

Diplomarbeit

# **Akustische Detektion von Erstschädigung in Siliziumnitrid**

Zur Erlangung des Grades

Diplom Ingenieur

der Studienrichtung Werkstoffwissenschaften

am Institut für Struktur- und Funktionskeramik

der Montanuniversität Leoben

verfasst von

**Jürgen Rohr**

---

Betreuer:

o. Univ. Prof. Dr. Robert Danzer  
ao. Univ. Prof. Dr. Peter Supancic



# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe. Die verwendeten Quellen sind vollständig zitiert.

Leoben, am .....                      Unterschrift: .....

# Danksagung

---

Recht herzlich bedanken möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts für Struktur- und Funktionskeramik, dem Vorstand des Instituts o. Univ. Prof. Dr. Robert Danzer, dem Betreuer der Diplomarbeit ao. Univ. Prof. Dr. Peter Supancic sowie Ass. Prof. Dr. Tanja Lube, Dipl. Ing. Stefan Strobl sowie Mag. Josef Kreith, die mich jederzeit mit ihrem fachlichen Wissen unterstützten und stets ein offenes Ohr für Fragen und Anliegen hatten.

Der österreichischen Bundesregierung (insbesondere dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und dem Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend) sowie dem Land Steiermark, vertreten durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH und die Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH, wird für die finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeiten im Rahmen des von der Materials Center Leoben Forschung GmbH abgewickelten K2 Zentrums für „Materials, Processing und Product Engineering“ im Rahmen des Österreichischen COMET Kompetenzzentren Programms sehr herzlich gedankt.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht haben sowie meiner Schwester Katrin Rohr und meiner Freundin Stephanie Loike und meinen Freunden bedanken, die mir Zuversicht, Unterstützung und Kraft in dieser Zeit gegeben haben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>4</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>7</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>8</b>
<b>Verwendete Symbole</b> .....	<b>9</b>
<b>Einleitung</b> .....	<b>11</b>
1.1 Geschichtlicher Hintergrund.....	11
1.2 Zielsetzung.....	13
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>14</b>
2.1 Grundannahmen in der Hertz Theorie.....	14
2.1.1 Kontakt zwischen einer starren Kugel und einem elastischen Halbraum.....	15
2.1.2 Kontakt zwischen zwei elastischen Körpern mit gekrümmter Oberfläche.....	21
2.2 Vergleich von theoretischen Ansätzen aus diverser Literatur.....	22
2.2.1 Berechnung nach Lawn:.....	22
2.2.2 Berechnung nach Fischer Cripps:.....	23
2.2.3 Berechnung nach Timoshenko:.....	23
2.2.4 Berechnung nach Popov:.....	24
2.2.5 Vergleich aller Berechnungsarten.....	24
2.2.6 Kugel-Kugel Kontakt:.....	28
2.3 Verwendete Notation und Formeln.....	30
<b>3 Experimentelles</b> .....	<b>31</b>
3.1 Konzept.....	31
3.2 Aufbau.....	31
3.2.1 VALLEN Acoustic Emission (VALLEN AE).....	33
3.2.2 Datenauswertung.....	35
3.3 Durchführung.....	36
<b>4 Ergebnisse und Interpretation</b> .....	<b>37</b>
4.1 Erstschädigung beim Kugel – Platte Kontakt.....	37
4.1.1 Kugel mit 5 mm Durchmesser auf eine geschliffene Platte.....	37
4.1.2 Kugel mit 10,3 mm Durchmesser auf eine geschliffene Platte.....	44
4.1.3 Kugel mit 12,7 mm – Durchmesser auf eine geschliffene Platte.....	47
4.2 Vergleich der Kugel-Platte Versuche.....	49
4.2.1 Vergleich der Tiefe der Risse in der Platte.....	50
4.2.2 Kugel mit 5 mm Durchmesser auf polierte Platte.....	55
4.3 Erstschädigung beim Kugel – Kugel Kontakt.....	59
4.4 Untersuchung der Rissöffnung beim Kugel-Kugel Kontakt.....	62
4.5 Korellation mit dem Crush Test.....	63
<b>5 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>65</b>
<b>6 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>67</b>
<b>7 Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>69</b>

