenweise. Daher ist es wichtig, einen besonderen Blick auf den Schädigungsprozess unter wachsender Belastung zu werfen. Um eine Voraussage über eine zu erwartenden Lebensdauer treffen zu können, ist ein umfangreiches Wissen über das Verhalten von Rissen oder Defekten im Bauteil von Nöten. Für eine über Pilotversuche hinausgehende Verwendung von Siliziumnitrid als Walzen ist eine Lebensdauervorhersage, wie sie beispielsweise in Standardwerken über Keramiken dargestellt ist [2-7, 9], nötig. Eine spezielle Herausforderung stellt dabei die Ermittlung von Spannungsintensitätsfaktoren für Risse in solchen Bauteilen dar. Diese Risse werden unter anderem durch die Spannungen, die sich aufgrund der Kontaktbelastung beim Walzen ergeben, belastet. Für solche Berechnungen wurden am Institut für Struktur- und Funktionskeramik an der Montanuniversität Leoben im Rahmen des EU-geförderten Projektes RoLiCer (FP7 GA 263476) [10] Methoden entwickelt. Diese Methoden sollen unter anderem an Modellgeometrien, beispielsweise am Kugel-Platte-Kontakt überprüft werden.

Ziel dieser Arbeit ist, das Wachstum von Rissen, die unter einer ansteigenden Kontaktspannungsbelastung stehen, akustisch zu detektieren und zu bestimmen, ab welcher Last und bei welchem Abstand sie wachsen.

Dazu war ein neu zu entwickelnder Versuchsaufbau nötig. In Vorversuchen sollte geklärt werden, welchen Einfluss verschiedene Oberflächenqualitäten der Plattenproben auf die akustischen Signale haben. Möglichkeiten zur Markierung der Kontakbelastungsposition sollten untersucht werden. Als Versuchswerkstoff für die Platten wurde ein FSNI GR-12-84 (Si_3N_4) Material von FCT Ingenieurkeramik eingesetzt. Künstliche Risse werden mittels Knoop-Eindrücken eingebracht. Im Anschluss wurden die durch die Knoop-Eindrücke erzeugten Eigenspannungen durch Abschleifen entfernt. Die Belastung des Probenmaterials erfolgt dabei mittels Siliziumnitridkugeln mit jeweils unterschiedlichen Durchmessern (\varnothing 5,556 mm und \varnothing 12,7 mm).

2 Grundlagen

2.1 Elastische Kontakttheorie

In der vorliegenden Arbeit werden Daten und Möglichkeiten aus den Hertz'schen Tests erfasst, um oberflächliches Risswachstum, die Bruchzähigkeit und die Spannung in der Oberfläche zu beschreiben [11]. In diesem Kapitel möchte ich daher einen kleinen Einblick in die Kontakttheorie nach Hertz geben. Die Kontakttheorie nach Hertz [12] beschäftigt sich mit Berechnung von Größe und Form der Berührungsflächen zwischen zwei aufeinander gedrückten elastischen Körpern und gibt die Höhe und Verteilung der mechanischen Spannungen unter den Berührungsflächen an.

Ein Kontakt zwischen zwei Körpern herrscht nur dann, wenn sich diese gegenseitig berühren. Bei steigender Beanspruchung entsteht statt einem Kontaktpunkt eine Kontaktfläche. Die Kontaktfläche wird bei Belastung einer ebenen Platte mit einem Kugelindenter immer kreisförmig betrachtet. Sie führt zu einer ellipsenförmigen Druckverteilung in der Kontaktfläche. Durch die oben bereits erwähnten vereinfachten Annahmen wird die Berechnung der Kontaktspannungen um ein vielfaches vereinfacht. Um die Hertz'sche Kontakttheorie die erwähnten Größen berechnen zu können, müssen im Vorfeld einige Annahmen getroffen werden:

- Die Hertz-Theorie ist nur gültig im linear-elastischen Bereich (Hooke'sches Gesetz) für homogenes und isotropes Werkstoffverhalten.
- Es gibt keine Reibung zwischen Probenoberfläche und Indenter und daher auch keine Schubspannungen.
- Die Kontaktfläche ist klein gegenüber Probenabmessungen und eben.
- Die Spannungen sind lokalisiert, das heißt, die Ränder der Körper sind spannungsfrei.

Da in dieser Arbeit nur Kontaktversuche mit Kugeln auf ebenen Platten durchgeführt wurden, werden im Folgenden nur die Gleichungen für diesen speziellen Fall angegeben. Der Kontaktradius a errechnet sich aus Gleichung (1), wobei P die Indenterkraft, R der Kugelradius und E^* der kombinierte Elastizitätsmodul ist:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \cdot \frac{P \cdot R}{E^*}} \quad (1)$$

Da das Kugelmaterial einen anderen Elastizitätsmodul als das Probenmaterial besitzt, muss der Elastizitätsmodul der beiden Materialien kombiniert werden. Es entsteht daraus der kombinierte Elastizitätsmodul E^* . Dieser wird durch:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad , \quad (2)$$

beschrieben, mit den elastischen Eigenschaften (E-Moduli E_1, E_2 , Querkontraktionszahlen ν_1, ν_2) der beiden Kontaktpartner. Der mittlere Druck in der Kontaktfläche p_m ist:

$$p_m = \frac{P}{\pi a_c^2} \quad , \quad (3)$$

und der maximale Druck p_{\max} , der im Zentrum der Kontaktfläche herrscht ist

$$p_{\max} = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi a_c^2} \quad . \quad (4)$$

Die Verteilung der Druckspannungen in der Kontaktfläche ($r \leq a_c$) lässt sich am einfachsten in Abhängigkeit von der radialen Koordinate r darstellen:

$$p(r) = p_{\max} \sqrt{1 - \frac{r^2}{a_c^2}} \quad . \quad (5)$$

In der Oberfläche wirken radiale Zugspannungen $\sigma_r(r)$, die sich durch

$$\frac{\sigma_r(r)}{p_m} = \begin{cases} \frac{1-2\nu}{2} \frac{a_c^2}{r^2} \left[1 - \left(1 - \frac{r^2}{a_c^2} \right)^{3/2} \right] - \frac{3}{2} \left(1 - \frac{r^2}{a_c^2} \right)^{1/2} , & r \leq a_c \\ \frac{1-2\nu}{2} \frac{a_c^2}{r^2} , & r > a_c \end{cases} \quad (6)$$

darstellen lassen. Das Maximum dieser Zugspannungen liegt bei $r = a$:

$$\sigma_{r,\max} = \frac{1-2\nu}{2} p_m = \frac{1-2\nu}{2} \frac{P}{\pi a_c^2} \quad . \quad (7)$$

Diese Zugspannungen sind für die Entstehung der Hertz'schen Ringrisse verantwortlich. Es wurde jedoch beobachtet [13], dass die Risse nicht genau am Kontaktradius entstehen, sondern etwas weiter außen. In **Abbildung 1a** ist schematisch die kegelförmige Ausbreitung des

Risses in die Tiefe erkennbar, wie sie stattfindet, wenn die Last über den kritischen Wert für die Ringrissbildung erhöht wird.

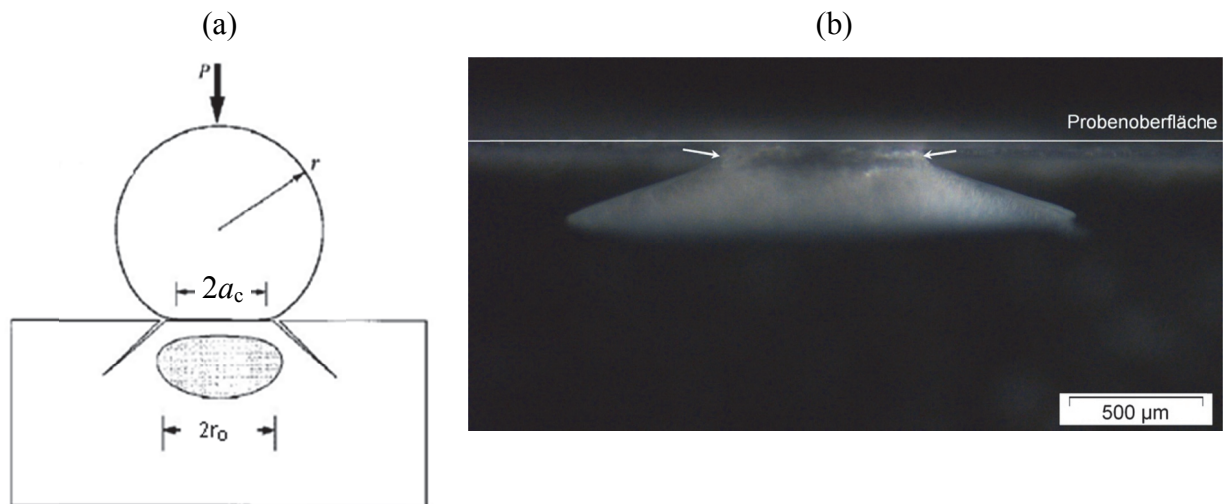


Abbildung 1: (a) Skizze eines Kugel-Platte-Kontakt mit entstehenden Ring- und Kegelriss [12], (b) Ring- und Kegelriss in Glas. Der Ringriss ist durch Pfeile gekennzeichnet.

Die Spannungen im Inneren der Platte wurden von Huber [14] angegeben. Im Rahmen des Rolicer Projektes wurde ein Programm von Dr. Stefan Rasche geschrieben [10], das zur Darstellung dieser Spannungen in unterschiedlichen Schnittebenen dient.

2.2 Risse im Kontaktspannungsfeld

Das Verhalten von Oberflächenrissen in Kontaktspannungsfeldern kann mit der linear-elastischen Bruchmechanik (siehe Abschnitt 2.3) beschrieben werden. Die Berechnung von Spannungsintensitätsfaktoren stellt in diesem Fall aber eine besondere Herausforderung dar, weil bei dieser Belastung besonders steile Spannungsgradienten vorliegen. Das wird in **Abbildung 2** deutlich.

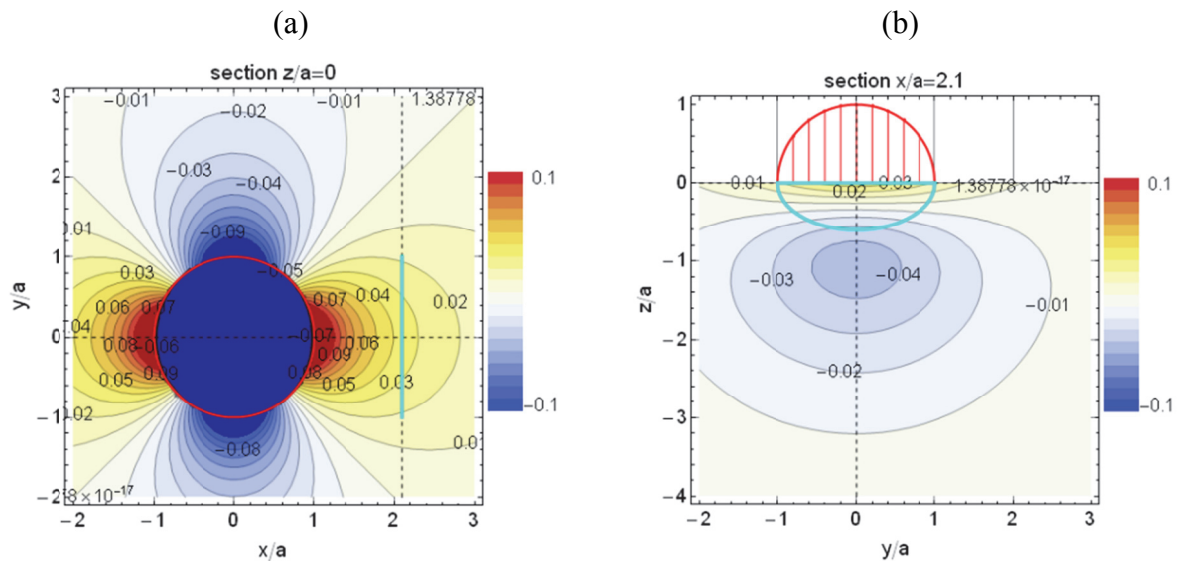


Abbildung 2: Plot der Kontaktspannungen in der Oberfläche einer Platte. Alle Spannungen wurden auf den maximalen Kontaktdruck p_{\max} normiert, alle Längen auf den Kontaktradius a . Ein halb-elliptischer Oberflächenriss ist in Cyan eingezeichnet. (a) Spannungen an der Oberfläche, (b) Spannungen normal zum Riss in der Rissebene.

Die Section $z/a=0$ (**Abbildung 2a**) stellt den Kugel – Platte – Kontakt von der Draufsicht dar. Der große blaue Kreis ist die Kontaktzone. Ein halb-elliptischer Oberflächenriss ist rechts davon in Cyan eingezeichnet. Hier sind deutlich die unterschiedlichen Farben von Rot bis Blau erkennbar. Die roten Bereiche in der Nähe des Kontaktes stellen den Zugspannungsbereich dar, die bläulich gefärbten Bereiche einen Druckspannungsbereich. Man kann aufgrund dieser Darstellung abschätzen, welche Bereiche des Risses im Zugspannungsbereich liegen. Natürlich kann mit diesem Programm nicht exakt vorausgesagt werden, dass es real zu einem Wachstum der Defekte kommen kann. **Abbildung 2b** zeigt einen senkrechten Schnitt in der Rissebene. Man erkennt, dass die auftretenden Zugspannungen nur in einem sehr flachen Bereich unter der Oberfläche auftreten, d. h. rasch abklingen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass dieses programmierte Notebook eine gute Hilfe zur Vorstellung und Abschätzung der Position sowie der auftretenden Spannungszustände darstellt.

Von Levesque [15] wurden mittels 3D-FEM Berechnungen Spannungsintensitätsfaktoren (SIFs) für halb-elliptische Oberflächenrisse unterschiedlicher Geometrie ermittelt. Dieser SIFs variieren entlang der Rissfront vom tiefsten Punkt des Risse zum Oberflächenpunkt. Außerdem hängen sie stark vom Abstand des Risses vom Kontaktbereich ab. Weiters gibt Levesque [15] an, in welchem Abstand vom Kontakt der höchste SIF erreicht wird.

In **Abbildung 3** wird gezeigt, dass für die meisten Fälle der Oberflächenpunkt einen höheren SIF hat und die Risse daher an der Oberfläche wachsen müssten. Nur sehr flache Risse, die sich sehr nahe am Kontakt befinden haben am tiefsten Punkt einen etwas höheren SIF als am Rand.

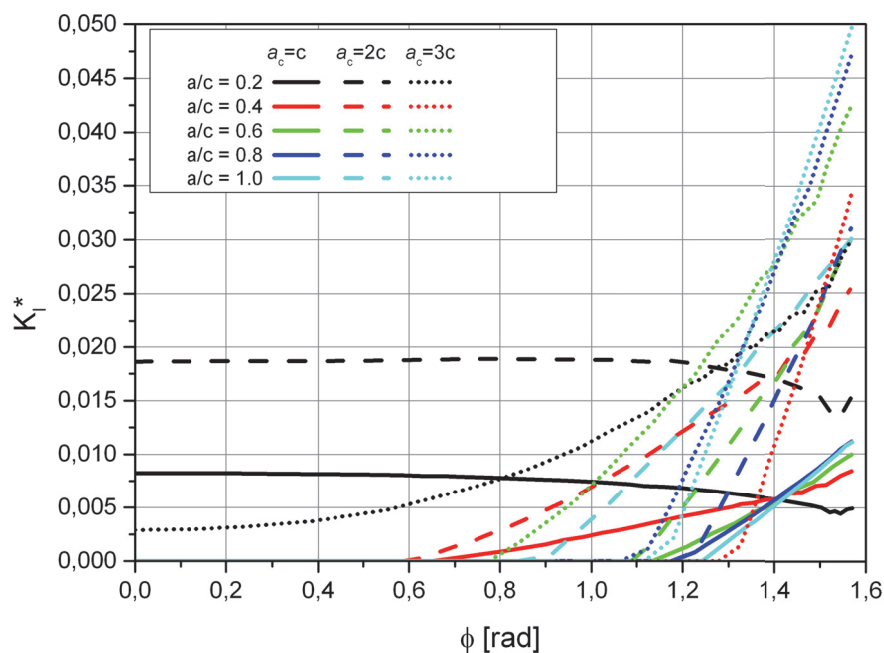


Abbildung 3: Plot der normierten Spannungsintensitätsfaktoren für Mode I Belastung, $K_I^* = K_I / p_{\max} \sqrt{\pi \frac{a}{Q}}$ über die Position an der Rissfront ($\phi = 0$ entspricht dem tiefsten Punkt des Risse, $\phi = \pi/2 = 1,57$ dem Oberflächenpunkt) für Risse in unterschiedlichem Abstand vom Kontakt, nach [15].

Tabelle 1 zeigt die Abstände des Risses vom Kontakt, für die der maximale SIF gefunden wurde in Abhängigkeit von der Rissgröße in Relation zur Kontaktgröße.

Tabelle 1: Abstände des Risses vom Kontakt, für die der Spannungsintensitätsfaktor K_I maximal ist, nach [15].

Risstiefe/Risslänge	Abstand Kontaktmitte - Riss		
	$a_c = 1 c$	$a_c = 2 c$	$a_c = 3 c$
1	2,3	1,5	1,4375
0,8	2,3	1,4375	1,4375
0,6	2,1	1,4375	1,4375
0,4	1,95	1,3125	1,375
0,2	1,95	1,3125	1,3125

Die geometrischen Verhältnisse für die Risse in der ersten Zeile aus **Tabelle 1** sind in **Abbildung 4** skizziert.

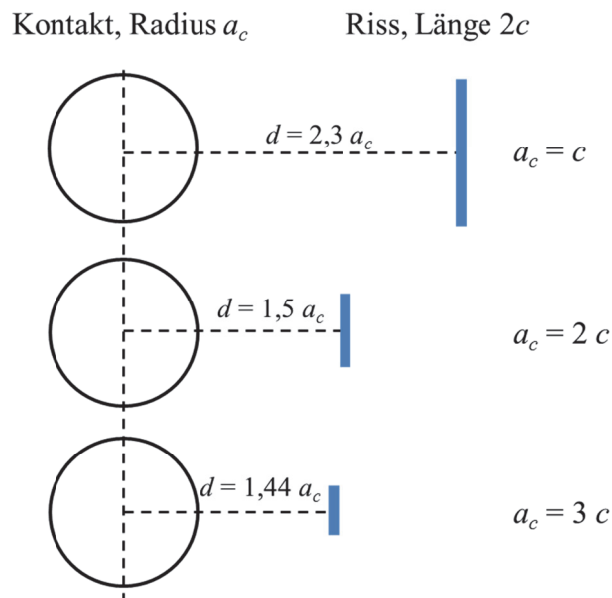


Abbildung 4: Geometriebedingungen für Kontaktgröße und Risslänge für maximales K_I lt. Tabelle 1.

2.3 Linear elastische Bruchmechanik (LEBM)

Speziell bei keramischen Werkstoffen sind die Eigenschaften vom Grundmaterial sowie auch von den Inhomogenitäten und Defekten abhängig. Man nimmt an, dass kein Material zu 100% fehlerfrei ist und somit Defekte oder Inhomogenitäten im Gefüge vorhanden sind [16]. Diese Defekte können als Risse betrachtet werden. Aufgrund der nahezu kompletten Unterdrückung der Versetzungsbewegung in Keramiken findet keine plastische Deformation statt. Viele keramische Werkstoffe weisen eine sehr kleine plastische Zone an der Rissspitze auf. Es kann daher ein linear elastisches Werkstoffverhalten angenommen und somit die LEBM zur Beschreibung des Risswachstums angewendet werden [1, 16].

Die linear elastische Bruchmechanik (LEBM) [16, 17] beschäftigt sich mit Rissausbreitung und Bruchvorgängen in Werkstoffen. Es wird ermittelt, bei welcher Belastung oder Beanspruchung sich ein Riss ausbreitet, stabil bleibt oder überkritisch wird und letztendlich zum Versagen des Bauteiles führt.

2.3.1 Energiefreisetzungsrage G , Spannungsintensitätsfaktor K

Mit Hilfe der LEBM [16, 17] kann die Spannungsverteilung σ_{ij} an der Rissspitze beschrieben werden:

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_{ij}(\theta) \quad , \quad (8)$$

wobei die Position durch r und θ gegeben ist. Die Spannungen skalieren mit

$$K = \sigma Y \sqrt{\pi a_i} \quad . \quad (9)$$

K ist der Spannungsintensitätsfaktor, σ die globale Spannung ohne Riss, a_i steht für die Risslänge und Y für den Geometriefaktor. Der Geometriefaktor Y kann bei innen liegenden Kreisrissen, so genannten Penny-shaped cracks, den Wert $(2/\pi)$ oder bei Oberflächenrissen den Wert 1,1215 annehmen [18, 19].

Übersteigt die aufgebrachte Spannungsintensität einen kritischen Wert des Materials, so tritt instabiles Risswachstum auf. Dieser Vorgang kann mittels des Griffith-Irwin-Kriteriums [20] beschrieben werden (Gleichung 9). Der kritische Wert wird auch Bruchzähigkeit genannt [16, 21].

$$K \geq K_{Ic} \quad (10)$$

Dieses Kriterium kann aus einer Energiebetrachtung abgeleitet werden. Die Energiefreisetzungsrates G ist die Energie, die bei der Ausbreitung des Risses freigesetzt wird. Sie wird auch als Rissausbreitungskraft bezeichnet.

$$G = \frac{K^2}{E} = \frac{Y^2 \sigma^2 a_i \pi}{E} \quad (11)$$

E ist der Elastizitätsmodul. Damit ein Riss wachsen kann, muss die Energiefreisetzungsrates G größer als die kritische Energiefreisetzungsrates G_c sein [16].

$$G \geq G_c \quad (12)$$

Die kritische Energiefreisetzungsrates G_c ist jene Energie, die bei der Erzeugung von einem Quadratmeter neu geschaffener Bruchfläche verbraucht wird.

In der LEBM, das heißt im ideal elastischen Fall, besteht die kritische Energiefreisetzungsrates G_c nur aus der Oberflächenenergie γ_s . Bei instabilen Rissen muss G_c größer als die doppelte Oberflächenenergie sein. Es gilt daher:

$$G_c \geq 2\gamma_s \quad (13)$$

Da bei einer neu geschaffenen Rissfläche immer zwei gegenüberliegende Flächen vorhanden sind steht vor γ_s der Faktor 2 [16, 22].

2.3.2 Mixed-Mode-Beanspruchungen

In der LEBM gibt es insgesamt drei unterschiedliche Rissöffnungsmoden oder Rissöffnungsarten. Diese sind in **Abbildung 5** dargestellt [1, 16]:

Mode I: Wird als so genannter Öffnungsmodus bezeichnet. Die angreifende Last wirkt hier senkrecht zur Rissebene.

Mode II: Wird als ebener Schermodus bezeichnet. Darunter versteht man Kräfte, welche parallel zur Rissebene und in Richtung der Rissausbreitung wirken, was einer transversalen Scherbelastung entspricht.

Mode III: Wird als nicht ebener Schermodus bezeichnet. Hier greift eine Belastung an, die parallel zur Rissebene und normal zur Rissausbreitung wirkt.

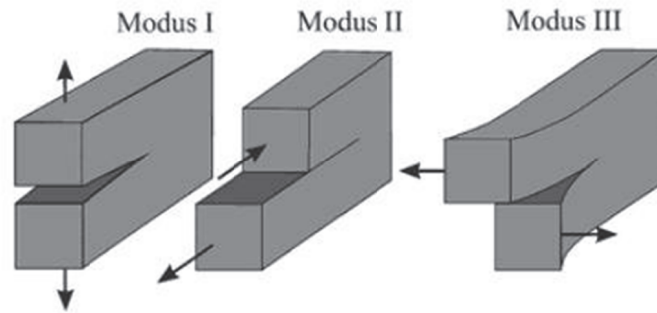


Abbildung 5: Rissöffnungsarten [18].

Für jede einzelne Art der Rissöffnung kann ein eigener Spannungsintensitätsfaktor bestimmt werden. Für Mode I Belastung wird dieser als K_I , für alle anderen Moden analog bezeichnet. In der Realität tritt meistens keine der zuvor genannten Moden alleine auf. Meistens sind es Kombinationen daraus. Insbesondere Risse in Kontaktspannungsfeldern werden in der Regel einer „mixed-mode“ Beanspruchung [17, 23, 24] ausgesetzt. Das Versagenskriterium für „mixed-mode“ Beanspruchung lässt sich in folgender Form schreiben:

$$f(K_I, K_{II}, K_{III}) = f_c, \quad (14)$$

wobei f_c nur vom Material abhängig ist.

Eine mögliche Form der Funktion f lässt sich ableiten, wenn man annimmt, dass ein Riss senkrecht zur maximalen Zugspannung wächst. Dies ist das sogenannte "Maximale Normalspannungskriterium" [25]. Schädigung der Probe tritt ein, wenn die Funktion $f(K_I, K_{II}, K_{III})$ den kritischen Wert der Bruchzähigkeit K_{IC} überschreitet. Aus diesen im Voraus getroffenen Annahmen können nun folgende Beziehungen aufgestellt werden [25, 17]:

$$\frac{\sqrt{8} \left(2K_I + 6\sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2} \right) * K_{II}^3}{\left(K_I^2 + 12K_{II}^2 - K_I\sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2} \right)^{1,5}} = K_{IC} \quad (15)$$

2.4 Weibulltheorie

Die vor mehr als 50 Jahren von Weibull entwickelte Theorie basiert im Wesentlichen auf einer stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilung zur Beschreibung der Zuverlässigkeit von spröden Werkstoffen oder elektronischen Bauteilen. Eine Voraussetzung dieser Theorie ist die so genannte „Weakest Link Hypothese“. Damit ist gemeint, dass eine Kette nur so stark ist, wie ihr schwächstes Glied. Das heißt, dass ein Bauteil genau dann versagen wird, wenn der größte Defekt im Bauteil bzw. in der Probe versagt [26]. Der wesentliche Inhalt dieser Theorie ist, dass mit steigender Last und steigendem Probenvolumen in Abhängigkeit der vorhandenen Fehler oder Defekte im Material, die Versagenswahrscheinlichkeit von spröden Bauteilen stetig zunimmt.

Die Summenhäufigkeitsfunktion kann über Gleichung (16) beschrieben werden.

$$F(\sigma, V) = 1 - \exp \left[-\frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (16)$$

F leitet sich aus dem englischen Sprachraum ab und heißt „Failure“, also das Versagen bzw. die Versagenswahrscheinlichkeit, V sei das Probenvolumen, V_0 ist das charakteristische Volumen, σ die anliegende Spannung und σ_0 die charakteristische Festigkeit des Materials. Da bei keramischen Werkstoffen eine volumenabhängige Versagenswahrscheinlichkeit vorherrscht, wird bei größerem geprüftem Volumen des Bauteiles auch die Wahrscheinlichkeit einen größeren, kritischen und möglicherweise bruchauslösenden Fehler zu finden zunehmend größer. Die Streuung der Festigkeitswerte kann mit Hilfe des Weibullmoduls m beschrieben werden.

3 Experimentelles

Die experimentellen Arbeiten umfassen

- Untersuchungen um eine geeignete Oberflächenqualität der Platten für die eigentlichen Experimente mit künstlichen Rissen zu ermitteln,
- Ermittlung von möglichen Maximallasten, die das untersuchte Material erträgt, ohne eine Kontaktschädigung zu erleiden,
- Versuche zur Abklärung von Möglichkeiten der Markierung der Kontaktposition,
- Ermittlung der Größe und Form von künstlich eingebrachten Oberflächenrissen,
- Belastungsversuche von Oberflächenrissen im Kontaktspannungsfeld.

In diesem Kapitel werden der Messversuchsaufbau sowie die Durchführung der einzelnen Versuche näher erläutert.

3.1 Untersuchte Werkstoffe

Für die Versuche standen Scheiben (Durchmesser 60 mm, Dicke 7 mm) aus einem gasdruckgesinterten Si_3N_4 mit Y_2O_3 und Al_2O_3 Zusätzen zur Verfügung (FSNI GR-12-84 von FCT Ingenieurkeramik, GmbH, D-96528 Frankenblick). Zur leichteren Handhabung wurden diese Scheiben in Viertelkreise geteilt. Unterschiedliche Oberflächenqualitäten wurden durch Diamantschleifen mit den Körnungen D 46 und D 15 hergestellt. Der Wert D 46 oder D 15 besagt, dass die Oberfläche des Prüfkörpers mit einer Körnung von 46 μm oder 15 μm geschliffen wurde.

Die Belastung erfolgte mit Kugeln aus einem kommerziellen Si_3N_4 für Kugellager mit Durchmesser 5,556 mm und 12,7 mm (zur Verfügung gestellt von SKF Engineering Research Centre, NL-3430 DT Nieuwegein).

Die elastischen Eigenschaften wurden mit der RUS – Methode [27] bestimmt und die Bruchzähigkeit der Scheiben mit der SEVNB-Methoden [28]. Sie sind in **Tabelle 2** zusammengefasst.

Tabelle 2: Kennwerte der verwendeten Materialien

	E-Modul [GPa]	Bruchzähigkeit [MPa√m]	Querkontraktionszahl [-]	Dichte [g/cm³]
Kugeln	308,5 ± 0,4	-	0,275	3,252 ± 0,001
Platte	292,8 ± 2,3	5,62 ± 0,086	0,262	3,245 ± 0,001

Das Plattenmaterial FSNI GR-12-84 weist eine besonders große Anzahl von Gefügefehlern auf. Diese sogenannten "snowflakes" sind Zonen, in denen die Kornzwickel nicht mit amorpher Korngrenzphase ausgefüllt sind, also Bereiche mit feiner Porosität. Ein Schlibfbild des Materials sowie eine Detailaufnahme einer „snowflake“ sind in **Abbildung 6** zu sehen.

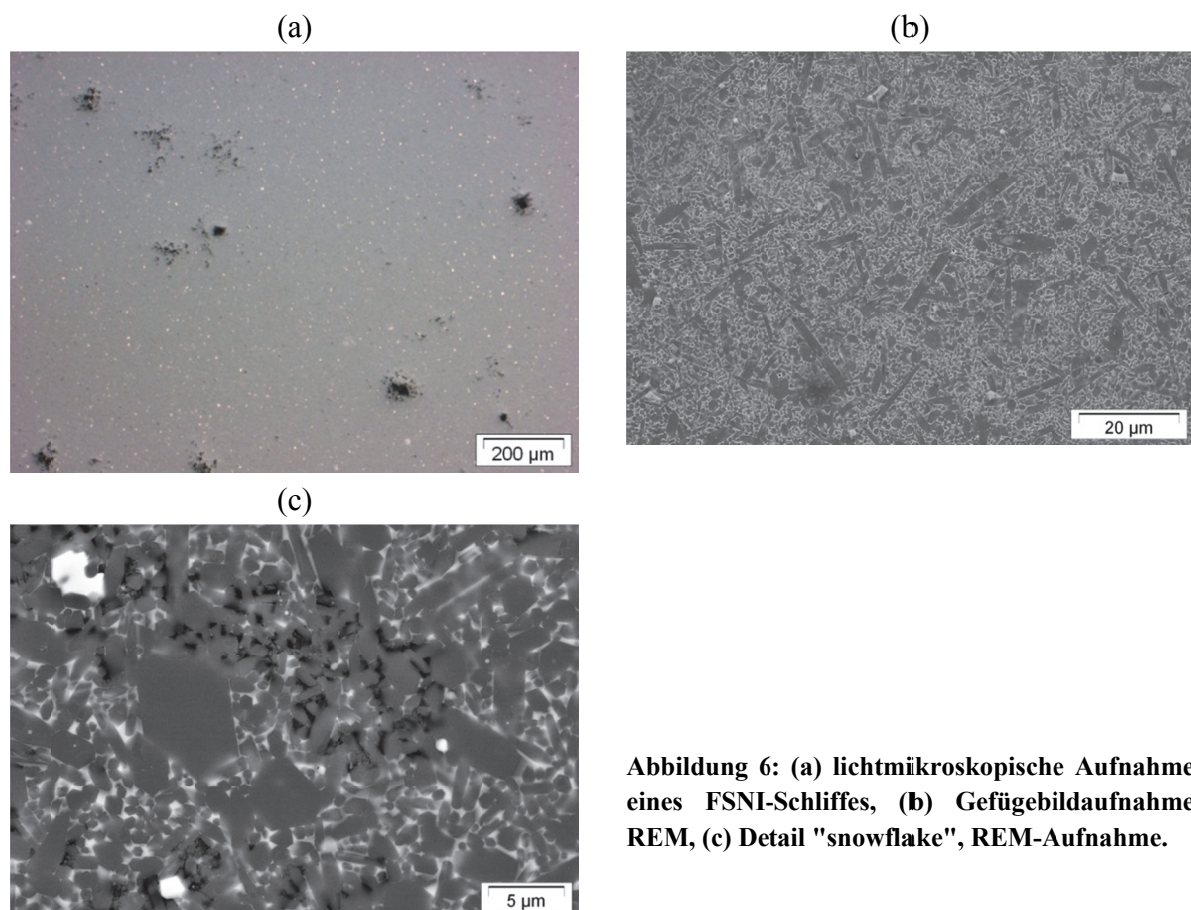


Abbildung 6: (a) lichtmikroskopische Aufnahme eines FSNI-Schliffes, (b) Gefügebildaufnahme REM, (c) Detail "snowflake", REM-Aufnahme.

3.2 Kontaktversuche Kugeln auf Platten

Um den Einfluss der Oberflächenqualität auf die Schädigung im Kugel – Platte – Kontakt und Möglichkeiten zur Markierung des Kontaktpunktes zu untersuchen, wurden Kontaktversuche durchgeführt. Dabei wurde eine Kugel so lange bei ansteigender Kraft auf die Platte gedrückt, bis sich unvollständige oder vollständige Ringrisse bildeten. Die Versuche wurden an der Universalprüfmaschine MIDI (Firma Messphysik Materials Testing, GmbH, A-8280 Fürstenfeld) durchgeführt. Am Oberstempel der Prüfmaschine wurde ein Halter für die Kugel befestigt. Die eigentliche Si_3N_4 - Eindruckkugel mit einem Durchmesser von 5,556 mm oder 12,7 mm wurde an dem Eindruckkugelhalter mit Fett befestigt. Die Haftung der Kugel erfolgt über die Adhäsionskräfte. Dies dient dazu um eine weitgehend reibungslose Ausrichtung der Kugel während des Versuches zu gewährleisten. Die untersuchte Keramikplatte wurde auf der unteren Druckplatte der Maschine aufgelegt.

Um eine Schädigung des Werkstoffes akustisch wahrzunehmen, wurden die zwei Mikrophone des Vallen Acoustic Emission Systems (Vallen-Systeme, GmbH, D-82057 Icking) oben und unten am Spannzeug der Maschine angebracht.

Um mögliche Störsignale aus der natürlichen Umgebung weitestgehend zu unterbinden, mussten die beiden Mikrophone möglichst nahe an der Probe angebracht werden. Dazu wurde als Kopplungsmedium Fett auf die Mikrofonunterseite aufgebracht und die Mikrophone mit Isolierband nahe der Probe befestigt um eine möglichst gute Signalübertragung zu gewährleisten (**Abbildung 7**). Die Kraft- und Akustiksignale wurden in der Software zusammengeführt und gespeichert.

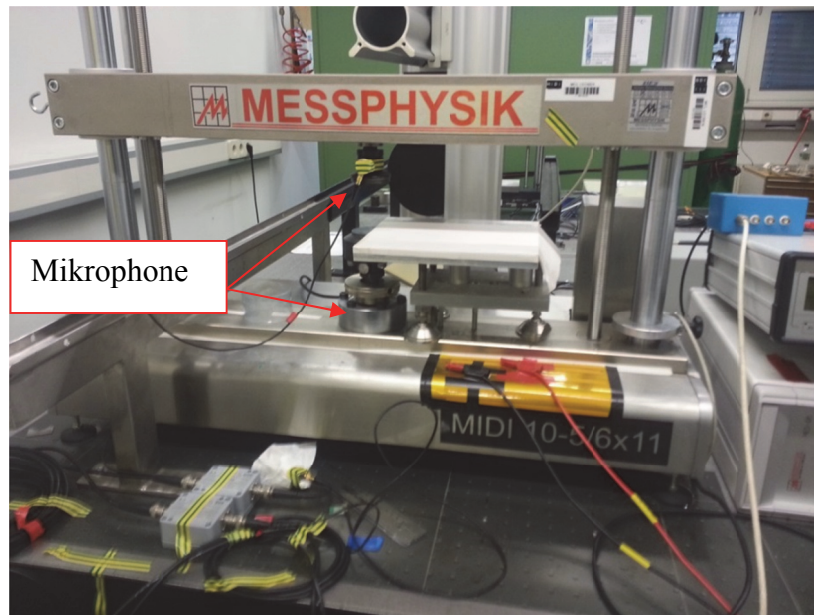
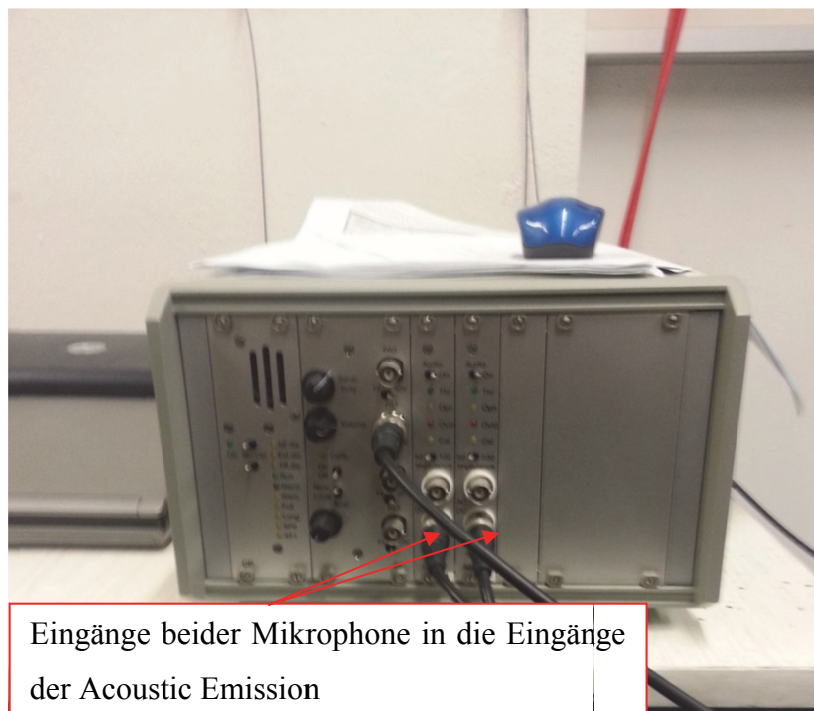


Abbildung 7: Versuchsaufbau Druckversuch mit Si_3N_4 Kugel auf FSNI.

In **Abbildung 7** ist schematisch der Versuchsaufbau dargestellt. **Abbildung 8** zeigt das akustische Aufzeichnungsgerät „Vallen Acoustic Emission“.



Eingänge beider Mikrophone in die Eingänge der Acoustic Emission

Abbildung 8: Vallen Acoustic Emission Gerät zur Signalaufzeichnung.

Die erforderlichen Grund- und Geräteeinstellungen an der Acoustic Emission sind in der Diplomarbeit von Jürgen Rohr [13] ersichtlich.

Der Versuchsablauf wurde über ein Blockprogramm gesteuert. Zu Versuchsbeginn wurden als erstes sowohl die Last als auch der Weg variiert. Danach bewegte sich der Druckstempel mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min in Richtung Probe, bis eine Vorkraft von größer gleich 5 N registriert wurde. Sobald die Vorkraft erreicht wurde, wurde diese für zehn Sekunden gehalten. Danach wurde die Probe mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min belastet, bis bei einem voreingestellten Pegel ein akustisches Signal detektiert oder die Abbruchbedingung erfüllt wurden. Ein Versuchsabbruch erfolgte, wenn ein Signal mit einem Pegel von ≥ 80 dB oder drei Signale mit einem Pegel von ≤ 60 dB detektiert wurden.

Nach dem Versuch wurde die geschädigte Oberfläche mit fluoreszierender Eindringfarbe behandelt. Die entstandenen Ringrisse können dann im Lichtmikroskop vermessen werden. Eine typische Schädigung durch den Kugelindenter ist in **Abbildung 9** dargestellt.

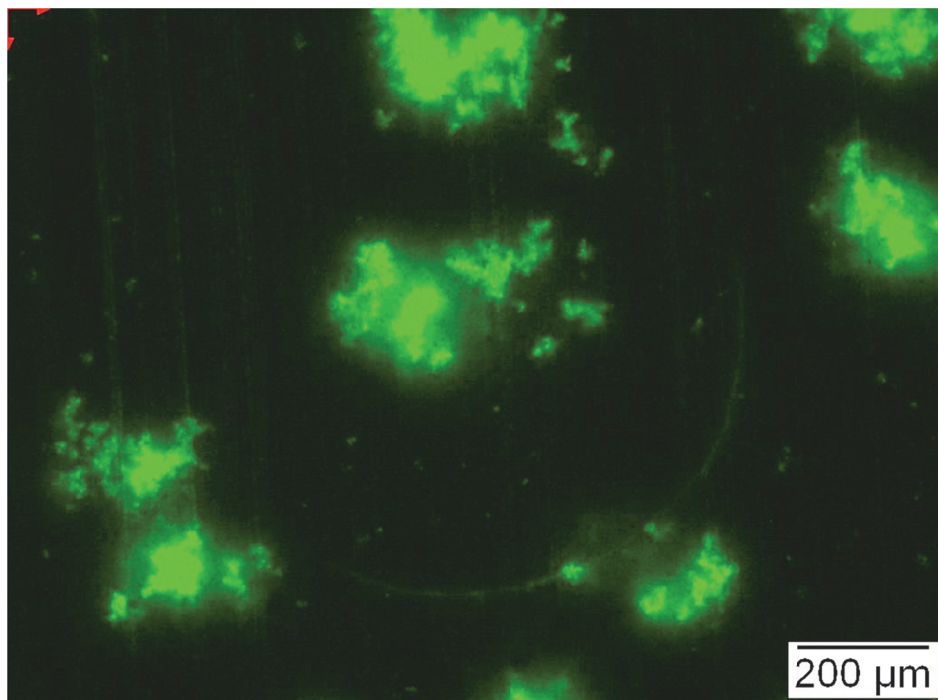


Abbildung 9: Unvollständiger Ringriss (Oberfläche D15, Kugeldurchmesser 5,556 mm, Kraft $P = 3765$ N). Die fluoreszierende Eindringfarbe markiert nicht nur den Riss sondern auch die "snowflakes".

Folgende Kontaktpaare wurden untersucht:

Tabelle 3: untersuchte Kontaktpaare Kugel – Platte und Untersuchungsziele

Kugel-Durchmesser	Platte	Untersuchungsziel
Ø 5,556 mm	D15	Bedingungen für Rissbildung, Oberflächenqualität
Ø 5,556 mm	D46	Bedingungen für Rissbildung, Oberflächenqualität
Ø 5,556 mm	D15 & Artikulationspapier 12µm ¹	Markierung möglich?
Ø 12,7 mm	D15	Bedingungen für Rissbildung

Bei den Versuchen mit Artikulationspapier wurde das Papier mit der Farbseite zur Platte zwischen Kugel und Platte gelegt.

Aus den Kräften, bei denen lt. akustischem Signal die Erstschädigung auftritt wurde mittels Gl. (1), (3) und (6) der Kontaktdruck bei der Erstschädigung, die Größe des Kontaktes und die maximale Zugspannung berechnet. Für jede Versuchsbedingung wurden 10 bis 20 Eindrücke gemacht.

Ergänzende Versuche zu Markierung des Kontaktpunktes wurden mit Lackstift, Permanentmarker und Farbe des Artikulationspapiers¹ durchgeführt.