<b>8</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>71</b>
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>72</b>
9.1	Ultraschallmikrophoneinstellungen .....	72
9.2	Parametrischer Eingang des Vallen AE .....	73
9.3	Experimentelle Daten Kugel-D15 Platte.....	74
9.4	Experimentelle Daten Kugel-polierte Platte: .....	75
9.5	Experimentelle Daten Kugel-Kugel Kontakt: .....	75

# Abstract

---

Structural ceramic components are successfully used in ball bearings or turbochargers. Important advantages of ceramics for such applications are their high corrosion- and wear resistance. Those properties are a prerequisite for a successful implementation of silicon nitride as balls in bearings. There is a certain risk of brittle failure of structural ceramic parts caused by the growth of preexisting cracks.

During application ceramic bearing balls are predominantly loaded by contact stresses. Minor overload may lead to the well-known Hertzian cracks. These cracks are located on the surface and often remain invisible. Increasing the contact load causes a cone shaped crack to propagate. This cone shaped cracks lead to the total failure of the bulk material. The specific ring crack initiation force for a certain contact situation defines a major point for lifetime prediction of structural ceramic components

Because of the fact, that crack propagation in brittle materials causes ultrasonic emission, the ring crack initiation can be measured by sensitive ultrasonic microphones. Conventional testing methods for ceramics always lead to total failure, while the initiation of the first ring cracks is missed in such tests.

In this diploma thesis the initiation of Hertzian ring cracks is characterized for several contact situations. Flat plates are indented with spheres of different diameter. The crack initiation force is measured and the Hertz theory is applied to calculate crack initiation stresses. The influence of machining is studied by performing experiments on ground and polished plates. Further the contact between two spheres is analyzed to give a relation between the force for total failure of the balls and the ring crack initiation force.

# Kurzfassung

---

Strukturkeramische Werkstoffe werden erfolgreich in Form von Kugellagerkugeln oder in Turboladern eingesetzt. Herausragende Eigenschaften wie die Verschleißbeständigkeit oder die Korrosionsbeständigkeit machen keramische Kugeln, wie zum Beispiel aus Siliziumnitrid, zu einer sehr guten Wahl für Kugellager. Grundsätzlich besteht bei strukturkeramischen Werkstoffen unter Belastung aber das Risiko des Versagens durch Risswachstum.

In Lageranwendungen sind die Hauptbeanspruchungen durch Kontaktspannungen gegeben, die bei geringer Überlast zu den bekannten Hertz Rissen führen. Anfangs wachsen solche Risse zufolge einer Lasterhöhung normal zur Oberfläche, um dann bei weiterer Erhöhung der Kontaktbelastung kegelförmig in den Werkstoff weiter einzudringen. Bei weiterer Laststeigerung führt das Weiterwachsen der kegelförmigen Risse in den Werkstoff zu einer vollständigen Zerstörung des Bauteils. Um die Einsatzgrenzen solcher Lagerbauteile zu charakterisieren ist die Kenntnis der Bedingungen, die zur Schädigung führen, von grundsätzlichem Interesse für die Lebensdauerabschätzung von strukturkeramischen Bauteilen.

Die Ausbreitung von Rissen in spröden Werkstoffen geht mit einer Ultraschallemission einher. Daher ist es möglich, die Rissentstehung mithilfe von sensitiven Mikrofonen aufzunehmen. Der wesentliche Unterschied zwischen der akustischen Detektion von Erstschädigung und konventionellen Prüfmethode ist, dass bei konventionellen Belastungstests erst nach dem Auftreten von hinreichend großen Schädigungen das Versagen erkannt wird, aber selten die erste Kontaktschädigung erfasst wird.