¹ Artikulationspapier ist ein Produkt aus der Dentaltechnik. Es wird verwendet, um nach dem Anbringen von Zahnfüllungen die korrekte Form des Bisses zu überprüfen. Hier wurde das Produkt Okklusions Folie 12 µm und Articulating Paper 80 µm (Colténe/Whaledent, GmbH + Co. KG, D-89122 Langenau) verwendet.

3.3 Ermittlung der Form künstlicher Risse

Die Untersuchungen zum Risswachstum von Rissen unter Kontaktbelastung sollen an etwa halb-elliptischen Oberflächenrissen, die mithilfe von Knoop-Eindrücken in die FSNI-Platten eingebracht werden, durchgeführt werden. Da von diesen Rissen nur die Risslänge an der Oberfläche ($2c$) messbar ist, nicht aber die Tiefe der Risse (a), muss ihre Größe und Form in Vorversuchen bestimmt werden.

Eine relative einfache Methode, um einen scharfen Startriss an der Oberfläche des Werkstoffes zu reproduzieren, wird bei der SCF-Methode zur Bruchzähigkeitsmessung beschrieben [29]. Dabei wird mit einem Knoop Indenter ein Eindruck mit definierter Last in die Probe eingebracht. Der Knoopindenter erzeugt bei genügend hoher Last einen nahezu halb-elliptischen Riss. Unterhalb des Eindruckes bildet sich eine plastische Verformungszone aus. Nach Wegnahme der Last erzeugt der deformierte Bereich ein Restspannungsfeld um den Eindruck. Diese Restspannungen können durch Polieren oder Abschleifen der mindestens fünf bis sechs-fachen Eindringtiefe (z_0 in **Abbildung 10**) des Knoop-Indenters entfernt werden. In **Abbildung 10** ist schematisch ein Knoop Härteeindruck dargestellt [17].

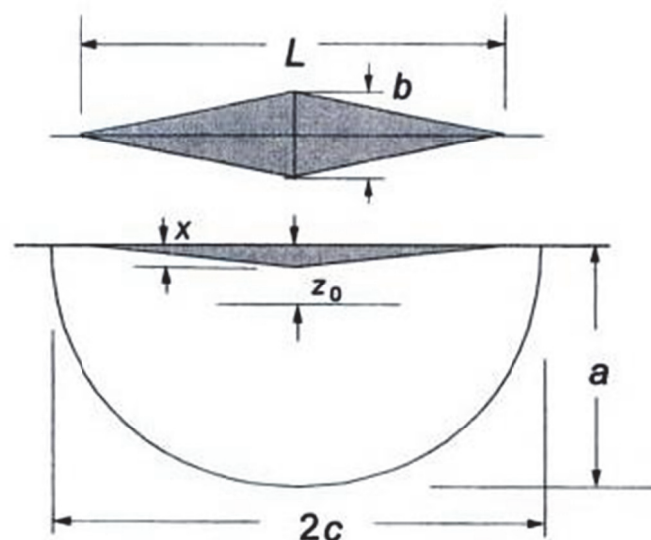


Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Knoop-Eindrucks und -Eindruckrisses mit den üblichen Bezeichnungen [17].

Der Knoop Härteeindruck besitzt einen Längskantenwinkel von 172° und einen Querkantenwinkel von 130° . Die Länge des Eindruckes ist L und die Breite b . Die Rissgeometrie hat in der **Abbildung 10** eine Härteeindrucktiefe x , sowie eine Tiefe des plastisch deformierten Bereichs z_0 .

Die Methode des Einbringens von Rissen mittels Knoopindenter bietet einerseits den Vorteil, dass nahezu jede beliebige Defektgröße in Abhängigkeit der Eindrucklast reproduzierbar und andererseits auch deren geometrischen Abmessungen auf der Oberfläche gut bestimmbar sind.

Die Form der Risse kann ermittelt werden, indem man sie auf der Zugseite von Biegeproben anbringt, diese Proben bricht und schließlich den Riss auf den Bruchflächen vermisst. Um das Ausmessen der Risse etwas zu vereinfachen, kann die zu prüfende Probe um ca. $3,5^\circ$ gekippt und der künstliche Riss eingebracht werden, wodurch im Lichtmikroskop der Riss aufgrund des schräg einfallenden Lichtes leichter zu identifizieren ist. Zusätzlich kann der Riss mit fluoreszierender Risseindringfarbe behandelt werden, welche im Lichtmikroskop unter UV-Licht deutlich sichtbar wird. Bei der Verwendung von fluoreszierender Risseindringfarbe muss allerdings geklärt werden, ob wirklich die Farbe bis zur Risspitze vordringen kann. Nach dem Bruch sollte nach Möglichkeit die Farbe nicht auf der Bruchfläche weiter diffundieren. Durch die mögliche weitere Diffusion von Farbe an der Bruchfläche würde eine zu große Risslänge bestimmt werden.

Für die Vorversuche standen insgesamt drei Probenserien zur Verfügung (Probenserien A, B und C). Bei den Proben A und C handelte es sich um normale Proben mit Standardlänge. Als Proben der Serie B wurden die jeweils etwa 23 mm langen Bruchstücke der Proben der Serie A bezeichnet. Alle drei Probenserien wurden vor der Biegeprüfung mit Knoop Härteeindrücken unterschiedlicher Last (5, 10, 15 und 20 kg) beaufschlagt, sodass sich jeweils immer eine unterschiedliche Startrissgröße ergab.

Um die Risse an der Probenoberfläche erkennen zu können wurden die Proben nach dem Eindruckversuch mit Fluoreszenzfarbe behandelt. In der Regel beträgt die Einwirkdauer des Fluoreszenzmittels ca. 15 Minuten. Danach kann die überschüssige Farbe problemlos mit klarem Wasser abgewaschen und nach Trocknung der Probe im Lichtmikroskop mit ultraviolettem Licht begutachtet werden.

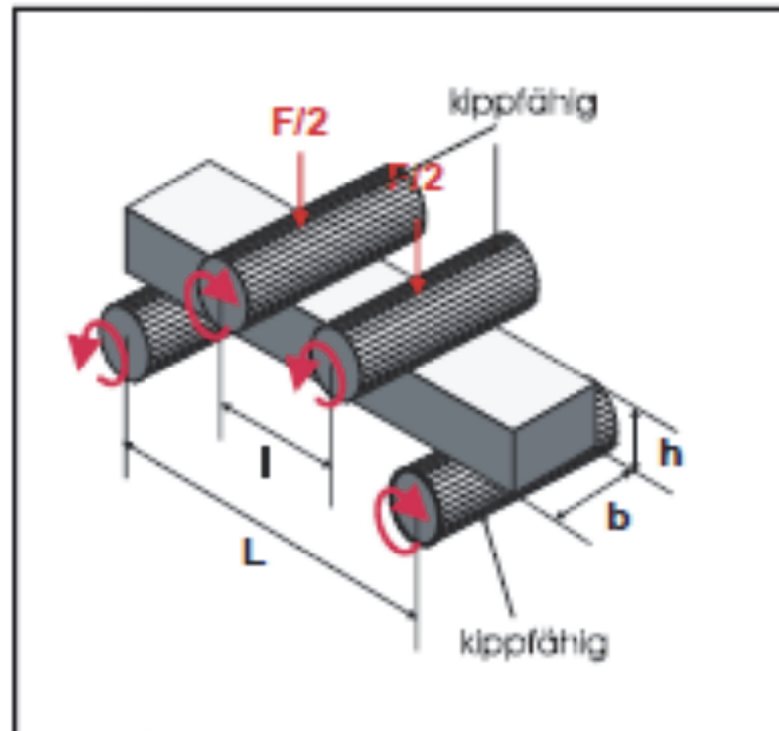


Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Biegeauflagers [30].

Nach der Ermittlung der Eindruckgröße und der Risslänge an der Oberfläche wurden die zu prüfenden Proben mit dem Startriss nach unten zeigend auf dem unteren Auflager mit einem Auflagerabstand von 40 mm (Serie B: 20 mm) mittig positioniert. In der Mitte wurde mit einem von oben wirkenden Prüfstempel mit zwei Druckpunkten, die einen Abstand von 20 mm (Serie B: 10 mm) besitzen, die Probe mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min auf einer Zwick 010 Universalprüfmaschine (Zwick, GmbH & Co. KG, D-89079 Ulm) bis zum Bruch belastet (**Abbildung 11 und Abbildung 12**). Für jede Probe wurde die Bruchkraft aufgezeichnet.

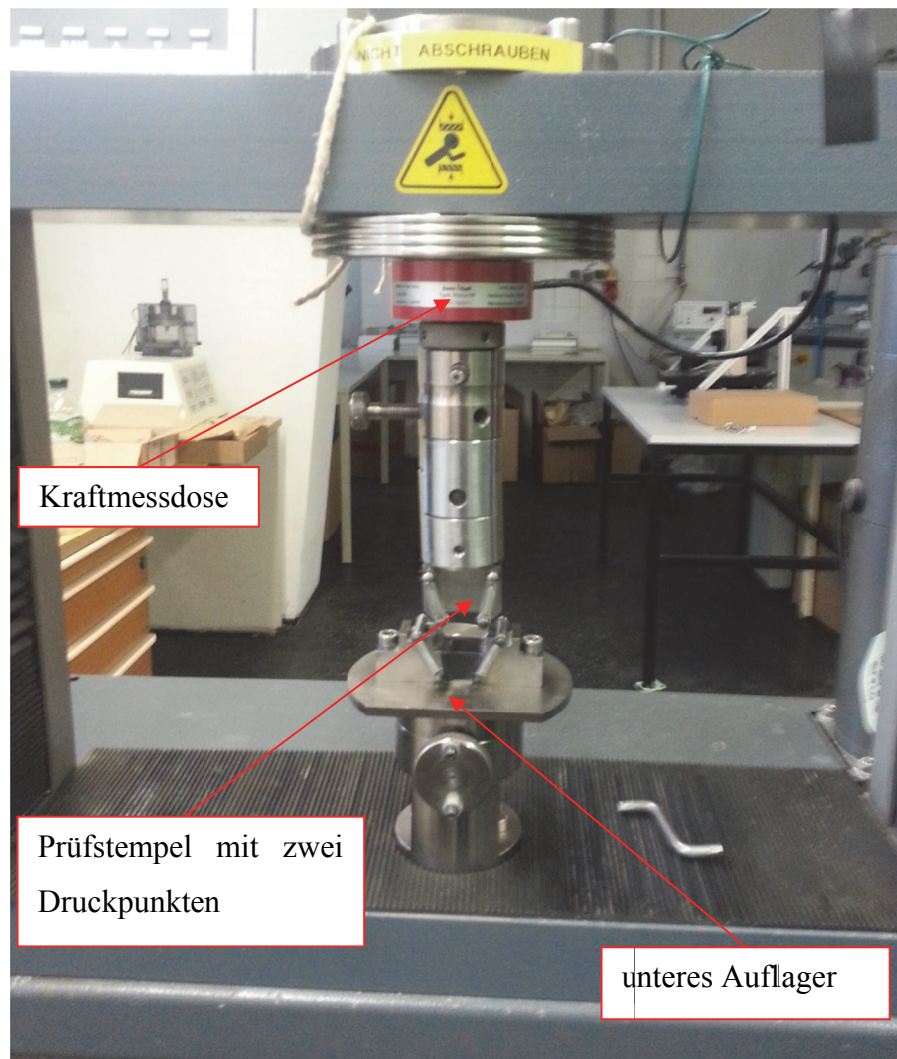


Abbildung 12: Schematische Darstellung des-Biegeprüfungsaufbaus.

3.4 Untersuchung von Rissen unter Kontaktbelastung

Die Untersuchungen von Rissen unter Kontaktbelastung sollten an zwei unterschiedlichen Risstypen durchgeführt werden. Die künstlich eingebrachten halb-elliptischen oder langen Oberflächenrisse sollten in einem festgelegten Abstand mit einer Kugel belastet werden. Eine Prinzipskizze der zwei Versuchsgeometrien ist in **Abbildung 13** zu sehen.

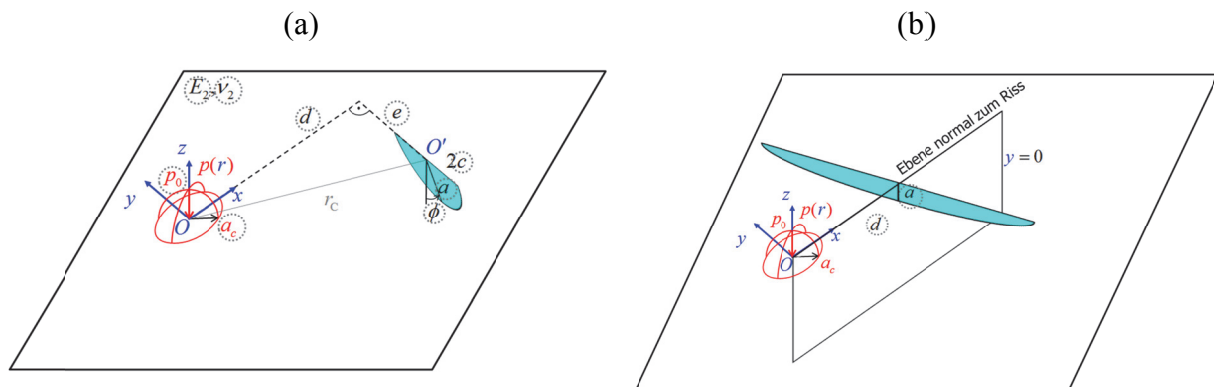


Abbildung 13: Prinzipskizzen zu den Kontaktbelastungsexperimenten. (a) ein halb-elliptischer Oberflächenriss (Länge $2c$, Tiefe a) wird im Abstand d mit einer Kugel belastet, die das Kontaktspannungsfeld $p(r)$ erzeugt. (b) ein langer Oberflächenriss mit der Tiefe a wird im Abstand d durch ein Kontaktspannungsfeld belastet.

Die Versuche wurden an einer Kantenprüfmaschine vom Typ ET 500 (Engineering Systems (Nottm), Ltd, UK-NG81NA Nottingham) (**Abbildung 14**) durchgeführt. In die ET 500 kann neben einem Rockwell-C-Diamant nahezu jeder beliebige Indenter eingesetzt werden und in festgelegten Abständen von der Kante entfernt in die Oberfläche der zu prüfenden Probe eingedrückt werden [31]. Außerdem kann der Indenter zur Seite geschwenkt werden und an seiner Stelle ein Mikroskop in den Prüfraum eingebracht werden, mit dessen Hilfe der spätere Eindruckpunkt sichtbar wird. Die Probe selbst wird auf einem X-Y-Tisch befestigt und kann somit genau positioniert werden. Die Detektion des ersten auftretenden Rissfortschritts erfolgte wie im Versuch 3.2 bereits beschrieben, mit dem akustischen Aufzeichnungsgerät „Vallen Acoustic Emission“ (**Abbildung 8**). Wie bereits erwähnt wurden dazu zwei Mikrophone möglichst nahe an der Probe am Auflagetisch neben und in der Nähe des Indenters angebracht. Das Kraftsignal der Kantenprüfmaschine wurde als zusätzliches Signal in den Vallen Acoustic Emission gespeist und lag somit synchronisiert mit den akustischen Signalen vor.

Für die Untersuchung der Si_3N_4 - Proben wurden selbst zwei Kugelaufnehmer für die beiden unterschiedlichen Si_3N_4 Kugeldurchmesser entwickelt, konstruiert und in der Werkstatt ge-

fertigt (**Abbildung 15**). Die Eindruckkugeln wurden am Kugelaufnehmer mit Fett über Adhäsionskräfte befestigt.



Abbildung 14: Kantenprüfmaschine ET 500 [31].

Für die Versuchsdurchführung wurden mehrere FSNI-GR-12-84 Proben mit Knoop Härteeindrücken mit einer Last von 20 kg versehen. Zusätzlich zu den Proben mit einzelnen HK 20-Rissen wurden Proben mit langen durchgehenden Rissen präpariert. Dazu wurden mehrere HK 20 Indents hintereinander eingebracht. Zur optimalen Größenbestimmung der künstlichen Defekte wurden die Proben wieder mit Fluoreszenzfarbe eingestrichen und im Anschluss daran mittels UV – Licht und Lichtmikroskop vermessen. Danach wurde die Dicke der Proben vermessen und die ganze Probe mit den Härteeindrücken um etwa ein Fünftel der Eindrucklänge L (**Abbildung 10**) abgeschliffen. Durch das Abschleifen werden die eventuellen Eigenspannungen aus der Probenoberfläche möglichst vollständig entfernt. Nach dem Abschleifen wurden die Probendicke und die Länge der Risse an der Oberfläche abermals vermessen.

Danach wurde die Probe in der Prüfmaschine positioniert. Auch dabei musste als Hilfestellung wieder mit UV-Licht gearbeitet werden, um die exakte Positionierung der Probe für den Versuch vornehmen zu können.

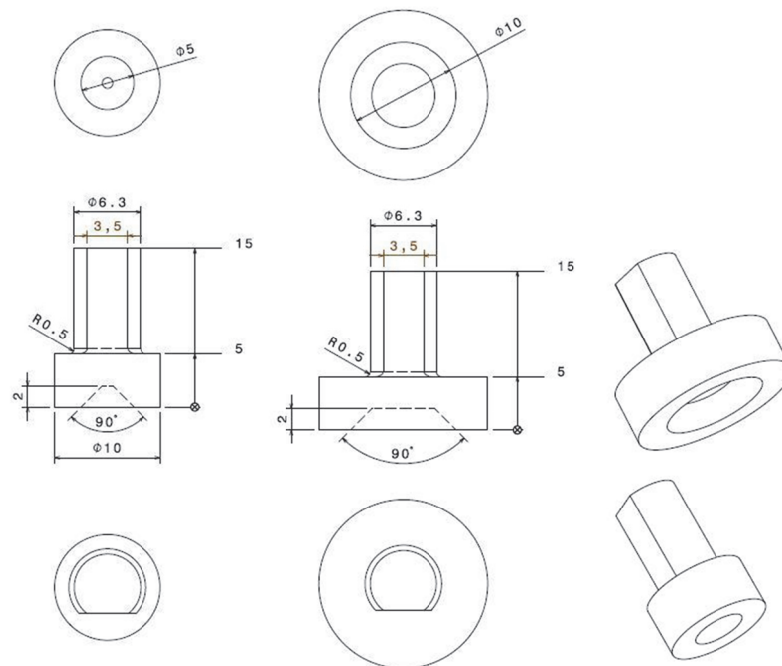


Abbildung 15: Konstruktionszeichnung der Kugelaufnehmer für die Kantenprüfmaschine ET500.

Wurde die Probe den Anforderungen entsprechend positioniert und die Software „Vallen AE Suite“ zur akustischen Aufzeichnung voreingestellt, so kann der Versuch gestartet werden. Es ist bei der ET 500 nicht möglich, eine definierte Abbruchbedingung ähnlich wie bei der Universalprüfmaschine MIDI einzustellen. Man muss daher auf die zurückgegebenen Signale und die aufgebrachte Last Acht geben, um den Versuch bei einem plötzlich unerwarteten rasanten Anstieg der erhaltenen akustischen Signale manuell anzuhalten um eine Zerstörung der Probe zu vermeiden. Jedenfalls wurden die Versuche nach den ersten akustischen Signalen weitergefahren, um eine eventuelle Rissverlängerung deutlicher ausfallen zu lassen.

Die Versuche wurden mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt.

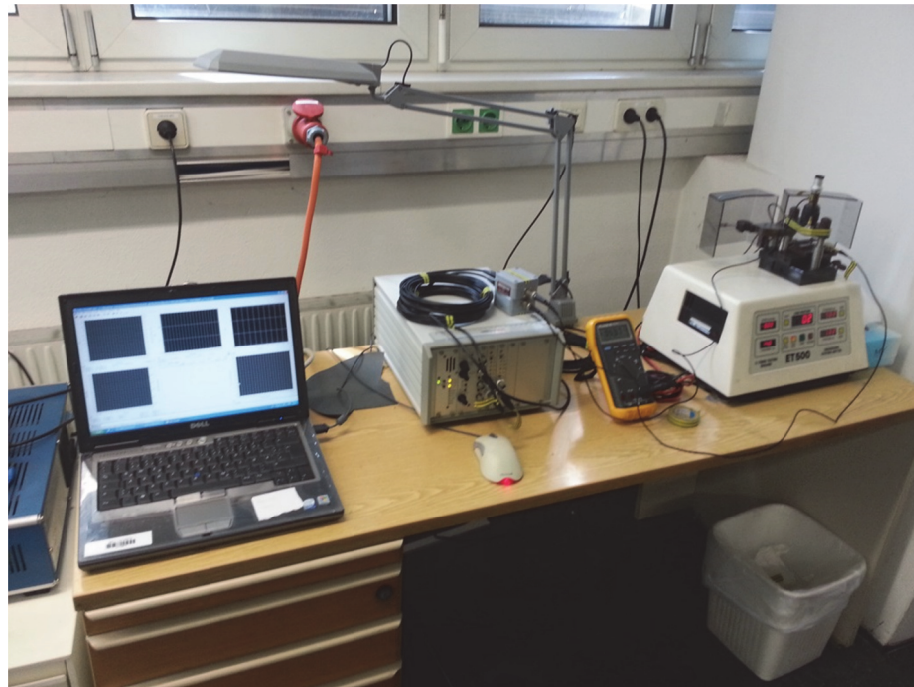
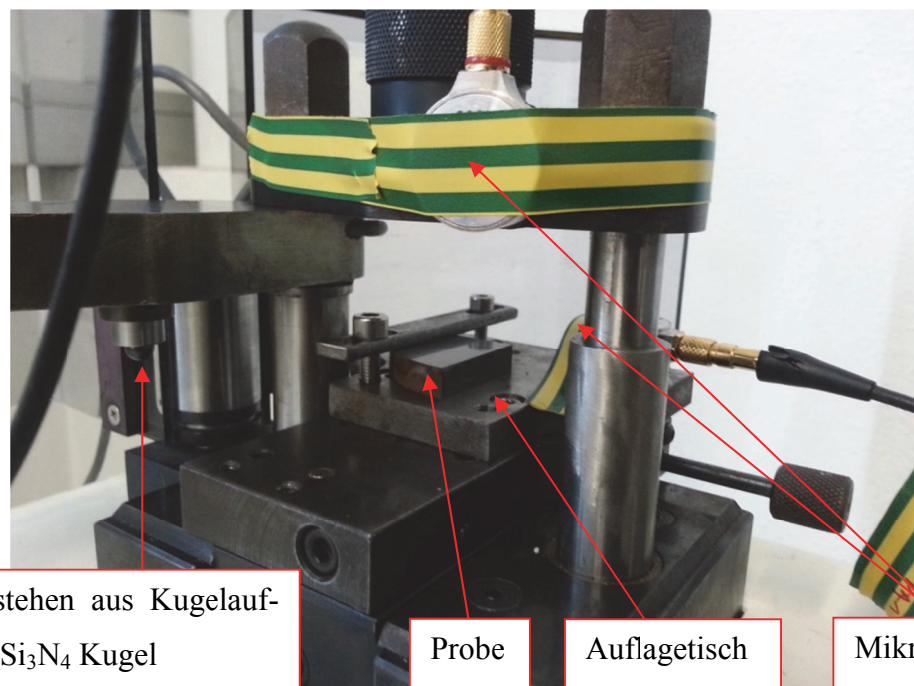


Abbildung 16: Kantenprüfmaschine ET 500 mit Vallen Acoustic Emission Gerät.



Indenter bestehen aus Kugelaufnehmer und Si_3N_4 Kugel

Probe

Auflagetisch

Mikrophone

Abbildung 17: Fertiger Versuchsaufbau an der Kantenprüfmaschine ET500.

Als Proben für diese Versuche wurden wieder geviertelte FSNI-Scheiben verwendet. Knoop-Eindruckrisse mit 20 kg Eindrucklast wurden in einem Raster auf den Oberflächen eingebracht und vermessen. Danach wurden die Eindruckrisse mit Fluoreszenzfarbe behandelt.

Aus den Vorversuchen (siehe 3.3) ist für jede Eindrucklast bekannt, wie viel Material abgeschliffen werden muss, damit restspannungsfreie Risse erzeugt werden können. Der Abschleifvorgang wurde in der Werkstatt des ISFK auf einer Pendelschleifmaschine mit der vorher festgelegten Schleifscheibe D 46 (siehe 4.1.2) durchgeführt. Die Abschleiftiefe wurde durch eine Dickenmessung vor und nach dem Abschleifen ermittelt. Danach wurden die Proben ein weiteres Mal mit Fluoreszenzfarbe behandelt und die Länge $2c$ der Risse erneut vermessen. Die Tiefe a wurde aus der bekannten Form der Risse (vergl. 4.2) und der Abschleiftiefe berechnet.

Danach wurde die Probe am Tisch des Kantenprüfers festgeklemmt und die Mitte eines Risses mithilfe des Mikroskops gesucht. Auch dafür war die Beleuchtung mit UV-Licht nötig. Ausgehend vom Mittelpunkt des Risses wurde der gewünschte Abstand d eingestellt und der Versuch wie vorne beschrieben durchgeführt.

Nach dem Versuch erfolgte eine erneute Untersuchung der Probe am Lichtmikroskop um einerseits den tatsächlichen Abstand der Kontaktbelastung vom Riss zu ermitteln und um eine eventuelle Verlängerung des Risses zu entdecken.

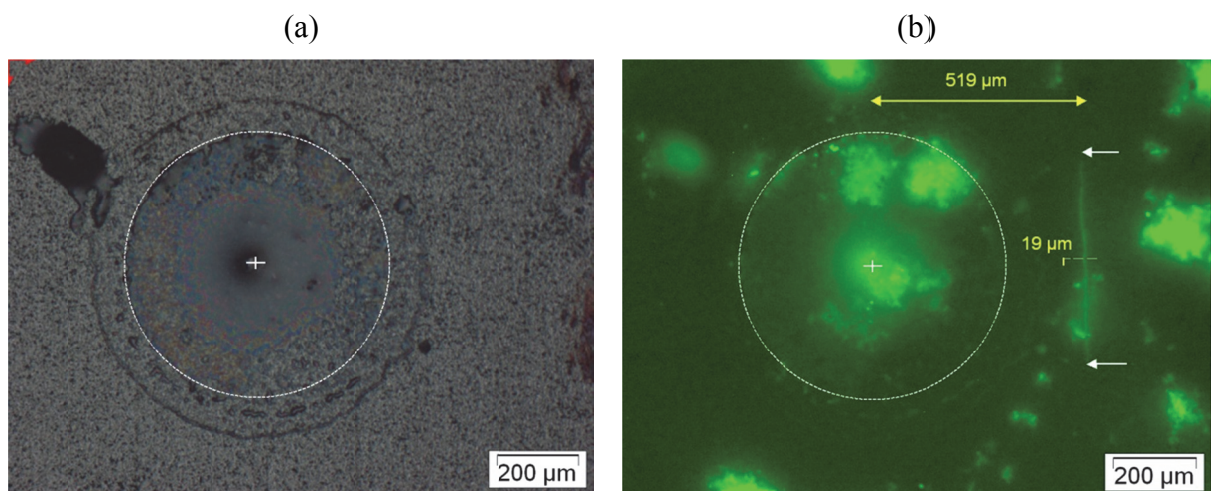


Abbildung 18: (a) Lichtmikroskopische Betrachtung des Kugelabdruckes, der Fettabdruck ist gekennzeichnet. Der eingezeichnete Kreis entspricht NICHT der Kontaktfläche, er ist deutlich größer, (b) Übereinanderlegen der Licht- und UV Aufnahme, die den identischen Bildausschnitt zeigen. Die Kennzeichnung aus dem linken Bild wird mithilfe der Bildanalyse-Software in das Bild übertragen.

Für die Vermessung des Abstandes war es nötig, zwei Bilder derselben Stelle der Proben aufzunehmen: eine Hellfeldaufnahme, auf der der Fettabdruck sichtbar ist und eine Aufnahme unter UV-Licht, auf der der Riss sichtbar ist. Am Hellfeldbild kann der Fettabdruck eingezeichnet werden. In weiterer Folge wird die Markierung mit Hilfe des Bildanalyseprogramms in das UV-Licht-Bild übertragen. Dieser Vorgang ist in **Abbildung 18** dargestellt.

In manchen Fällen war es möglich, durch Überlagern der zwei Bilder ein Komposit-Bild zu erzeugen, auf dem alle Informationen sichtbar sind, vergl. **Abbildung 19**.

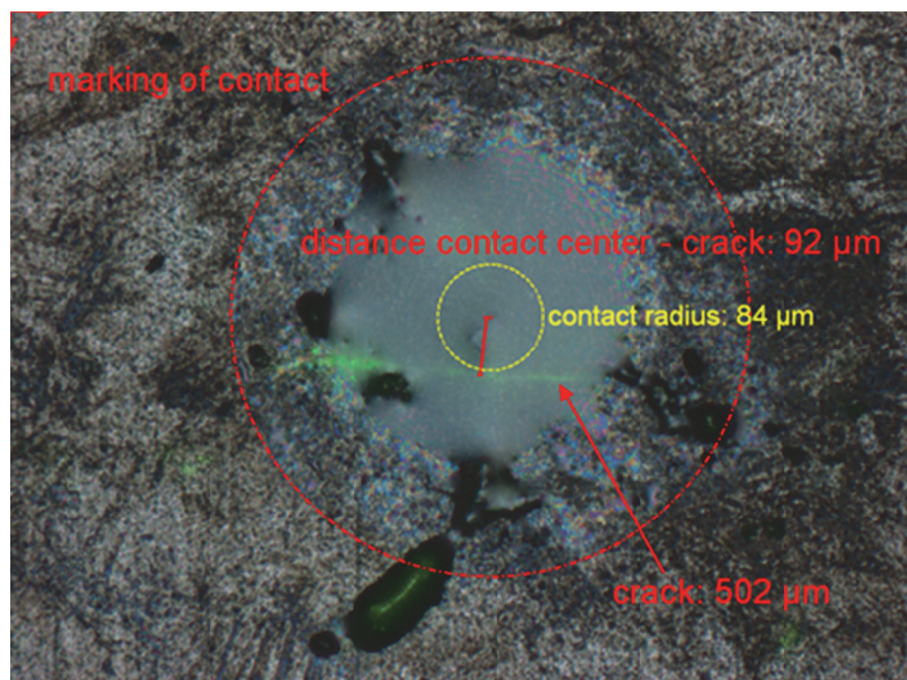


Abbildung 19: Vermessung der Lage des Kugeleindrucks relativ zum Riss auf einem Komposit-Bild.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Schädigung beim Kugel – Platte Kontakt

Um das Verhalten der Probe unter Kontaktbelastung näher zu untersuchen, wurden die einzelnen Druckversuche mit zwei unterschiedlichen Kugeldurchmessern durchgeführt. Verwendet wurde ein Kugeldurchmesser von 5,556 mm und 12,7 mm. Beide Kugeln bestehen aus Si_3N_4 mit einer polierten Oberfläche. Zusätzlich zu den beiden verschiedenen Kugeldurchmessern wurde der Einfluss von Artikulationspapier auf das Schädigungsverhalten des FSNI-GR-12-84 Materials getestet. Wie in den bereits erwähnten Gleichungen (1-4) ersichtlich ist, geht in die Berechnung die aufgebrachte Kontaktkraft P , sowie auch der Kugelradius R , die dabei auftretenden Zugspannung σ_{max} , der maximale Kontaktdruck p_{max} und der Kontaktradius a ein.

Die Versuchsergebnisse der Kontaktschädigungsexperimente sind in **Tabelle 4** zusammengefasst. Die detaillierten Versuchsbedingungen und Versuchsergebnisse der einzelnen Serien sind im **Anhang A2**. zu finden.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Messergebnisse aus den Kugel – Platte Versuchen. Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen.

Kontaktpaar	Kontaktkraft P [N]	berechneter Kontaktradius a [μm]	maximaler Kontaktdruck p_{max} [MPa]	maximale Zugspannung σ_{max} [MPa]
Ø 5,556 mm D 15	4194 ± 533	357 ± 67	12872 ± 2424	1977 ± 207
Ø 5,556 mm D 46	4051 ± 412	327 ± 13	13835 ± 474	2121 ± 72
Ø 5,556 mm D15 Art. Pap.	4029 ± 543	-	-	-
Ø 12,7 mm D15	8209 ± 1615	628 ± 46	10090 ± 741	1601 ± 118

4.1.1 Bedingungen für die Ringrissbildung

Wie Eingangs schon erwähnt, wurden Proben mit unterschiedlichen Oberflächenbearbeitungen verwendet. Beim Kugel-Platte-Versuch mit der D 46 Oberfläche wurde eine mittlere Schädigungskraft von 4051 N ermittelt. Der zugehörige mittlere Ringrissdurchmesser betrug 760 μm . Im direkten Vergleich dazu wurde bei der D 15 Platte eine Schädigungskraft von 4194 N und ein Ringdurchmesser von 768 μm festgestellt. Dieses Ergebnis könnte vermutlich mit den im Material vorhandenen Eigenspannungen zusammenhängen. Eine weitere Erklärung wäre, dass sich in der Probe mit der gröberen Oberfläche größere und auch mehrere Defekte befinden, die sich in Folge der Kontaktbelastung zu einem Ringriss ausbilden. Ringrisse entstehen generell nur aufgrund der auftretenden Zugspannungen beim Kugelkontakt. Statistisch gesehen macht es wenig Sinn, bei einer so geringen Probenanzahl eine Weibull-Auswertung vorzunehmen.

Natürlich dürfen auch die unterschiedlichen Kugeldurchmesser und damit das effektive Volumen nicht außer Acht gelassen werden. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass bei einem größeren Kugeldurchmesser auch eine höhere Kraft erforderlich ist, um den gleichen Kontaktdruck und die gleichen radialen Zugspannungen zu erzeugen. Eine diesbezügliche Tendenz wurde beobachtet (siehe **Tabelle 4**), aber ein direkter Vergleich der maximal auftretenden Zugspannungen für die jeweiligen Kugeldurchmesser lieferte ein überraschendes Ergebnis. So wurde festgestellt, dass die maximalen Zugspannungen im Moment der Ringrissbildung für den großen Kugeldurchmesser kleiner sind, als für den kleinen Kugeldurchmesser. Offensichtlich hängt dies mit dem effektiven Volumen des Kontaktspannungsfeldes zusammen. Es ist sozusagen ein Volumeneffekt im Sinn der Weibulltheorie [32].

4.1.2 Einfluss der Oberflächenqualität auf die Ringrissbildung

Die Versuchsdurchführung mit dem Kontaktpaar " \varnothing 5,556 mm auf Platte D 15" gestaltete sich relativ unproblematisch. Bei den im Anschluss erfolgten Untersuchungen im Stereomikroskop zeigte sich aber, dass die belastete Probe nach dem ersten akustischen Signal und Wegnahme der Belastung keinen vollständig, durchgehenden, sondern nur einen partialen Ringriss aufweist. In weiterer Folge wurde die Belastung erhöht und insgesamt zwei akustische Signale detektiert. Im Lichtmikroskop zeigte sich auch dann kein vollständig ausgeprägter Ringriss, jedoch war dieser um ein Stück weiter ausgeprägt als der erste. Erst bei noch höheren Belastungen und mehr als drei akustischen Signalen konnte ein vollständig ausge-

prägender Ringriss beobachtet werden. Weiters wurden teilweise ausgebildete partielle Ringrisse entdeckt (**Abbildung 20**).

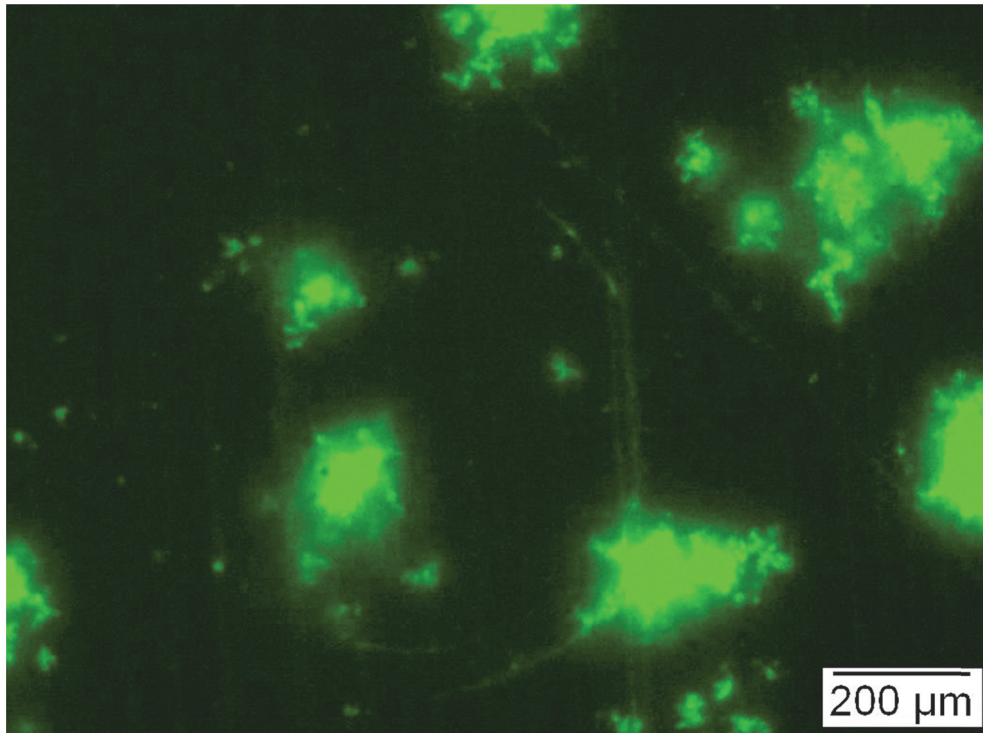


Abbildung 20: Vollständig und partial entstandene Ringrisse bei einer Belastung von 4010 N mit einem Kugeldurchmesser von 5,556 mm.

Die Ringrisse des Kontaktpaares "Ø 5,556 mm auf Platte D 46" waren viel deutlicher sichtbar und vor allem konnten eindeutig ein durchgehende Risse identifiziert werden. Im direkten Vergleich zur D 15 Platte muss festgehalten werden, dass bei diesen Versuchen die lichtmikroskopische Untersuchung und Vermessung der entstandenen Ringrisse wesentlich einfacher war. Eine Schädigung des Materials konnte bei niedrigeren Kräften als bei der D 15 Platte beobachtet werden. Begründet werden kann diese Erkenntnis damit, dass bei einer gröberen Oberfläche viel mehr Oberflächenfehler oder Defekte vorhanden sind, die zu einer Schädigung bei geringeren Kräften führen. Wie in **Abbildung 20** deutlich erkennbar ist, befinden sich hier in der Probe helle, leuchtende Punkte, auch „snowflakes“ genannt. Diese „snowflakes“ wurden in allen untersuchten Proben gefunden. Ein eindeutiger Zusammenhang mit der Bildung und Ausbildung der Ringrisse konnte nicht beobachtet werden.

Zusammenfassend kann für die Proben mit der Oberflächenqualität D 46 gesagt werden, dass die nach akustischer Detektion entstandenen Ringrisse am häufigsten durchgehende Ringrisse waren. Auch im Lichtmikroskop waren diese leicht auffindbar und vermessbar. Die Versuche zeigten das gleichmäßigste Schädigungsverhalten.

4.1.3 Möglichkeiten zur Markierung der Kontaktposition

Zusätzlich zu den normalen Kugel-Platte Versuchen wurden Versuche mit Artikulationspapier durchgeführt. Der Versuchsablauf erfolgte ebenfalls analog wie die bereits vorangegangenen Versuche.

Im Gegensatz zu dem Versuch ohne Artikulationspapier ist zu erkennen, dass der arithmetische Mittelwert der erhaltenen Kraft um ca. 3% von den Kräften abweicht, die ohne Artikulationspapier auf der gleichen Oberflächenqualität nötig waren. Bei diesen Versuchen war auffällig, dass bei einzelnen Versuchen erst bei sehr hohen Kräften akustische Signale detektiert wurden, während andere Versuchspunkte gar kein akustisches Signal lieferten. Bei den Versuchen, bei denen eine Schädigung akustisch detektiert werden konnte, zeigten sich an der Oberfläche der Probe oft mehrere vollständige oder unvollständige Ringrisse. Anders als bei den Versuchen ohne Artikulationspapier waren diese Risse aber nicht konzentrisch, wie in **Abbildung 21** sichtbar ist.

Es besteht der Verdacht, dass das Artikulationspapier als mögliches Dämpfungselement zwischen Kugel und Platte wirkt, und somit zu einer geänderten Druckverteilung führt. Weiters scheint es durch das zwischengelegte Papier zu einer Relativbewegung zwischen Platte und Kugel während des Versuchs zu kommen. Eine kompakte Darstellung der gemessenen Werte ist aufgrund der großen Schwankungsbreite nicht möglich.

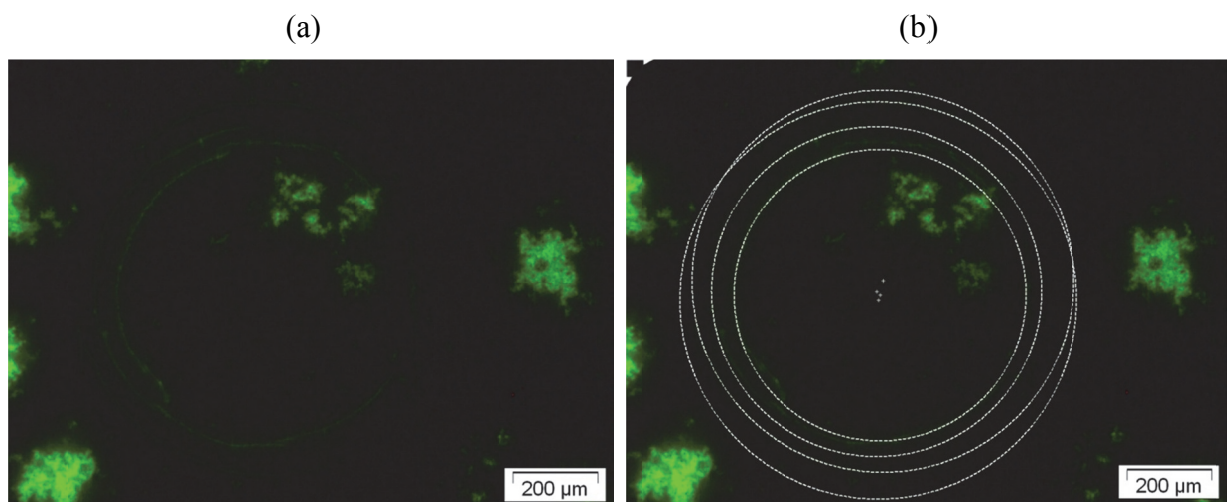


Abbildung 21: (a) Nicht konzentrische partielle Ringrisse, (b) Verdeutlichung der nicht konzentrischen Ringrisse

Die Ergebnisse dieser Versuche legen nahe, dass eine Markierung der Kontaktposition mithilfe von Artikulationspapier nicht möglich ist, ohne die Kontaktbedingung entscheidend zu

verändern. Von einer Verwendung von Artikulationspapier wird daher für alle weiteren Versuche abgesehen.

Weitere unsystematische Versuche zur Markierung der Kontaktstelle wurden durchgeführt, indem die Kugel vor dem Kontaktversuch mit verschiedenen Farben bestrichen wurde. Erhofft wurde, dass sich die Farbe (Edding Permanentmarker, Lackstift) während des Versuches auf die Probe überträgt, ohne den Versuchsablauf zu beeinflussen. In keinem dieser Fälle wurde der erhoffte Effekt erzielt. Die Farbe blieb nicht auf der Probe haften.