Diese Diplomarbeit beschreibt auf Basis der Hertz Theorie anhand von Modellversuchen, die Entstehung von charakteristischen Kreisrissen an der Oberfläche. Aufgrund der Ultraschallemission bei der Rissausbreitung, wird die Erstschädigung erfasst und charakterisiert. Um eine etwaige Abhängigkeit von der Geometrie der in Kontakt stehenden Körper zu erkennen, werden Kugel-Platte Modellversuche mit verschiedenen Kugeldurchmessern durchgeführt. Zusätzlich zum Kugel-Platte Kontakt wird der Kontakt zwischen zwei Kugeln näher untersucht, um eine Abschätzung des Verhältnisses zwischen der Erst- und der Totalschädigung treffen zu können.

# Verwendete Symbole

---

<b>Symbol:</b>	<b>Einheit:</b>	<b>Bedeutung:</b>
$a$	[m]	Kontaktradius $r = a$
$a_{Fischer-Cripps}$	[m]	Kontaktradius nach Fischer-Cripps
$a_{Lawn}$	[m]	Kontaktradius nach Lawn
$a_{Popov}$	[m]	Kontaktradius nach Popov
$a_{Timoshenko}$	[m]	Kontaktradius nach Timoshenko
$a'$	[m]	Experimenteller Rissradius
$c$	[m]	Skalierungsparameter des Kegels
$d$	[m]	Maximalabsenkung
$E$	[Pa]	Elastizitätsmodul
$E_{Ind}$	[Pa]	Elastizitätsmodul des Indenter
$E_{Probe}$	[Pa]	Elastizitätsmodul der Probe
$E^*$	[Pa]	Effektiver Elastizitätsmodul
$f$	[m]	Abstand der Schnittebene von der Symmetrieebene
$k_1$	[-]	Vorfaktor von Timoshenko
$k_2$	[-]	Vorfaktor von Timoshenko
$k_{Lawn}$	[-]	Vorfaktor von Lawn
$P$	[N]	Normalkraft
$P_c$	[N]	Kritische Normalkraft
$p_0$	[Pa]	Maximaler Kontaktdruck
$p_m$	[Pa]	Mittlerer Kontaktdruck
$p(r)$	[Pa]	Kontaktdruckverteilung über dem Radius $r$
$R_{11}$	[m]	Hauptkrümmungsradius 1 Körper 1
$R_{12}$	[m]	Hauptkrümmungsradius 2 Körper 1

$R_{Ind}$	[m]	Krümmungsradius des Indenters
$R_{Probe}$	[m]	Krümmungsradius der Probe
$r$	[m]	Ortskoordinate in radialer Richtung
$s$	[m]	Hilfsabstand
$t$	[m]	Hilfsabstand
$u_z$	[m]	Verschiebung in z-Richtung
$x, y, z$	[m]	Ortskoordinaten
$x', y'$	[-]	Normierte Ortskoordinaten
$z_0$	[m]	Mittelpunktverschiebung des Kegels
$\alpha$	[m]	Hilfsvariable
$\beta$	[m]	Hilfsvariable
$\nu$	[-]	Querkontraktionszahl
$\nu_1$	[-]	Querkontraktionszahl des Indenters
$\nu_2$	[-]	Querkontraktionszahl der Probe
$\pi$	[-]	Pi
$\sigma_{MaxZug}$	[Pa]	Maximale Zugspannung
$\sigma_r$	[Pa]	Radiale Komponente der Spannungsverteilung
$\varphi$	[°]	Winkel
$\infty$	[-]	unendlich

# Einleitung

---

Üblicherweise führt das Versagen von strukturkeramischen Bauteilen bei Kontaktbelastung nicht gleich zu einer Totalschädigung, sondern erfolgt in mehreren Stufen. Besonderes Augenmerk muss auf die erste Kontaktschädigung gelegt werden. Die sogenannte Erstschädigung soll mittels akustischen Messverfahren, die einen praktikablen Weg der Detektion einer solchen darstellen, ermittelt und charakterisiert werden. Mit dieser Methode kann eine zuverlässige Voraussage getroffen werden, wann Kontaktschädigung beginnt und dadurch der erste Schritt zum Totalversagen des Bauteils auftritt.