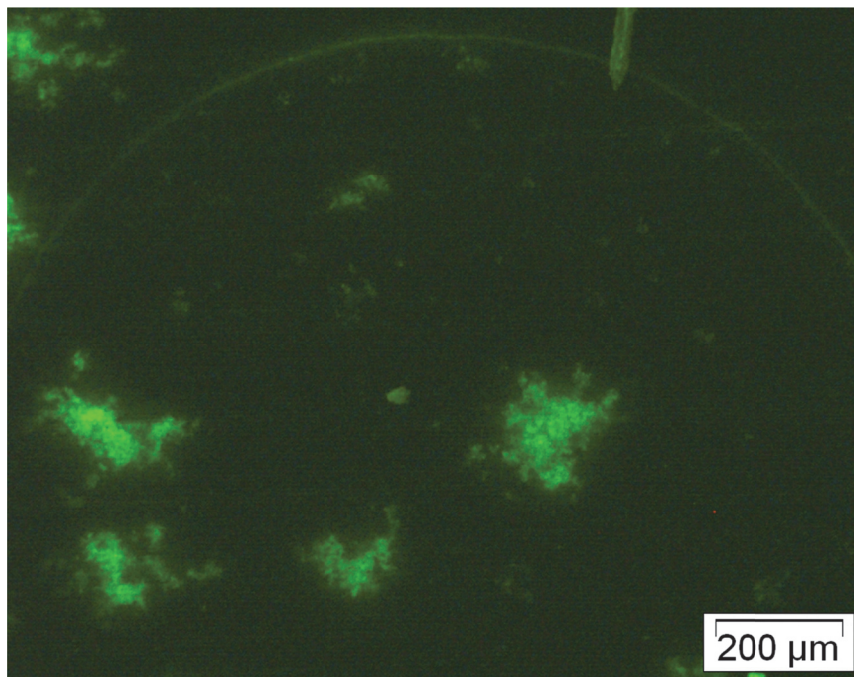


Abbildung 22: Ein vollständiger Ringriss, entstanden bei einer Belastung von 8951 N mit einem Kugeldurchmesser von 12,7 mm. Im Okular des Lichtmikroskopes war der gesamte Riss sichtbar.

Erst beim Betrachten einer Probe, die nach dem Kontaktversuch nicht gereinigt wurde, zeigte sich, dass der dünne Fettfilm, der sich durch das Anbringen der Kugel im Kugelhalter unweigerlich auf der Kugel befindet, einen Abdruck auf den Proben hinterlässt. Da dieser Film extrem dünn ist und Reibung im Kontakt in den untersuchten Kontaktpaaren aufgrund der fast identischen elastischen Eigenschaften keine Rolle spielt, wird davon ausgegangen, dass er die Versuche nicht beeinflusst. Durch geeignete mikroskopische Techniken kann mithilfe dieses Abdruckes die Position der Kugel dokumentiert werden, auch wenn sich keine Ringrisse bilden.

4.1.4 Oberflächenqualität und Geräteeinstellungen für weitere Versuche

Die Oberflächenqualität D 46 wird als Basis für die nachfolgenden Versuche festgelegt. Bei dieser Oberflächenqualität konnten am eindeutigsten der Zusammenhang zwischen Ringrissentstehung und akustischem Signal festgestellt werden. Diese Oberflächenqualität kann in der Werkstatt des ISFK in gleichbleibender Art hergestellt werden.

Da durch die Bearbeitung der Proben Schleifeigenspannungen erzeugt werden, ist es wichtig, für alle folgenden Versuche dieselbe Bearbeitung vorzunehmen.

Die Schwellwerte für die akustische Rissdetektion werden, so wie sie sich in den Versuchen zur Ringrissdetektion bewährt haben (siehe **Anhang A1**) für die weiteren Versuche übernommen.

4.2 Größe und Form von Knoop-Eindruckrissen

Wie in Kapitel 3.3 schon kurz betont, wurden die Bruchflächen der Proben nach den Bruchversuchen sowohl einer UV - lichtmikroskopischen als auch einer stereomikroskopischen Untersuchung unterzogen. Im Allgemeinen kann aber festgehalten werden, dass die Messmethode mit Fluoreszenzfarbe und UV - Licht gut funktioniert hat. Eine vermessene Probe ist in **Abbildung 23** dargestellt. Der Eindruckriss und die helle, "plastisch" verformte Zone sind gut erkennbar. Eingetragen sind weiters die Abmessungen des Risses. Die strichlierte Linie gibt an, bis zu welcher Tiefe dieser Riss abgeschliffen werden müsste, um die Restspannungen zu entfernen.

Die Schwierigkeit der UV - lichtmikroskopischen Untersuchung bestand darin, die Rissgröße genau zu identifizieren. Es ist nicht auszuschließen, dass die aufgebrauchte Fluoreszenzfarbe sich entweder während des Bruchversuches im wachsenden Riss oder möglicherweise nach dem Bruch auf der Bruchfläche ausbreitet und damit ein zu großer Riss vermessen wird.

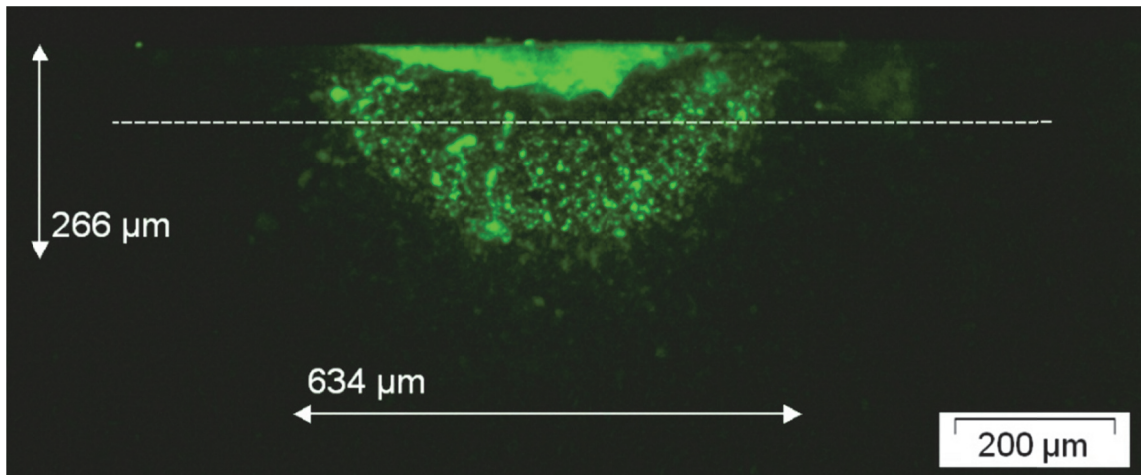


Abbildung 23: Bruchfläche einer Probe mit HK 20-Eindruckriss im UV-Licht.

Um auszuschließen, dass zu große Risse vermessen wurden, wurde für alle Proben die Bruchzähigkeit aus der Rissgröße und der Bruchspannung nach der Vorschrift für die SCF-Methode zur Bruchzähigkeitsmessung [29] berechnet. Wenn die Fluoreszenzfarbe während des Versuches im wachsenden Riss weitergewandert ist, wird auf diese Weise ein Bruchzähigkeitswert bestimmt, der nahe am "echten Wert" des Materials liegt. Wird jedoch die korrekte Rissgröße des Risses unmittelbar nach dem Eindruck vermessen, ergibt die Berechnung einen zu niedrigen Wert.

Diese Auswertung lieferte für die Probenserie (A) einen Bruchzähigkeitswert im Bereich zwischen $5,40 - 6,00 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Dieser Wert stimmt mit dem mittels SEVNB-Methode [33] in erzielten Bruchzähigkeitswert von $5,62 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ überein. Daraus kann geschlossen werden, dass auf den Proben dieser Prüfserie zu große Risse vermessen wurden. Alle Messwerte dieser Serie (A) wurden daraufhin verworfen. Für die Proben der anderen Serien wurden durchwegs Werte unter $5,00 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ermittelt, was darauf hindeutet, dass korrekte Eindruckrisslängen vermessen wurden.

Als Vergleich zu den Messungen mithilfe der FZ-Eindringfarbe wurden die Risse auch im Stereomikroskop vermessen. Bei der im Stereomikroskop durchgeführten Untersuchung (**Abbildung 24**) konnte man teilweise gut die durch den Härteeindruck entstandene plastische Zone sowie den entstandenen Riss durch Variation der beiden Beleuchtungslampen erkennen. Allerdings war nicht bei allen gebrochenen Proben der Bruchspiegel gut erkennbar. Man benötigte für diese Untersuchung viel Zeit und vor allem eine erfahrene Person an seiner Seite.

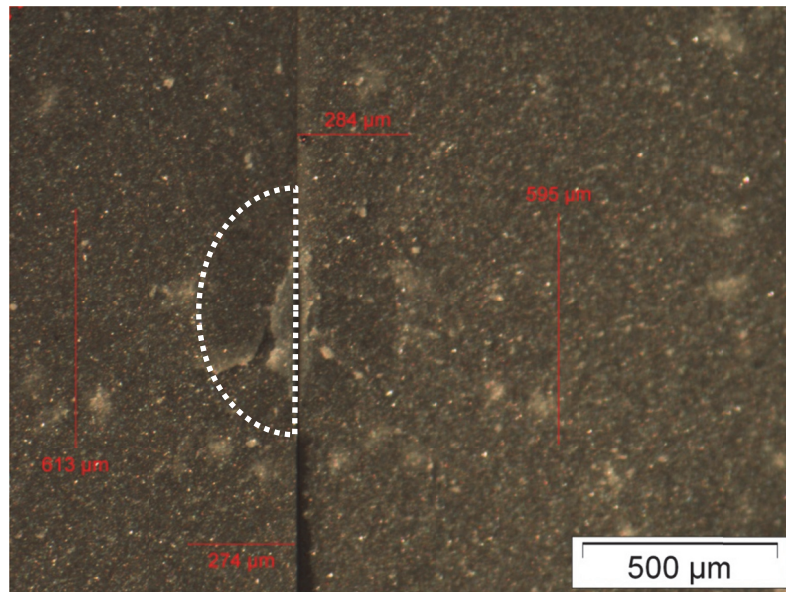


Abbildung 24: Vermessen der Risstiefe und Risslänge von Knoop-Eindruckkrisen im Stereomikroskop.

Generell zeigten die Ergebnisse für die Risslängenmessungen mit beiden Methoden eine gute Korrelation, wie in **Abbildung 25** zu erkennen ist.

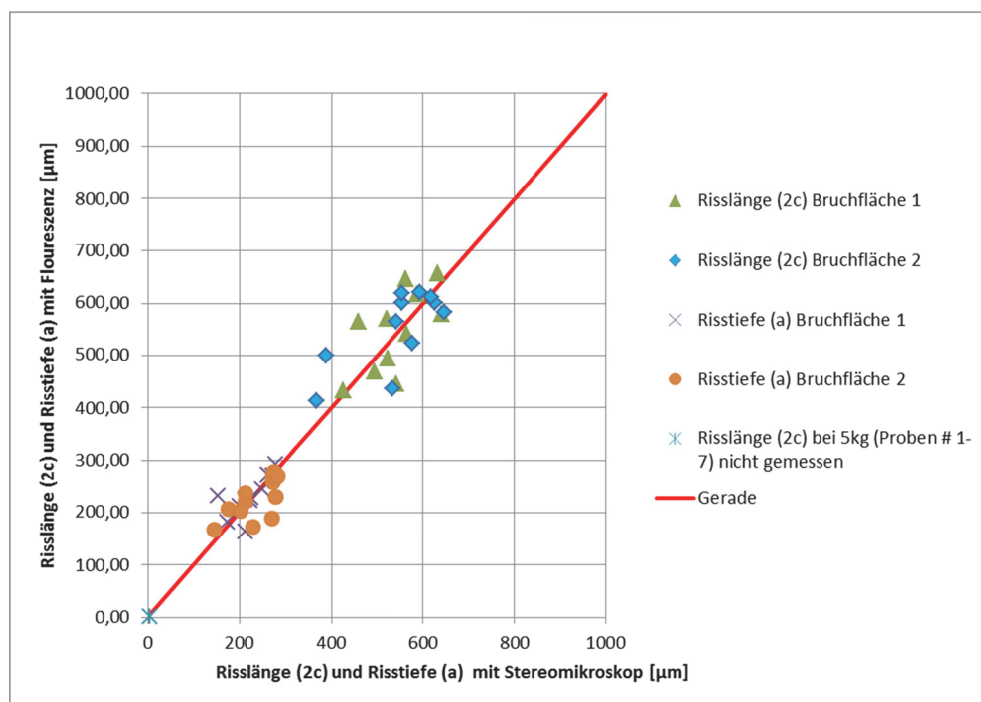


Abbildung 25: Gegenüberstellung der beiden Rissvermessungsmethoden.

Nach der Auswertung und dem Vergleich der ersten beiden Probenreihen ist in Hinblick auf die Eindrucklast von 5 kg eine sehr große Streuung (**Abbildung 26**) festzustellen. In den Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass sowohl die Knoophärte und auch die Risstiefen eine große Variation zeigen. Vermutlich kommt es auch in diesem Fall zu einer Wechselwirkung

der künstlichen Risse mit den "snowflakes", die im Material vorhanden sind. Aufgrund der Streuung werden die Versuche mit den 5 kg Eindrücken in weiterer Folge nicht mehr berücksichtigt.

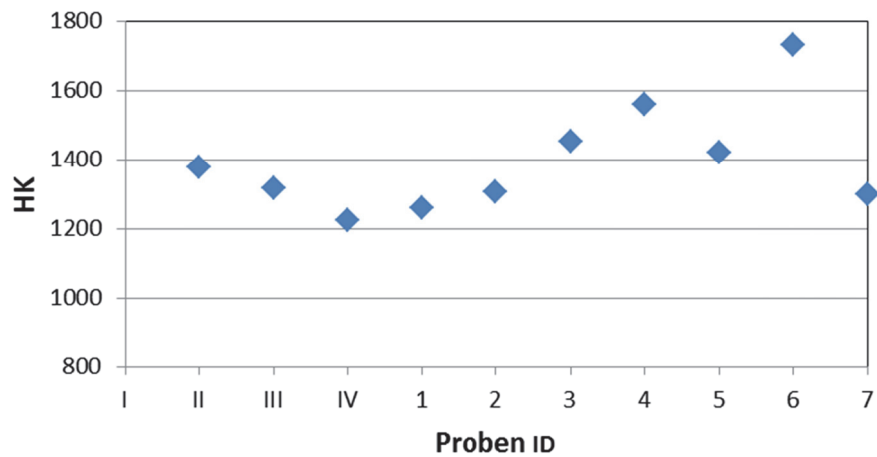


Abbildung 26: Vergleich der HK5-Werte für die ersten beiden Probenserien.

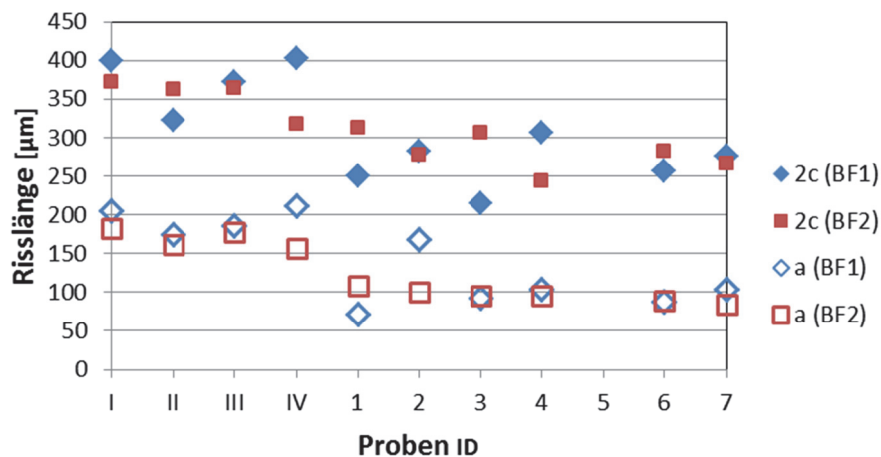


Abbildung 27: Vergleich der Messwerte für die Risstiefe a und Risslänge $2c$ von HK5-Eindruckrissen, gemessen mit Fluoreszenzfarbe, für die ersten beiden Probenserien.

Die erzielbaren Eindruckrissgrößen für verschieden Lasten sind in **Tabelle 5** zusammengefasst und in **Abbildung 28 bis Abbildung 30** in Abhängigkeit der Eindrucklast dargestellt.

In der **Tabelle 5** wird aufgrund der guten Übereinstimmung der Messungen beider Methoden jeweils ein Mittelwert angegeben.

Tabelle 5: Risslänge $2c$, Risttiefe a und Formfaktor a/c für unabgeschliffene Knoop-Eindruckrisse.

	Eindrucklast		
	10 kg	15 kg	20 kg
$2c$ [μm]	476	560	624
a [μm]	183	221	263
a/c [-]	0,76	0,79	0,84

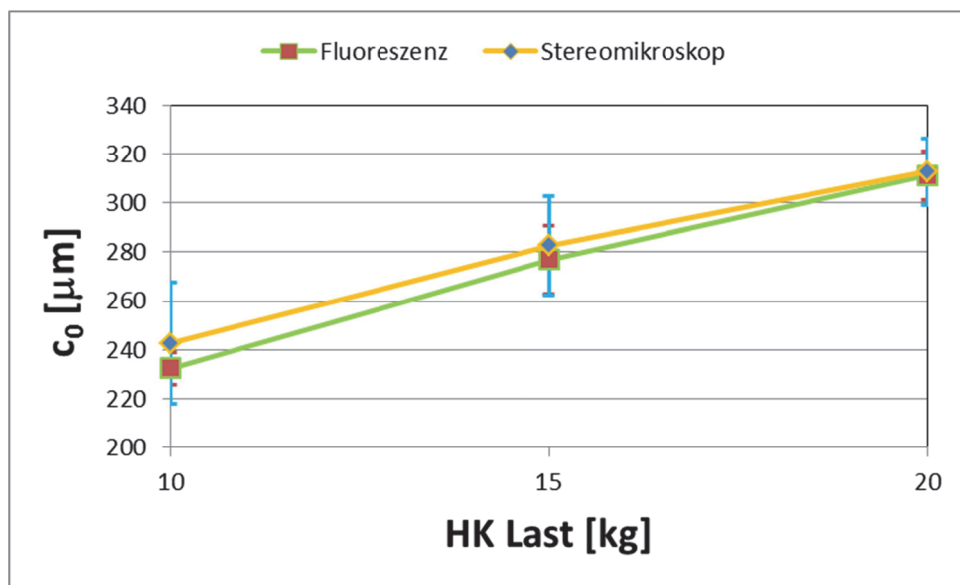


Abbildung 28: Länge der unabgeschliffenen Knoop-Eindruckrisse c_0 an der Probenoberfläche in Abhängigkeit von der verwendeten Eindrucklast. Es sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Messmethoden dargestellt

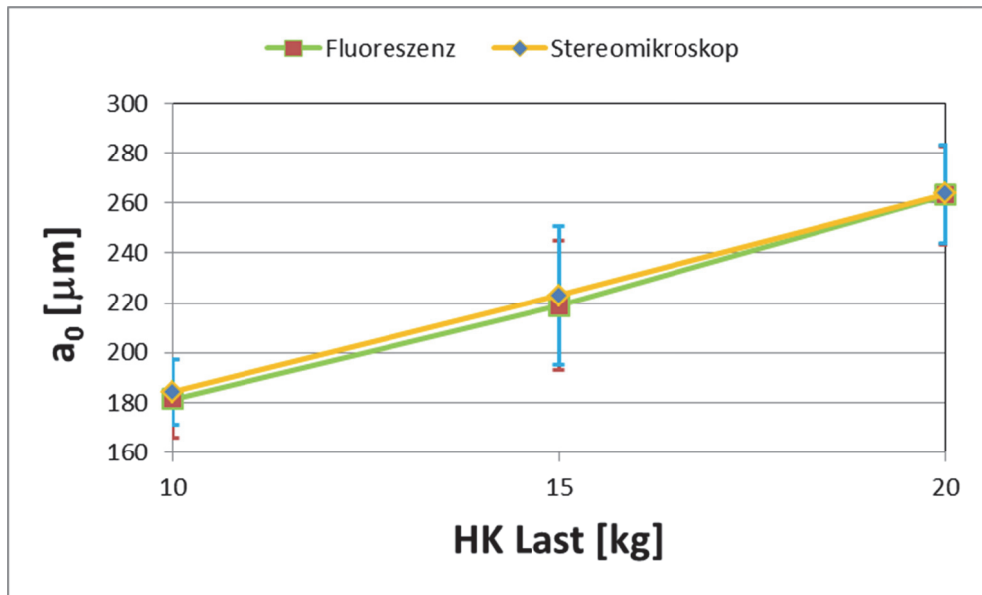


Abbildung 29: Tiefe der unabgeschliffenen Knoop-Eindruckrisse a_0 in Abhängigkeit von der verwendeten Eindrucklast. Es sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Messmethoden dargestellt.

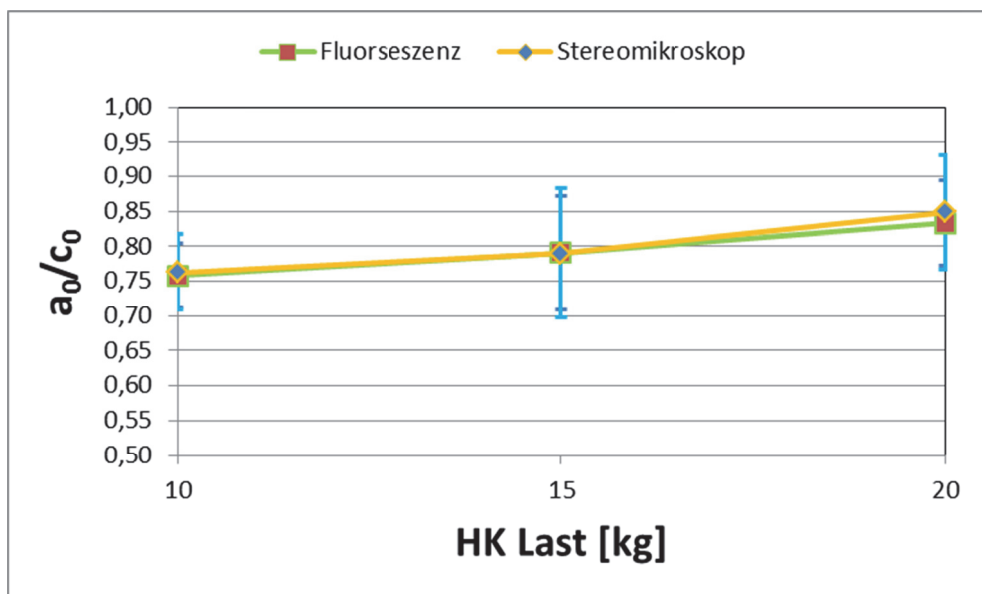


Abbildung 30: Form der unabgeschliffenen Knoop-Eindruckrisse a_0/c_0 in Abhängigkeit von der verwendeten Eindrucklast. Es sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Messmethoden dargestellt.

4.3 Risswachstum unter Kontaktbelastung

4.3.1 Untersuchung von halb-elliptischen Oberflächenrissen

Vor den Versuchen wurde für jeden Riss anhand von **Tabelle 1** die gefährlichsten Abstände und die dafür nötigen Kräfte ermittelt. Dabei zeigt sich, dass mit der vorhandenen Ausrüstung nur zwei mögliche Bedingungen realisierbar sind: Geometrien lt. Spalte $r = c$ mithilfe der Kugel mit Durchmesser 5,556 mm und Geometrien lt. Spalte $r = 2c$ mithilfe der Kugel mit Durchmesser 12,7 mm. In weiterer Folge wurden Versuche mit der Kugel $\varnothing 5,556$ mm durchgeführt. Einige Risse wurden recht genau in diesem Abstand belastet, andere in deutlich größeren.

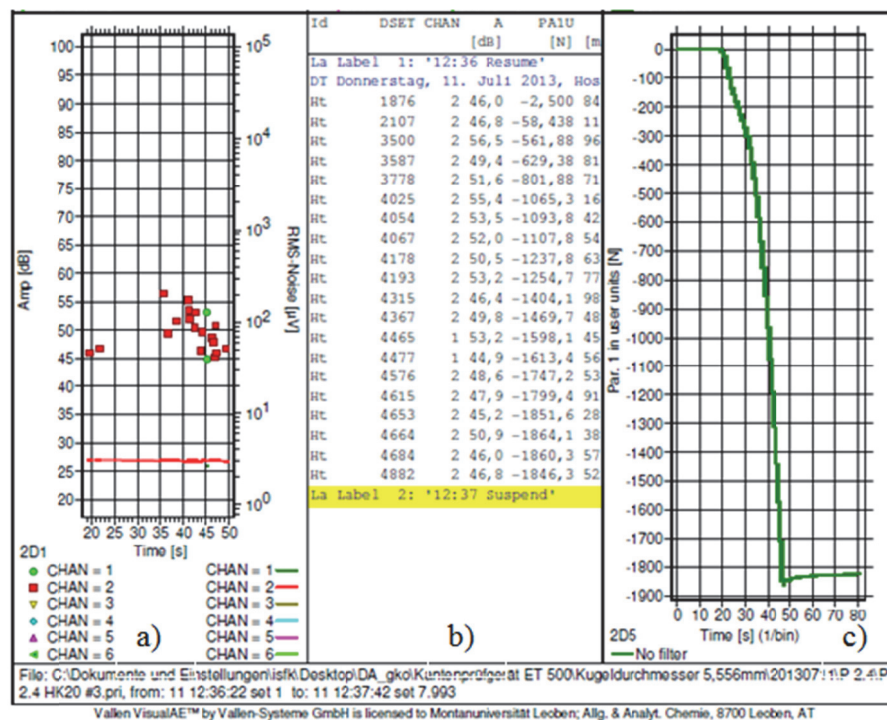


Abbildung 31: Versuchsprotokoll des Kantendruckversuches gekoppelt mit Acoustic Emission

Die Vorgangsweise bei der Auswertung der Kontaktbelastungsversuche an halb-elliptischen Oberflächenrissen soll nun anhand eines einzelnen Versuches erläutert werden. Ein typisches Versuchsprotokoll, wie es die Software des "Vallen Acoustic Emission" Gerätes liefert, ist in **Abbildung 31** gezeigt. Da in diesem Versuchsprotokoll viele Werte, Punkte, Linien, Balken und Symbole vorkommen werden die relevanten Versuchsdaten mit den Buchstaben a) – bis c) bezeichnet. In a) ist ein Amplituden – Zeit – Diagramm dargestellt. Die darin befindlichen roten und grünen Kästchen zeigen jeweils ein akustisch detektiertes Signal von einem

der beiden Mikrophone an. Im mittleren Fenster b) des Protokolls ist zu jedem roten und grünen Kästchen die zugehörige Amplitude in Dezibel und die Kraft aufgezeichnet. Fenster c) zeigt systematisch den ansteigenden Kraftverlauf bei fortschreitender Versuchsdurchführung. Aufgrund der Einstellungen der Acoustic Emission wird die Kraft als negativer Wert angezeigt.

Man hat bereits bei sehr geringen Kräften (i. e. 58 N) und einer Amplitude von 46,8 dB, akustische Signale detektiert. Die weiteren Signale folgten bei Kräften zwischen 561 N und 1846 N. Bei 1846 N wurde der Versuch abgebrochen. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass bei einer Kraft von 58 N Risswachstum durch einen Kugelkontakt auftritt. Es wird vermutet, dass sich bei der ersten Berührung der Kugel auf der Platte die Kugel entsprechend ausgerichtet hat, da diese ja nur über die Adhäsionskräfte am Indenter befestigt ist und dies der Grund für diese akustischen Signale war. Um trotzdem eine Schädigung ausschließen zu können, wurde die Probe nach Abbruch des Versuches im Lichtmikroskop untersucht.

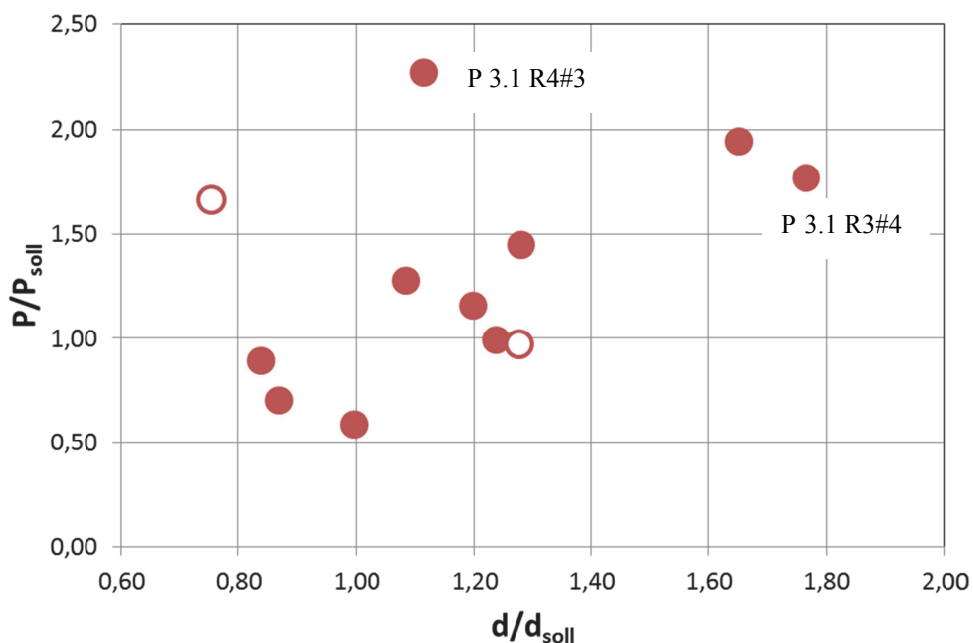


Abbildung 32: Durchgeführte Experimente: gemessene Kraft für erste akustische Signale in Abhängigkeit vom Abstand. Die Werte sind jeweils bezogen auf die gefährlichste Bedingung.

Bei dieser Untersuchung wurde keine Veränderung gegenüber dem Ausgangszustand festgestellt. Somit kann eine Schädigung bei so einer geringen Kraft nahezu ausgeschlossen werden. Die weiteren Versuche an dieser Probe lieferten akustische Signale bei Kräften von

551 N bis 1860 N. Es erscheint als eher realistisch, dass Risswachstums-Vorgänge im Material bei höheren Kräften bis etwa 1860 N stattgefunden haben müssen. Die im Nachhinein erfolgte mikroskopische Betrachtung bestätigte diese Annahme. Insgesamt konnte festgestellt werden, dass der belastete Riss um einige Mikrometer gewachsen ist.

Abbildung 32 zeigt, bei welchen Abständen d – relativ zu den gefährlichsten Abständen d_{soll} - Versuche durchgeführt wurden und welche Kräfte P dabei relativ zu den dafür nötigen P_{soll} bei den ersten akustischen Signalen auftraten.

In den beiden Versuchen, die durch offene Symbole gekennzeichnet sind, wurden die Risse extrem exzentrisch belastet. Vermutlich gelten für diese Risse die angenommenen Bedingungen nicht mehr.

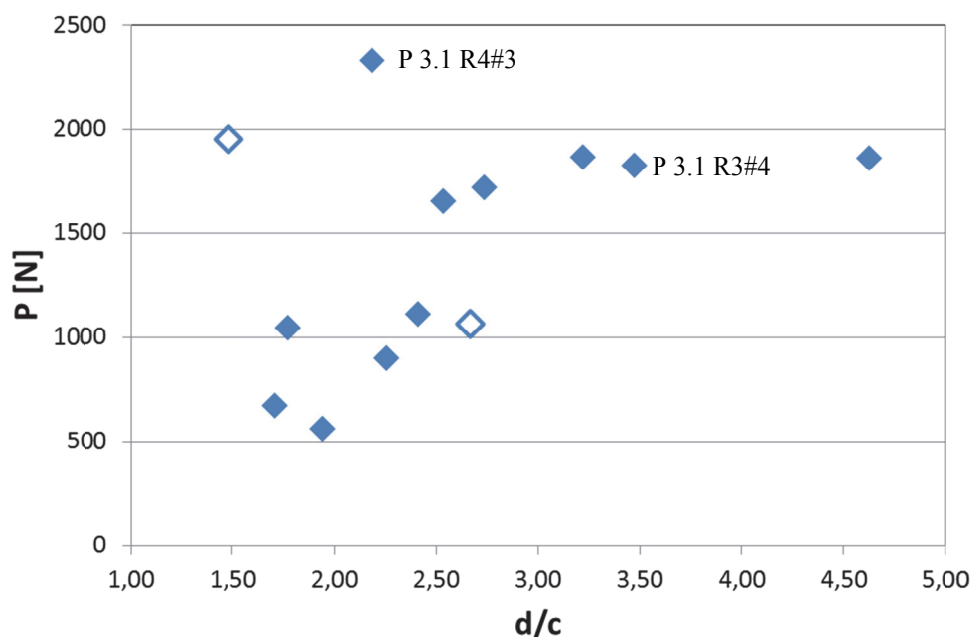


Abbildung 33: Kraft für akustisch detektiertes Risswachstum in Abhängigkeit vom Abstand der Kontaktbelastung vom Riss.

In **Abbildung 33** werden die Kräfte für akustisch detektiertes Risswachstum in Abhängigkeit vom Abstand der Kontaktbelastung vom Riss für die durchgeführten Versuche dargestellt. Es ist generell zu erkennen, dass mit steigenden Abständen d höhere Kräfte P für ein Risswachstum erforderlich sind. Dieser Trend setzt sich nur bis zu einem gewissen Abstand fort. Danach erkennt man einen flacheren Kurvenverlauf. Dies deutet auf eine mögliche Sättigung hin.

Einige Experimente weichen deutlich von dieser Tendenz ab. Die beiden Versuche, die extrem exzentrisch belastet wurden, sind wieder durch offene Symbole gekennzeichnet. Beim Riss R#3 der Probe P3.1. konnte man im Lichtmikroskop unter UV-Licht ein Risswachstum von $20\ \mu\text{m}$ feststellen, das allerdings erst bei einer Kraft von $1500\ \text{N}$ über der berechneten stattfand. Dieser Riss ist eher flach und klein, sein Abstand war nahe am Idealwert. Der Riss P 3.1 R3 #4 ist zwar auch flach und klein, jedoch war der Eindruckabstand weit weg vom Idealwert. Auch an diesem Riss wurde ein ähnliches Risswachstum gefunden, das aber bei wesentlich niedrigeren Kräften auftrat. In den **Abbildung 34** und **Abbildung 35** sind die Abstände des Druckmittelpunktes des Kugelindenter vom Riss P3.1 R3#4 und P3.1 R4#3, sowie der Kontaktradius und der Rissfortschritt im vorher-nachher Vergleich dargestellt.

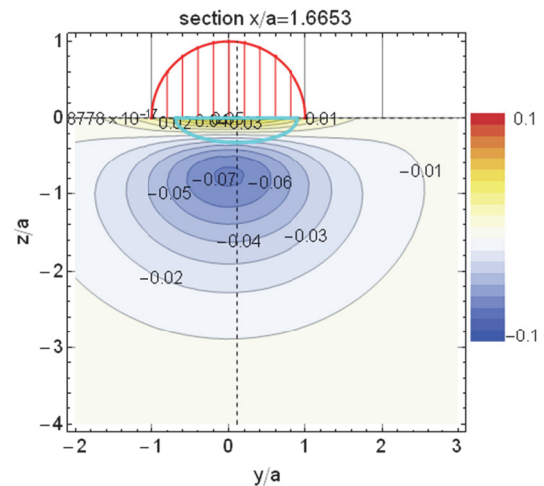
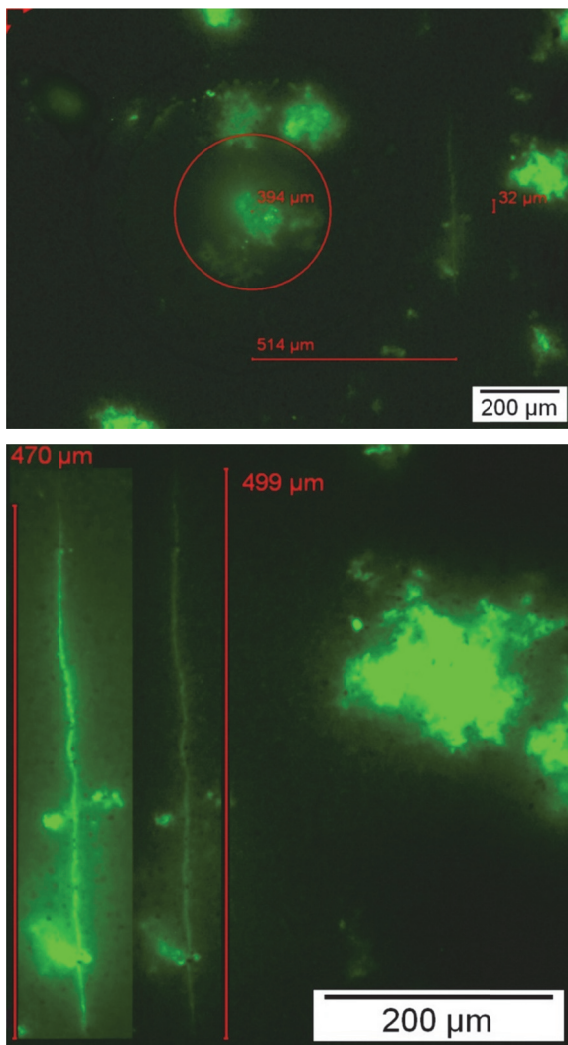


Abbildung 34: (a) Eindruckabstand Kugelindenter – Riss P3.1 R4#3. (b) Spannungsfeld normal zum Riss in der Rissebene zu diesem Versuch, (c) Ursprüngliche Risslänge links und Risswachstumsfortschritt rechts P3.1 R4#3

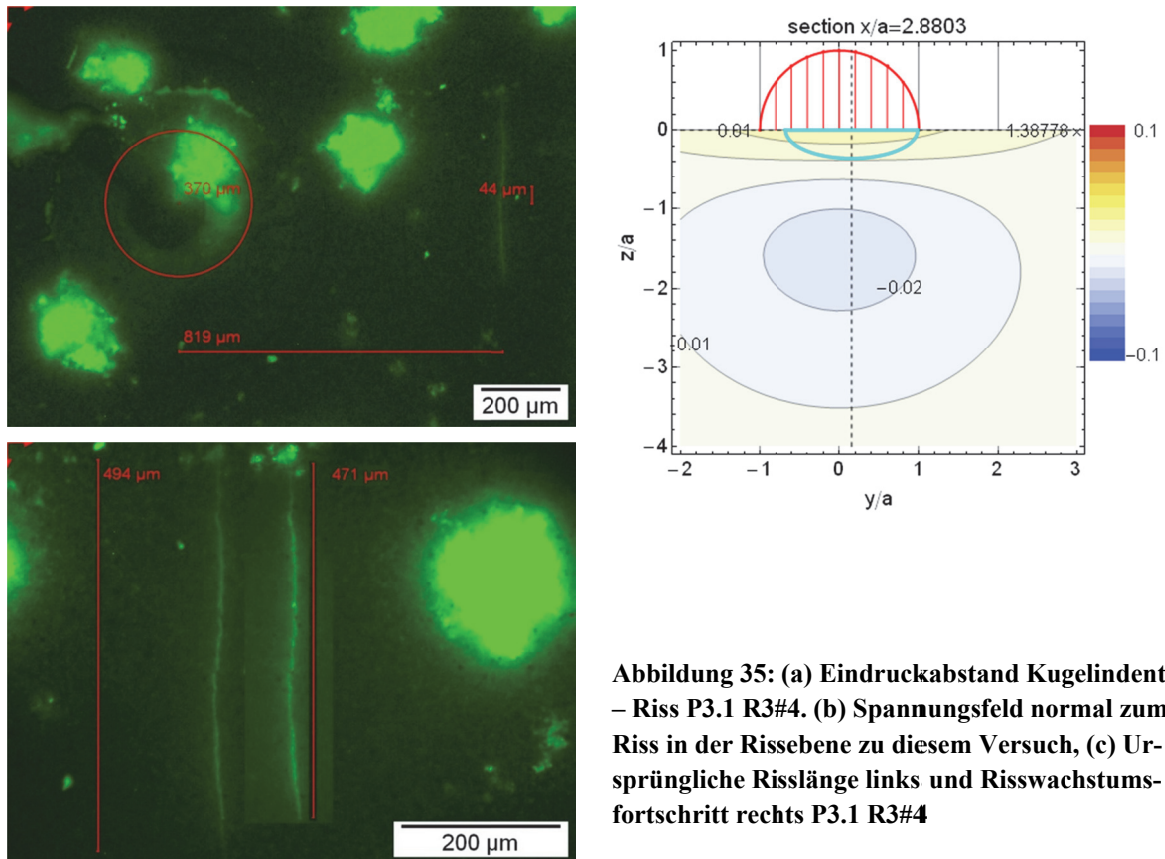


Abbildung 35: (a) Eindruckabstand Kugelindenter – Riss P3.1 R3#4. (b) Spannungsfeld normal zum Riss in der Rissebene zu diesem Versuch, (c) Ursprüngliche Risslänge links und Risswachstumsfortschritt rechts P3.1 R3#4

Riss P3.1 R4#3 liegt nur teilweise im Zugspannungsbereich (**Abbildung 34**), Riss P3.1 R3#4 zur Gänze (**Abbildung 35**). Dies könnte eine mögliche Erklärung für den großen Unterschied in den gemessenen Kräften sein.

Interessanterweise wurden zwar bei allen Versuchen akustische Signale detektiert, aber nicht bei allen auch eine Rissverlängerung an der Oberfläche gefunden. Aufgrund der Angaben aus der Arbeit von Levesque [15], d.h. mithilfe des Diagramms aus **Abbildung 3**, ist es möglich, für die untersuchten Risse die SIFs am Oberflächenpunkt zu berechnen. Diese Werte liegen in der zwischen $1,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ bis $2,6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (siehe **Anhang A4**). Diese Werte liegen deutlich unter der Bruchzähigkeit $K_{Ic} = 5,62 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ des Materials (siehe **Tabelle 2**). Risswachstum unter reiner K_I -Belastung sollte demnach nicht möglich gewesen sein. Es ist aber vorstellbar, dass Risswachstum an einer anderen Stelle des Risses unter mixed-mode [23, 24] Bedingungen stattgefunden hat. Leider war aufgrund von fehlenden Informationen zu den SIFs für mode II- und mode III-Belastung eine quantitative Überprüfung nicht möglich.

Der direkte Vergleich der Experimente mit der Theorie von Levesque [15] lässt darauf schließen, dass die Versuche teilweise funktionieren, diese aber sehr von den Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Positioniergenauigkeit abhängen. Bei den Versuchen wo akustische Signale detektiert aber definitiv kein Risswachstum stattgefunden hat, kann auf ein Ausrichten der Kugel im Indenter beim Kontakt mit dem Probenmaterial oder auf ein Mode II – Risswachstum geschlossen werden. Es kann aber definitiv bestätigt werden, dass ein minimales fortschreitendes Risswachstum unter Kontaktbeanspruchung, wenn auch nur bei einer geringen Probenzahl, stattgefunden hat und nachgewiesen wurde (**Abbildung 34 und Abbildung 35**)

4.3.2 Kontaktbelastung von langen Oberflächenrissen

Der wesentliche Unterschied bestand darin, dass die Startrisse zirka das Fünffache der ursprünglichen Ausgangslänge aber die gleiche Tiefe besaßen. Diese Risse sind etwa 15-mal länger als tief und können daher als lange Oberflächenrisse mit einer charakteristischen Tiefe a beschrieben werden. Hierzu wurden fünf Knoopeindrücke mit 20 kg Belastung in einer Linie hintereinander eingebracht, um so einen durchgehenden Riss zu erzeugen.