## 1.1 Geschichtlicher Hintergrund

Im Jahre 1880 analysierte Heinrich Hertz erstmals das Auftreten kegelförmiger Risse in harten, homogenen Materialien (wie beispielsweise Glas) als Folge einer Normalbelastung durch stumpfe Eindringkörper (wie zum Beispiel Kugeln). Aufgrund dieser Beobachtung wurden Indentationstechniken zu einer wichtigen Praxis in der Analyse und Charakterisierung von Deformationseigenschaften und dem Bruchverhalten von spröden Materialien. Die durch die Indentation verursachte Beschädigung im Material lässt auf verschiedene mechanische Materialeigenschaften wie die Festigkeit oder die Härte schließen. Die Untersuchung dieser Schädigung ist auch wichtig, da sie häufig als der limitierende Faktor bei der Lebensdauer von Keramiken angesehen wird.<sup>(1)</sup>

Die traditionelle Betrachtung von Rissen, die der Hertz'schen Kontakttheorie folgen, wurde an flachen Silikat-Glasplatten durchgeführt, wobei Kugeln aus Hartmetall oder aus gehärtetem Stahl beziehungsweise aus Wolframkarbid als Eindringkörper dienten. In weiterer Folge wurde weiterführende Forschung an feinkörnigen polykristallinen Keramiken in den frühen 50er Jahren des 20. Jahrhunderts bis in die 70er Jahre mit dem selben Grundkonzept durchgeführt. Hertz'sche Risse beginnen sich in Form von ringförmigen Rissen knapp außerhalb des elastischen Kontakts an der Oberfläche der Platte zu bilden und breiten sich bei einer kritischen Beanspruchung ins Innere des Materials aus, wobei die Rissausbreitungsrichtung anfänglich senkrecht zur Oberfläche erfolgt. In weiterer Folge bildet sich im Inneren des Materials eine kegelförmige Anordnung der Risse.<sup>(1), (2)</sup>

Von Auerbach wurde empirisch beobachtet, dass eine lineare Abhängigkeit zwischen der kritischen Last für die Kegelrissbildung und dem Radius des kugelförmigen Indenters besteht.

Das Auerbachgesetz ist im Widerspruch zur Auffassung, dass kegelförmige Risse zufolge der größten maximalen Zugspannung bei einer kritischen aufgetragenen Last entstehen, wenn die Festigkeit des Bulk-Materials überschritten wird. <sup>(3), (4)</sup>

In letzter Zeit konzentrierte man sich besonders auf die Erforschung des Verhaltens von heterogenen Keramiken mit großen Körnern und großen Eigenspannungen. Diese Art der Keramiken verhält sich spröde in typischen Festigkeitsprüfungen wie dem Zugversuch. Das Eintreten von Hertz'schen Rissen wird in solchen Materialien verzögert, stattdessen entsteht eine "quasi-plastische" Verformungszone (grauer Bereich in Abbildung 1), welche eine starke Scherbelastung unter der Kontaktzone bewirkt. Makroskopisch könnte man eine solche Materialreaktion mit jenen von Metallen vergleichen, mikroskopisch betrachtet entsteht eine "quasi-plastische" Verformungszone durch viele Mode II – Risse (Abbildung 2), dabei werden die Risse bei hohen Lasten an den Gitterdefekten initiiert. <sup>(5)</sup>

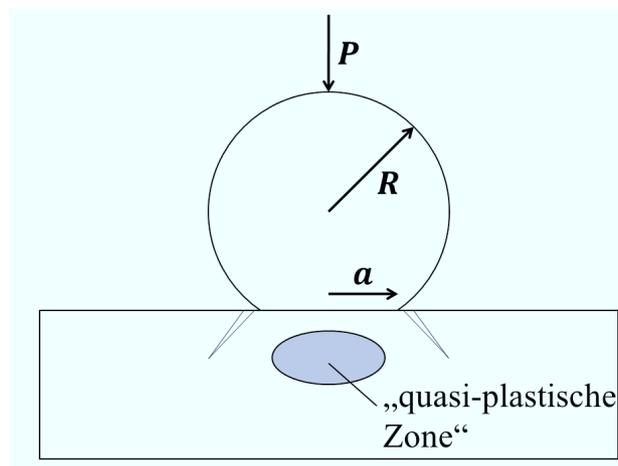


Abbildung 1: Quasi-plastische Verformungszone bei heterogenen Keramiken nach Lawn <sup>(1)</sup>