Leider konnte die exakte Ausgangslänge der Risse nicht bestimmt werden, da die Länge der Risse auch den kleinsten Fokusbereich des Lichtmikroskops überschritt. Nach dem Abschleifen der Probe im Mittel um 94 μm wurden die Risse nochmals vermessen. Auch jetzt lag die Startrissgröße noch im Bereich von 1046 μm bis 1433 μm , wobei 1433 μm (**Abbildung 36**) leider die Begrenzung des Lichtmikroskops ist und der tatsächliche Riss doch noch ein wenig länger gewesen ist. Somit war eine eindeutige Bestimmung der Startrisslänge nicht möglich. Die Tiefe der Risse wurde aufgrund der Rissgeometrien aus den Vorversuchen (Abschnitt 3.3) und dem abgeschliffenen Betrag ermittelt und lag bei etwa $a = 130 \mu\text{m}$.

Die gemessenen Kräfte bei diesen Versuchen werden in **Abbildung 37** gezeigt. Es wurden Signale im Kräftebereich von 668 N bis 2607 N registriert. Ein Risswachstum kann bei diesen Rissen nur in die Tiefe erfolgen und daher experimentell nicht ermittelt werden.

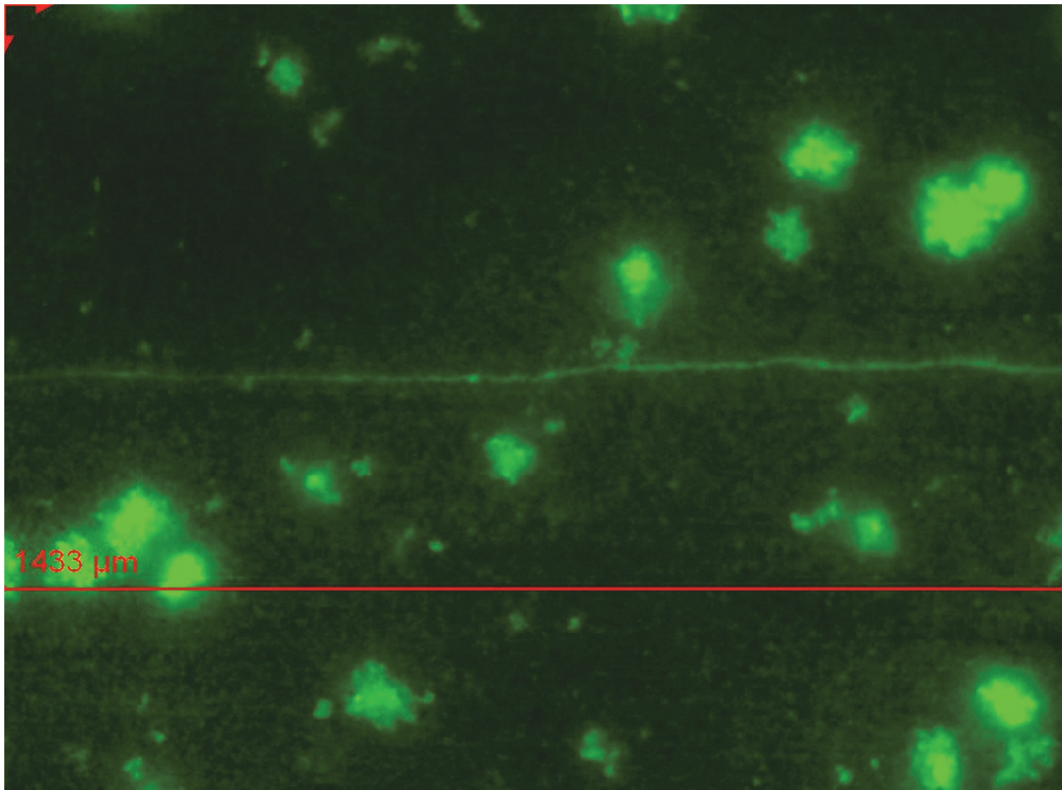


Abbildung 36: Abgeschliffene Probe mit durchgehendem Riss mit einer Länge von mehr als 1433 μm .

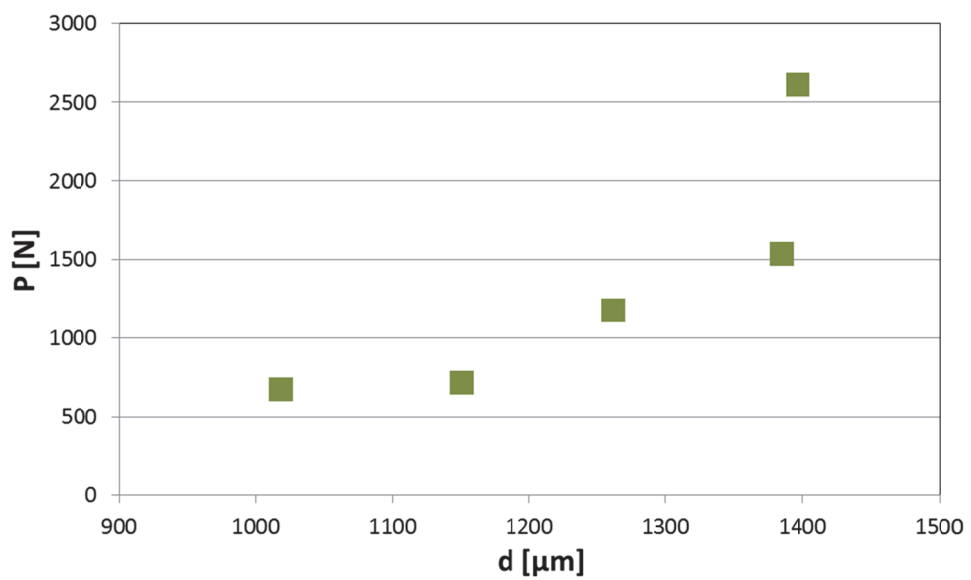


Abbildung 37: Kräfte beim ersten akustischen Signal für lange Risse in Abhängigkeit vom Abstand.

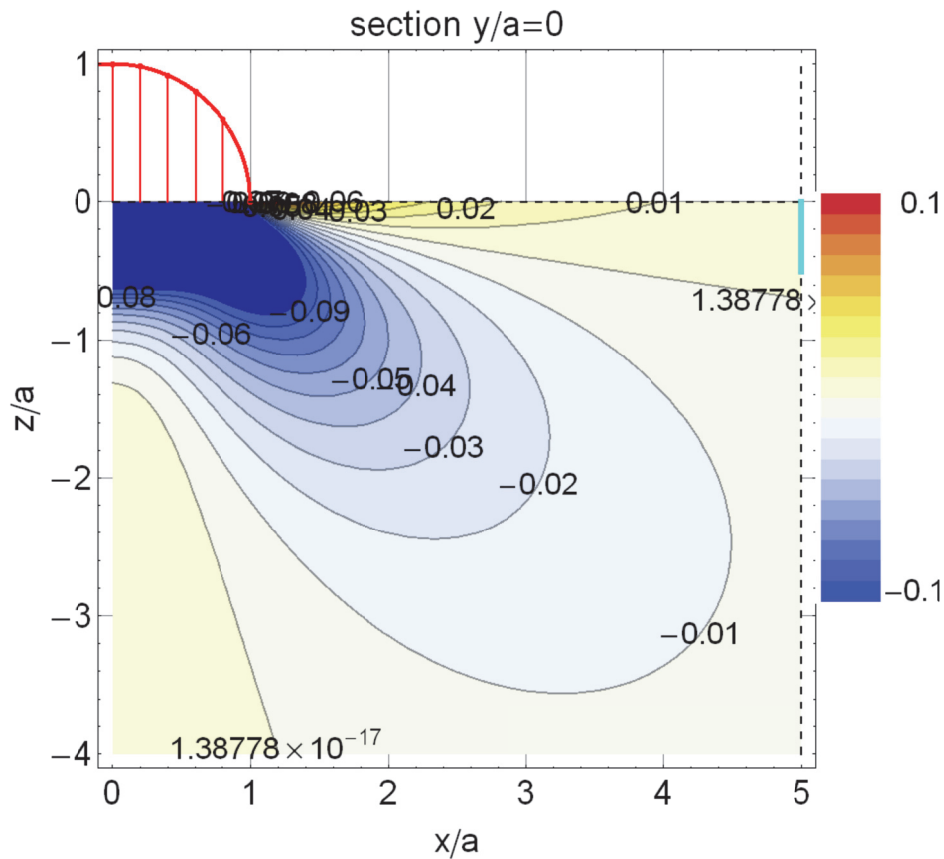


Abbildung 38: Spannungen normal zum Riss (σ_y) unter dem Kontakt entsprechend einem Versuch mit $P = 1000$ N, einem Abstand von $d = 5 a$, und einer Risstiefe von $130 \mu\text{m}$. Der Riss ist in Cyan am rechten Rand der Grafik erkennbar.

Wie in **Abbildung 38** erkennbar ist, liegen Risse bei den untersuchten Bedingungen vollständig in einer Zugspannungszone mit relativ geringen Gradienten. Allerdings sind die herrschenden Spannungen sehr gering: nur etwa 1% des maximalen Kontaktdrucks. An der Oberfläche betragen die Spannungen normal zum Riss 60 MPa bis 150 MPa. Ob unter diesen Bedingungen tatsächlich Risswachstum stattfindet ist fraglich.

4.3.3 Praktische Aspekte bei den Kontaktbelastungsversuchen

Zusammenfassen kann gesagt werden, dass diese Versuche mit Hilfe der Kantenprüfmaschine sich am aufwändigsten und schwierigsten von allen durchgeführten Versuchen in dieser Arbeit gestalteten.

Dabei stellte der apparative Aufbau zur synchronen Erfassung der Messwerte Kraft & akustische Signale nicht das eigentliche Problem dar. Um eine möglichst genaue Messung gewährleisten zu können, wurde das ET 500 mit einem Multimeter verbunden, sodass vor den Versuchen ein Nullabgleich durchgeführt wurde und parallel auch mit dem Acoustic Emission

Gerät dieselbe Kraft wie mit dem ET 500 aufgezeichnet werden konnte. Relativ einfach war noch das akustische Aufzeichnungsgerät „Vallen Acoustic Emission“ mit der Kantenprüfmaschine zu koppeln und spezielle Kugelhalter zu konstruieren und anfertigen zu lassen.

Die größte Schwierigkeit bestand vielmehr darin, die zuvor mit einer Belastung von 20 kg eingebrachten einzelnen Startrisse, die danach im Mittel um 96 μm abgeschliffen wurden, unter den am Kantenversuchsgerät angebrachten Lichtmikroskop wieder zu finden. Nicht nur das Mikroskop, sondern auch der akute Platzmangel im Arbeitsbereich des Kantenprüfers, die Beleuchtung mit der Hand UV – Lampe und die gleichzeitige Positionierung der Probe auf hundertstel Millimeter genau erforderten viel Geschick und Geduld. Die Positioniergenauigkeit der Probe im ET 500 liegt im Bereich von $\pm 15 \mu\text{m}$. Die Signaldetektion wurde wie bei den Kugel – Platte – Versuchen durchgeführt. Der einzige Unterschied bestand darin, dass nach erfolgreicher akustischer Detektion die Lastaufbringung selbst abgebrochen werden musste.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der bis dato noch nicht erwähnt aber auch berücksichtigt werden muss, ist die Reibung zwischen Kugelindenter und Probe. Das heißt, dass bei der vertikalen Belastung unter Miteinbeziehung des dünnen Schmierfettfilmes an der Indenterkugel und den geringfügig unterschiedlichen elastischen Eigenschaften beider Materialien die Reibung eine wesentliche Rolle spielen kann. In der nun vorliegenden Annahme einer idealen vertikalen Belastung ist in dieser Versuchsdurchführung die Reibung zwischen Indenter und Probe so gering, dass diese nicht relevant ist und somit komplett vernachlässigt werden kann.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Diplomarbeit wurde das Risswachstum von künstlich erzeugten Oberflächenrissen in ebenen Platten mithilfe akustischer Detektion bei einer Kugel- Kontaktbelastung untersucht. Um die eigentlichen Kontaktversuche durchführen zu können, mussten verschiedenen Teilaspekte der Versuchsdurchführung in Vorversuchen untersucht werden. Geeignete Einstellungen zur akustischen Detektion und eine geeignete Oberflächenqualität der Platten wurden ermittelt und eine Möglichkeit zur Markierung der Kontaktposition gefunden.

Die geeignete Oberflächenqualität wurde über Versuche, die die Entstehung von Hertz'schen Ringrissen untersuchen ermittelt. Diese Kugel-Platte-Druckversuche wurden mit Si_3N_4 Kugeln mit zwei unterschiedlichen Durchmessern durchgeführt. Bei den Versuchen mit einem Kugeldurchmesser von 5,556 mm konnte man erkennen, dass mehrere partielle Ringrisse entstanden, bevor ein vollständiger, durchgehender Ringriss ausgebildet wurde.

Bei Verwendung der größeren Si_3N_4 Kugel mit einem Durchmesser von 12,7 mm konnte man immer komplette, durchgehende Ringrisse beobachten. Aufgrund des größeren Durchmessers der Kugel war auch eine höhere Kraft zur Erzeugung eines Risses notwendig. Die so entstandenen Ringdurchmesser unterscheiden sich zu den Ringrissdurchmessern der Versuche mit der kleineren Kugel knapp um den Faktor zwei.

Weiters wurde gefunden, dass die Oberflächenbearbeitung und Oberflächenqualität einen sehr großen Einfluss auf das Schädigungsverhalten der Keramik hat. So war die erforderliche Kraft, die notwendig war, um eine Schädigung zu erzielen, bei mit D 15 geschliffenen Proben höher als bei mit D 46 geschliffenen Proben. Das heißt, dass eine schlechtere Oberflächenqualität der Keramik zu einer Verringerung der charakteristischen kritischen Last für die Ringrissbildung führt.

Die Versuche mit 12 μm dickem Artikulationspapier zur Markierung des Kontaktes führten zu keinem brauchbaren Ergebnis, da das Artikulationspapier als Dämpfungsmaterial zwischen Kugel und Platte fungierte und letztendlich für die Schädigung des Materials eine höhere Kraft benötigt wurde als ohne Artikulationspapier. Weiteres kam es zu einer Relativbewegung zwischen Kugel und Platte.

Mithilfe von Biegeversuchen konnten die Größe und Form von Eindruckrissen, die mit Knoop-Härteeindrücken mit Lasten zwischen 5 kg und 20 kg erzeugt wurden, ermittelt wer-

den. Es war möglich annähernd halb-elliptische Oberflächenrisse mit Längen zwischen etwa 200 μm bis 300 μm und einer Tiefe von 100 μm (nach dem Entfernen der verformten Zone) reproduzierbar herzustellen. Durch das Aneinanderreihen von mehreren Knoop-Eindrücken in einer Linie konnten auch lange Oberflächenrisse hergestellt werden. Basierend auf Erkenntnissen aus der Literatur wurden die halb-elliptischen Oberflächenrisse in unterschiedlichen Abständen durch einen Kugelkontakt bis zur Detektion von akustischen Signalen belastet. Die dafür nötigen Lasten steigen mit steigendem Abstand der Belastung vom Riss an.

Für einige Risse konnte eine Verlängerung an der Oberfläche gemessen werden. Nicht alle Risse wachsen an der Oberfläche, da dafür der Wert K_I zu klein war. Weiterführende Analysen in Richtung mehrachsige Belastung sind nicht möglich, da die kritischen SIFs nicht bekannt sind. Bei den Versuchen an langen Rissen wurden ebenso akustische Signale detektiert. Ein explizites Risswachstum ist experimentell nicht nachweisbar, da diese möglicherweise in die Tiefe wachsen. Vermutlich sind die auftretenden Spannungen für ein Risswachstum zu klein, obwohl die Risse nur im Zugspannungsbereich des Eindruckes liegen.

Obwohl Risswachstum mikroskopisch beobachtet wird bleibt eine essentielle Frage ungeklärt. Was wird bei der akustischen Detektion wirklich wahrgenommen? Müssen dafür die Einstellungen für die akustische Detektion auf dem Messequipment ET 500 angepasst werden? Eine genauere bruchmechanische Beschreibung (SIFs für alle Moden) wäre wünschenswert und könnte anschließend auch Klarheit schaffen.

Bei dem experimentellen Aufbau handelt es sich um eine Miniatur-Prüfmaschine mit Positioniertisch und Mikroskop (ET 500) um die Belastungsstelle zu betrachten. Der Aufbau der Acoustic Emission war vergleichsweise einfach. Die eigentliche Versuchsdurchführung gestaltete sich aber schwierig, da die Risse auf den abgeschliffenen Proben schlecht zu finden waren und dementsprechend ein schlechtes Treffen der gewünschten Position zur Folge hatte.

Eine etwaige Abhilfemaßnahme könnte eine noch bessere Oberflächenqualität nach dem Abschleifen sein. Keramographisches Polieren ist in Hinblick auf die Körnung stärker variabel als Schleifen auf der Flachsleifmaschine und hinterlässt womöglich auch variable Spannungszustände. Ein Plattenmaterial, das nicht so viele „snowflakes“ hat, würde die Untersuchungen sicherlich ebenfalls vereinfachen, da dann nur die Risse im UV-Licht grün erscheinen.

Für weiterführende Versuche muss beachtet werden, dass die elastischen Eigenschaften der Materialien mehr oder minder variieren und somit zu einem komplett anderen Ergebnis führen können. So spielt auch die Reibung zwischen Kugel und Platte eine wesentliche Rolle die im Normalfall keinesfalls vernachlässigt werden darf.

Die bis jetzt ausgewerteten Ergebnisse zeigen deutlich, dass es möglich ist, Risswachstum unter Kontaktspannungsbelastung sowohl akustisch zu detektieren als auch mikroskopisch zu zeigen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] G. Kolb, M. Oberndorfer, N. Raidl, C. Prehal: "Technische Keramik im Leichtbau", Leoben, 2013, pp. 21
- [2] R. Danzer, M. Lengauer: "Silicon Nitride Materials for Hot-working of High Strength Metal Wires", *Engineering Failure Analysis* **17** (2010), 596-606
- [3] R. Danzer, M. Lengauer, W. Harrer: "Festigkeit und Einsatzgrenzen keramischer Drahtwalzen", in: A. Kailer (Ed.), *Walzen mit Keramik*, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2009, 95-111
- [4] A. Kailer, J. Kozlowski, K. Berroth, G. Wötting, W. Zleppnig, R. Danzer, M. Lengauer: "Keramische Walzwerkzeuge für die Herstellung von Drähten, Rohren und Bändern", *Industrie Diamanten Rundschau* **37** [11] (2003), 169-172
- [5] M. Lengauer: "Einsatz von Si₃N₄-Keramik als Werkstoff für Walzwerkzeuge zum Warmwalzen von Draht" Institut für Struktur- und Funktionskeramik, Montanuniversität Leoben, 2007
- [6] M. Lengauer, R. Danzer: "Silicon Nitride Tools for Hot Rolling of High Alloyed Steel and Superalloy Wires - Crack Growth and Lifetime Prediction", *Journal of the European Ceramic Society* **28** [11] (2008), 2289-2298
- [7] M. Lengauer, R. Danzer, W. Harrer: "Keramische Walzen für das Drahtwalzen - Simulation und Analyse der Werkzeugbeanspruchung", in: A. Kailer, T. Hollstein (Eds.), *Walzen mit Keramik*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2004, 95-107
- [8] K. Wiehler, A. Kailer, P.-J. Mauk, C. Eckhardt, K. Berroth, J. Kozlowski, A. Wagemann, R. Danzer: "Ceramic Rolling Tools and Components for Enhanced Lifetime and Product Quality", in: T. T. M. AG (Ed.), *METEC InSteelCon & EMC2007*, Steel Institute DEh, Düsseldorf, Germany, 2007, 481-488
- [9] W. Lins, G. Kaindl, H. Peterlik, K. Kromp: "A Novel Resonant Beam Technique to Determine the Elastic Moduli in Dependence on Orientation and Temperature up to 2000 °C", *Review of Scientific Instruments* **70** [7] (1999), 3052-3058
- [10] Fraunhofer Institute for Mechanics of Materials IWM: www.rolicer.eu, 28.10.2013
- [11] S. G. Roberts: "Hertzian testing of ceramics", *British Ceramic Transactions* **99** [1] (2000), 31-38
- [12] B. R. Lawn: "Indentation of Ceramics with Spheres - A Century after Hertz", *Journal of the American Ceramic Society* **81** [8] (1998), 1977-1994
- [13] J. Rohr: "Akustische Detektion von Erstschädigung in Siliziumnitrid" Institut für Struktur- und Funktionskeramik, Montanuniversität Leoben, 2012
- [14] M. T. Huber: "Zur Theorie der Berührung fester elastischer Körper", *Annalen der Physik* **319** [6] (1904), 153-163
- [15] G. A. Levesque, N. K. Arakere: "Empirical Stress Intensity Factors for Surface Cracks under Rolling Contact Fatigue", *Tribology Transactions* **53** [4] (2010), 621-629
- [16] D. Gross, T. Seelig: "Bruchmechanik - Mit einer Einführung in die Mikromechanik", Springer, Heidelberg, 2011
- [17] D. Munz, T. Fett: "Ceramics - Mechanical Properties, Failure Behaviour, Materials Selection", Springer, Berlin, 2001
- [18] M. Kuna: "Numerische Beanspruchungsanalyse von Rissen: Finite Elemente in der Bruchmechanik", Vieweg + Teubner Verlag, 2010
- [19] W. Huber: "Bruchzähigkeitsmessung von Keramik unter Mode II Belastung" Institut für Struktur- und Funktionskeramik, Montanuniversität Leoben, 2013