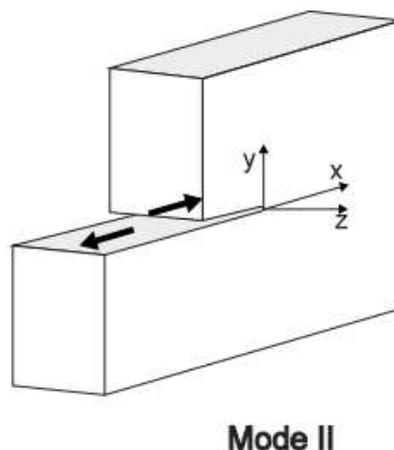


Abbildung 2: Beanspruchung von Mode II Rissen <sup>(6)</sup>

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist, einen Messstand zur akustischen Detektion von Rissen zu entwickeln, die in Folge einer kritischen Normallast in Proben entstehen. Dabei steht in dieser Arbeit das erste Auftreten der Risse (Erstschädigung) im Mittelpunkt des Interesses. Dieser Messaufbau soll die Möglichkeit bieten möglichst einfach und schnell typische Werte für die Erstschädigung in keramischen Materialien zu ermitteln.

Um eine Übersicht über verschiedene Kontaktgeometrien zu bekommen soll der Kugel-Platte Kontakt anhand von Kugeln mit verschiedenen Durchmessern durchgeführt werden. Weiters wird der Einfluss von unterschiedlichen Oberflächenqualitäten mit einem Kugeldurchmesser untersucht.

Als geometrisch intensivster Kontakt zwischen zwei gekrümmten Körpern gilt der Kontakt zwischen zwei Kugeln. Auch für diese Situation wird die erste Entstehung von Rissen ermittelt.

Abschließend wird versucht, einen Zusammenhang zwischen dem Verhalten beim Kugel-Kugel Kontakt und dem Verhalten im Crush-Test aufzuzeigen, bei dem nicht die Erstschädigung angezeigt wird, sondern die Belastung bis zum Kollaps des Kugel-Kugel Systems erfolgt. Dadurch sollte es möglich sein, aus der kritischen Kraft für die Erstschädigung auf die Kraft für die Totalschädigung zu schließen.

## 2 Grundlagen

---

In diesem Abschnitt wird ein Einblick in die Kontakttheorie nach Hertz vermittelt. Die verschiedenen Ansätze aus der Literatur für die analytische Lösung von Kontaktproblemen werden verglichen. Abschließend wird die Notation für diese Arbeit vorgegeben.

### 2.1 Grundannahmen in der Hertz Theorie

Ein Kontaktproblem entsteht, wenn die Oberflächen zweier Körper durch Normalkrafteinwirkung in Kontakt gebracht werden. Anfangs berühren sich Körper nur an einem Punkt. Bei Erhöhung der Last entsteht eine Kontaktfläche, die durch Hertz auch theoretisch beschrieben wurde. Aufgrund der aufgebrachten Normalkraft beim Kontakt der beiden Körper entsteht eine ungleichmäßige Druckverteilung in der resultierenden Kontaktfläche. Zur Lösung des Kontaktproblems werden folgende Voraussetzungen getroffen.

- Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes
- isotropes, homogenes und elastisches Werkstoffverhalten

Eine weitere Vereinfachung besteht darin, dass die Kontaktfläche, die durch das Eindringen der beiden Körper ineinander generiert wird, klein gegenüber den Körperabmessungen ist. Dann können die beiden einander berührenden Körper –auch wenn sie gekrümmt sind– als elastische Halbräume angesehen werden. Die entstehende Kontaktfläche wird beim Eindringen einer Kugel in eine ebene Probe, sowie beim Kontakt zweier Kugeln immer als kreisförmig angenommen. Diese Annahmen bewirken eine wesentliche Vereinfachung bei der Berechnung von Kontaktdruck und Kontaktspannung. <sup>(2), (7)</sup>