- [20] A. F. Liu: "*Mechanics and Mechanisms of Fracture - An Introduction*", ASM International, 2005
- [21] R. Danzer, T. Lube, P. Supancic, R. Damani: "Fracture of Ceramics", *Advanced Engineering Materials* **10** [4] (2008), 275-298
- [22] R. Danzer, W. Harrer: "*Mechanische Eigenschaften keramischer Werkstoffe*", Leoben, 2011
- [23] T. Fett, G. Gerteisen, S. Hahnenberger, G. Martin, D. Munz: "Fracture tests for ceramics under mode-I, mode-II and mixed-mode loading", *Journal of the European Ceramic Society* **15** [4] (1995), 307-312
- [24] J. J. Petrovic: "Mixed-Mode Fracture of Hot-Pressed Si₃N₄", *Journal of the American Ceramic Society* **68** [6] (1985), 348-355
- [25] F. Erdogan, G. C. Sih: "On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear", *Journal of Basic Engineering* **85** [4] (1963), 519-525
- [26] R. Danzer, T. Lube: "New Fracture Statistics for Brittle Materials", *Fracture Mechanics of Ceramics* **11** (1996), 15
- [27] V. Licht, P. Hülsmeyer, T. Fett: "Probability of cone crack initiation due to spherical contact loading", *Journal of the European Ceramic Society* **24** (2004), 2907-2915
- [28] A. C. Fischer-Cripps: "Predicting Hertzian fracture", *Journal of Materials Science* **32** (1997), 1277-1285
- [29] EN ISO 18756: "*Fine Ceramics (Advanced Ceramics, Advanced Technical Ceramics) – Determination of Fracture Toughness of Monolithic Ceramics at Room Temperature by the Surface Crack in Flexure (SCF) Method*", 2003
- [30] Bundesanstalt für Material-forschung und -prüfung:
http://www.bam.de/de/kompetenzen/fachabteilungen/abteilung_5/fg52/fg52_medien/fg52_4-p-biegung_deutsch.pdf, 28.10.2013
- [31] Institut für Struktur- und Funktionskeramik: <http://www.isfk.at/en/1603/>, 28.10.2013
- [32] J. J. Petrovic: "Weibull statistical fracture theory for the fracture of ceramics", *Metallurgical Transactions A* **18** [11] (1987), 1829-1834
- [33] CEN EN 14425-5: "*Fine Ceramics (Advanced Ceramics, Advanced Technical Ceramics) - Determination of Fracture Toughness of Monolithic Ceramics at Room Temperature by the Single-edge V-notched Beam (SEVNB) Method*", 2005

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: (a) Skizze eines Kugel –Platte –Kontakt mit entstehenden Ring- und Kegelriss [12], (b) Ring- und Kegelriss in Glas. Der Ringriss ist durch Pfeile gekennzeichnet.	5
Abbildung 2: Plot der Kontaktspannungen in der Oberfläche einer Platte. Alle Spannungen wurden auf den maximalen Kontaktdruck p_{\max} normiert, alle Längen auf den Kontaktradius a . Ein halb-elliptischer Oberflächenriss ist in Cyan eingezeichnet. (a) Spannungen an der Oberfläche, (b) Spannungen normal zum Riss in der Rissebene.	6
Abbildung 3: Plot der normierten Spannungsintensitätsfaktoren für Mode I Belastung, $K_I^* = K_I / p_{\max} \sqrt{\pi \frac{a}{\phi}}$ über die Position an der Rissfront ($\phi = 0$ entspricht dem tiefsten Punkt des Risse, $\phi = \pi/2 = 1,57$ dem Oberflächenpunkt) für Risse in unterschiedlichem Abstand vom Kontakt, nach [15].	7
Abbildung 4: Geometriebedingungen für Kontaktgröße und Risslänge für maximales K_I lt. Tabelle 1.	8
Abbildung 5: Rissöffnungsarten [18].	11
Abbildung 6: (a) lichtmikroskopische Aufnahme eines FSNI-Schliffes, (b) Gefügebildaufnahme REM, (c) Detail "snowflake", REM-Aufnahme.	14
Abbildung 7: Versuchsaufbau Druckversuch mit Si_3N_4 Kugel auf FSNI.	16
Abbildung 8: Vallen Acoustic Emission Gerät zur Signalaufzeichnung.	16
Abbildung 9: Unvollständiger Ringriss (Oberfläche D15, Kugeldurchmesser 5,556 mm, Kraft $P = 3765$ N). Die fluoreszierende Eindringfarbe markiert nicht nur den Riss sondern auch die "snowflakes".	17
Abbildung 10: Schematische Darstellung eine Knoop-Eindrucks und –Eindruckrisses mit den üblichen Bezeichnungen [17].	19
Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Biegeauflagers [30].	21
Abbildung 12: Schematische Darstellung des-Biegeprüfungsaufbaus.	22
Abbildung 13: Prinzipskizzen zu den Konaktbelastungsexperimenten. (a) ein halb-elliptischer Oberflächenriss (Länge $2c$, Tiefe a) wird im Abstand d mit einer Kugel belastet, die das Kontaktspannungsfeld $p(r)$ erzeugt. (b) ein langer Oberflächenriss mit der Tiefe a wird im Abstand d durch ein Kontaktspannungsfeld belastet.	23
Abbildung 14: Kantenprüfmaschine ET 500 [31].	24
Abbildung 15: Konstruktionszeichnung der Kugelaufnehmer für die Kantenprüfmaschine ET500.	25
Abbildung 16: Kantenprüfmaschine ET 500 mit Vallen Acoustic Emission Gerät.	26
Abbildung 17: Fertiger Versuchsaufbau an der Kantenprüfmaschine ET500.	26
Abbildung 18: (a) Lichtmikroskopische Betrachtung des Kugelabdruckes, der Fettabdruck ist gekennzeichnet. Der eingezeichnete Kreis entspricht	

NICHT der Kontaktfläche, er ist deutlich größer, (b) Übereinanderlegen der Licht- und UV Aufnahme, die den identischen Bildausschnitt zeigen. Die Kennzeichnung aus dem linken Bild wird mithilfe der Bildanalyse-Software in das Bild übertragen.....	27
Abbildung 19: Vermessung der Lage des Kugeleindrucks relativ zum Riss auf einem Komposit-Bild.	28
Abbildung 20: Vollständig und partial entstandene Ringrisse bei einer Belastung von 4010 N mit einem Kugeldurchmesser von 5,556 mm.	31
Abbildung 21: (a) Nicht konzentrische partiale Ringrisse, (b) Verdeutlichung der nicht konzentrischen Ringrisse	32
Abbildung 22: Ein vollständiger Ringriss, entstanden bei einer Belastung von 8951 N mit einem Kugeldurchmesser von 12,7 mm. Im Okular des Lichtmikroskopes war der gesamte Riss sichtbar.....	33
Abbildung 23: Bruchfläche einer Probe mit HK 20-Eindruckriss im UV-Licht.....	35
Abbildung 24: Vermessen der Risstiefe und Risslänge von Knoop-Eindruckrissen im Stereomikroskop.	36
Abbildung 25: Gegenüberstellung der beiden Rissvermessungsmethoden.....	36
Abbildung 26: Vergleich der HK5-Werte für die ersten beiden Probenserien.....	37
Abbildung 27: Vergleich der Messwerte für die Risstiefe a und Risslänge $2c$ von HK5-Eindruckrissen, gemessen mit Fluoreszenzfarbe, für die ersten beiden Probenserien.....	37
Abbildung 28: Länge der unabgeschliffenen Knoop-Eindruckrisse c_0 an der Probenoberfläche in Abhängigkeit von der verwendeten Eindrucklast. Es sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Messmethoden dargestellt	38
Abbildung 29: Tiefe der unabgeschliffenen Knoop-Eindruckrisse a_0 in Abhängigkeit von der verwendeten Eindrucklast. Es sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Messmethoden dargestellt.	39
Abbildung 30: Form der unabgeschliffenen Knoop-Eindruckrisse a_0/c_0 in Abhängigkeit von der verwendeten Eindrucklast. Es sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Messmethoden dargestellt.	39
Abbildung 31: Versuchsprotokoll des Kantendruckversuches gekoppelt mit Acoustic Emission.....	40
Abbildung 32: Durchgeführte Experimente: gemessene Kraft für erste akustische Signale in Abhängigkeit vom Abstand. Die Werte sind jeweils bezogen auf die gefährlichste Bedingung.	41
Abbildung 33: Kraft für akustisch detektiertes Risswachstum in Abhängigkeit vom Abstand der Kontaktbelastung vom Riss.....	42
Abbildung 34: (a) Eindruckabstand Kugelindenter – Riss P3.1 R4#3. (b) Spannungsfeld normal zum Riss in der Rissebene zu diesem Versuch, (c) Ursprüngliche Risslänge links und Risswachstumsfortschritt rechts P3.1 R4#3	43

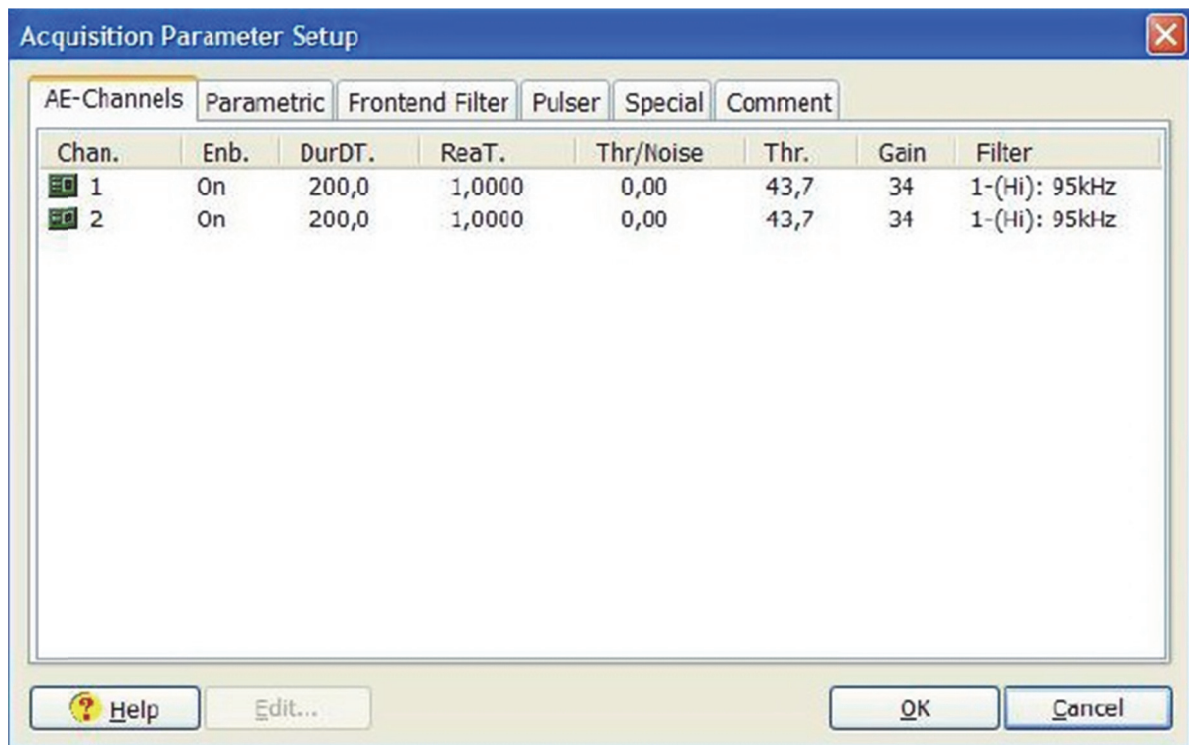
Abbildung 35: (a) Eindruckabstand Kugelindenter – Riss P3.1 R3#4. (b) Spannungsfeld normal zum Riss in der Rissebene zu diesem Versuch, (c) Ursprüngliche Risslänge links und Risswachstumsfortschritt rechts P3.1 R3#4	44
Abbildung 36: Abgeschliffene Probe mit durchgehendem Riss mit einer Länge von mehr als 1433 μm	46
Abbildung 37: Kräfte beim ersten akustischen Signal für lange Risse in Abhängigkeit vom Abstand.	46
Abbildung 38: Spannungen normal zum Riss (σ_x) unter dem Kontakt entsprechend einem Versuch mit $P = 1000 \text{ N}$, einem Abstand von $d = 5 a$, und einer Risstiefe von 130 μm . Der Riss ist in Cyan am rechten Rand der Grafik erkennbar.	47

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abstände des Risses vom Kontakt, für die der Spannungsintensitätsfaktor K_I maximal ist, nach [15].	8
Tabelle 2: Kennwerte der verwendeten Materialien.....	14
Tabelle 3: untersuchte Kontakpaare Kugel – Platte und Untersuchungsziele.....	18
Tabelle 4: Zusammenfassung der Messergebnisse aus den Kugel – Platte Versuchen. Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen.....	29
Tabelle 5: Risslänge $2c$, Risstiefe a und Formfaktor a/c für unabgeschliffene Knoop-Eindruckrisse.	38

Anhänge

Anhang A1.: Acoustic Emission Mikrophoneinstellungen [13]



Anhang A2.: Schädigungskraft bei Kugel - Platte Versuchen

Kugel Ø 5,556 mm, D 15

Treshold: A ₁ & A ₂ : 43,7 dB			
Probe #	A ₁ [dB]; Hits	A ₂ [dB]; Hits	Kraft bis zum Signal [N]
R1-V1	35; 3	45; 1	3326
R1-V2	35; 3	45; 1	3765
R1-V3	50; 3	70; 1	4620
R1-V4	40; 1	50; 1	3619
R1-V5	40; 3	60; 1	4730
R1-V6	40; 3	60; 1	4461
R1-V7	40; 3	60; 1	4820
R1-V8	40; 2	60; 1	4010
R3-V1	40; 2	60; 1	4398
		Mittelwert	4194
		Standardabweichung	533

Kugel Ø 5,556 mm, D 46

Treshold: A ₁ & A ₂ : 43,7 dB			
Probe #	A ₁ [dB]; Hits	A ₂ [dB]; Hits	Kraft bis zum Signal [N]
R1 - V1	40; 3	60; 1	4314
R1 - V2	40; 3	60; 1	3752
R1 - V3	40; 3	60; 1	3491
R1 - V4	40; 3	60; 1	3887
R1 - V5	40; 3	60; 1	4192
R1 - V6	40; 5	60; 1	4244
R1 - V7	40; 5	60; 1	4350
R1 - V8	40; 5	60; 1	3755
R2 - V1	35; 3	45; 1	3298
R2 - V2	35; 3	45; 1	3701
R2 - V3	50; 3	70; 1	4496
R2 - V4	40; 1	50; 1	3578
R4 - V1	40; 3	60; 1	4628
R4 - V2	40; 3	60; 1	4337
R4 - V3	40; 3	60; 1	4682
R4 - V4	40; 2	60; 1	3913
R4 - V5	40; 2	60; 1	4256
		Mittelwert	4051
		Standardabweichung	412

Kugel Ø 5,556 mm, D 15 mit Artikulationspapier 12µm

Treshold A1& A2: 43,7 dB			
Probe #	A ₁ [dB]; Hits	A ₂ [dB]; Hits	Kraft bis zum Signal [N]
R1 - V2	40; 2	60; 1	4568
R1 - V3	40; 2	60; 1	4751
R1 - V4	40; 2	60; 1	3168
R1 - V5	40; 2	60; 1	4238
R1 - V6	40; 2	60; 1	4008
R1 - V7	40; 2	60; 1	3766
R1 - V8	40; 2	60; 1	3704
		Mittelwert	4029
		Standardabweichung	543

Kugel Ø 12,7 mm, D 15

Treshold A ₁ & A ₂ : 43,7 dB			
Probe #	A ₁ [dB]; Hits	A ₂ [dB]; Hits	Kraft bis zum Signal [N]
R1 - V2	40; 3	60; 1	5032
R1 - V3	40; 3	60; 1	7501
R1 - V4	40; 3	60; 1	8976
R1 - V5	40; 3	50; 1	8951
R1 - V6	40; 3	50; 1	7388
R2 - V1	40; 3	50; 1	7615
R2 - V3	40; 3	50; 1	9847
R2 - V4	40; 3	50; 1	10534
R2 - V5	40; 3	50; 1	8039
		Mittelwert	8209
		Standardabweichung	1615

Anhang A3.: Messwerte zu Risslängen und Risstiefe

Mittelwert und Standardabweichung Gesamtübersicht														
Eindrucklast [kg]	Risslänge Mittelwert [µm]		Risstiefe Mittelwert [µm]		Risslänge Mittelwert [µm]		Risstiefe Mittelwert [µm]		Risslänge Mittelwert [µm]		Risstiefe Mittelwert [µm]		Risslänge Mittelwert [µm]	
	Pr. A: 2c	Mittelwert FZ	Pr. A: 8	Mittelwert FZ	Pr. B: 2c	Mittelwert FZ	Pr. B: 2c	Mittelwert FZ	Pr. C: 2c	Mittelwert FZ	Pr. C: 2c	Mittelwert FZ	Pr. C: 2c	Mittelwert FZ
5	385,50		194,00		281,50		90,00		281,50		90,00		281,50	
5	342,50		167,50		280,50		134,00		280,50		134,00		280,50	
5	368,50		181,50		260,00		94,00		260,00		94,00		260,00	
5	360,50		184,50		274,50		99,00		274,50		99,00		274,50	
5														
5					270,00		88,00		270,00		88,00		270,00	
5					271,00		94,00		271,00		94,00		271,00	
Mittelwert:	364,25		181,88		272,92		99,83		272,92		99,83		272,92	
Standardabweichung:	17,86		10,96		7,91		17,16		7,91		17,16		7,91	
10	497,50		224,50		406,00		183,50		406,00		183,50		406,00	
10	566,00		203,50		483,00		186,00		423,00		165,50		510,50	
10	453,00		204,50		453,00		169,50		441,50		176,50		453,00	
10	536,50		250,00		449,50		188,00		797,50		220,50		463,00	
10					512,50		176,00		427,00		195,00		427,00	
10					474,50		170,50		491,50		170,50		491,50	
10					481,50		170,50		479,00		167,00		479,00	
Mittelwert:	513,25		220,63		465,71		178,36		559,63		196,63		468,93	
Standardabweichung:	48,99		21,84		33,68		7,47		172,71		29,96		27,37	
15	609,50		294,50		571,50		174,00		533,00		230,00		565,50	
15	612,50		281,00		567,50		220,00		532,00		241,50		571,00	
15	602,00		276,50		590,50		242,00		547,50		206,00		621,50	
15	625,50		300,50		581,50		205,00		518,00		208,50		553,50	
15					615,50		275,00		619,00		214,00		619,00	
15					518,50		208,00		518,50		208,00		518,50	
15					516,50		198,00		534,00		215,00		534,00	
Mittelwert:	612,38		288,13		565,93		217,43		532,63		221,50		569,00	
Standardabweichung:	9,80		11,25		36,58		32,74		12,05		17,14		39,34	
20	689,50		322,00		633,50		234,50		633,00		266,50		673,50	
20	659,00		346,00		624,00		269,00		629,00		281,00		624,00	
20					667,00		304,50		596,00		274,00		701,00	
20					633,00		238,00		619,00		270,00		667,00	
20					605,00		251,00						849,00	
20					580,50		244,00						599,50	
20					641,50		262,00						601,50	
Mittelwert:	674,25		334,00		630,64		257,57		619,25		272,88		673,64	
Standardabweichung:	21,57		16,97		30,93		24,14		16,58		6,22		86,32	

Anhang A4.: Messwerte der Kontaktbelastungsversuche an Oberflächenrissen

1/2-elliptische Risse																
Probe #	Rissgeometrie					Messwerte					Auswertung					
	HK [kg]	d [µm]	2c ₀ [µm]	2c [µm]	a ₀ [µm]	a [µm]	a/c	d _{1st} [µm]	e _{1st} [µm]	P _{1st} [N]	P _{Ende} [N]	d _{1st} /c	d _{1st} /d _{soil}	P _{1st} /P _{soil}	K _i *	K _i [MPa√m]
P 2.4 #1	20	488	537	415	226	116	0,56	469	87	900	1189	2,26	1,09	1,27	0,0116	1,51
P 2.4 #3	20	500	545	480	229	136	0,57	640	138	1065	1867	2,67	1,28	0,97	0,0095	1,41
P 2.4 #4	20	497	558	492	235	145	0,59	436	30	1047	2083	1,77	0,84	0,89	0,0089	1,34
P 2.4 #6	20	495	550	494	231	153	0,62	676	108	1716	2034	2,74	1,28	1,44	0,0131	2,35
P 2.4 #7	20	484	546	525	230	157	0,60	666	132	1649	2418	2,54	1,20	1,15	0,0111	2,01
P 3.1 R1 #1	20	n.g.	513	485	216	99	0,41	585	59	1109	1124	2,41	1,24	0,98	0,0083	1,16
P 3.1 R1 #2	20	n.g.	493	460	207	90	0,39	741	359	1865	2427	3,22	1,65	1,94	0,0130	2,08
P 3.1 R1 #4	20	n.g.	493	460	207	90	0,39	447	106	560	785	1,94	1,00	0,58	0,0048	0,51
P 3.1 R2 #3	20	n.g.	511	492	215	105	0,43	364	237	1953	2250	1,48	0,75	1,66	0,0125	2,14
P 3.1 R3 #2	20	n.g.	480	461	202	98	0,42	394	63	672	1218	1,71	0,87	0,70	0,0061	0,70
P 3.1 R3 #3	20	n.g.	528	520	222	118	0,45	1203	113	1859	2253	4,63	2,33	1,34	0,0110	1,94
P 3.1 R3 #4	20	n.g.	488	471	205	101	0,43	819	44	1821	2118	3,48	1,77	1,76	0,0129	2,12
P 3.1 R4 #3	20	n.g.	493	470	207	98	0,42	514	32	2329	2510	2,19	1,12	2,26	0,0148	2,62

lange Risse								
Probe #	Rissgeometrie			Messwerte		Auswertung		
	2c [µm]	a ₀ [µm]	a [µm]	a/c	d _{1st} [µm]	P _{1st} [N]	P _{max} [MPa]	σ(d) [MPa]
P 3.2 R1 #1	1046	230	126	0,0603	1019	668	41,33	73,10
P 3.2 R1 #2	1181	230	126	0,0534	1151	711	43,99	60,99
P 3.2 R1 #3	1294	230	126	0,0487	1261	1176	72,76	84,04
P 3.2 R4 #1	1421	230	138	0,0486	1385	1531	94,72	90,70
P 3.2 R4 #2	1433	230	138	0,0481	1397	2607	161,29	151,80