### 2.1.1 Kontakt zwischen einer starren Kugel und einem elastischen Halbraum

Zunächst wird der reibungslose Kontakt der Kugel mit einer ebenen Probe modelliert. Eine Kugel mit dem Radius  $R$  wird mit der Normalkraft  $P$ , die normal auf die Tangentialebene des Berührungspunktes wirkt, beaufschlagt. Die Probe wird als elastisch und homogen angesehen. Weiters soll die Kontaktfläche so klein sein, dass die Vereinfachung des elastischen Halbraumes gültig ist. Das resultierende Spannungsfeld in der Probe aufgrund der Normalkraft  $P$  ist anfangs elastisch, beim Überschreiten einer kritischen Normalkraft  $P_c$ , der sogenannten Erstschädigungskraft, können entweder Hertz-Risse („spröder Festkörper“) oder eine Schädigung der Probe unter der Oberfläche („quasi-plastischer Festkörper“) entstehen. Hier wird nur ein spröder Festkörper vorausgesetzt und angenommen, dass bei einer Überschreitung der kritischen Last Hertz Risse entstehen. <sup>(7)</sup>

Bei der Erhöhung der Normalkraft vom anfänglichen Punktkontakt, erfolgt eine Verschiebung der Oberfläche in der  $z$ -Richtung. In Abbildung 3 ist dies dargestellt, wobei  $u_z$  die Verschiebung in  $z$ -Richtung,  $R$  der Kugelradius und  $d$  die maximale Verschiebung in  $z$ -Richtung beschreibt. Das Formelzeichen  $r$  stellt den Kontaktradius dar, der anfangs Null ist und mit steigender Last immer größer wird. Der geometrische Sachverhalt wird analytisch in Gl. 1 dargestellt. <sup>(7)</sup>

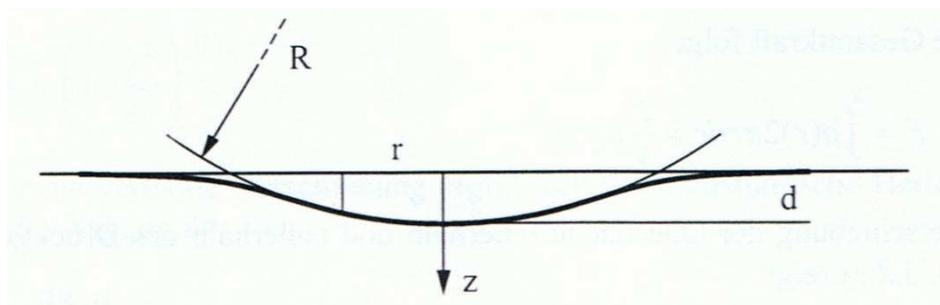


Abbildung 3: Verformung einer ebenen Oberfläche zufolge eines kugelförmigen Eindringkörpers unter Normkrafteinwirkung, aus <sup>(8)</sup>

$$u_z = d - \frac{r^2}{2R} \quad \text{Gl. 1}$$

Die Berechnung der Verschiebung eines elastischen Halbraums in  $z$ -Richtung zufolge einer aufgebrauchten Normalkraft  $P$  lässt sich durch die Elastizitätstheorie und geometrischen Zusammenhängen berechnen.

Die Druckverteilung  $p(r)$  im elastischen Halbraum folgt einer quadratischen Verteilung, wobei  $p_0$  den maximalen Kontaktdruck beschreibt.

$$p(r) = p_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{1/2}; \quad r^2 = x^2 + y^2 \quad \text{Gl. 2}$$

Da hier nur die Verschiebung in  $z$ -Richtung von Interesse ist, wird nur auf diese Verschiebung eingegangen. Um die Gleichung aus der Elastizitätstheorie anwenden zu dürfen, wird ein Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul  $E$  und der Querkontraktionszahl  $\nu$  benötigt, dieser Zusammenhang stellt der effektive Elastizitätsmodul  $E^*$  dar. In Gl. 4 bezeichnen  $x'$  und  $y'$  die normierten Koordinaten bezüglich  $x$  und  $y$ .

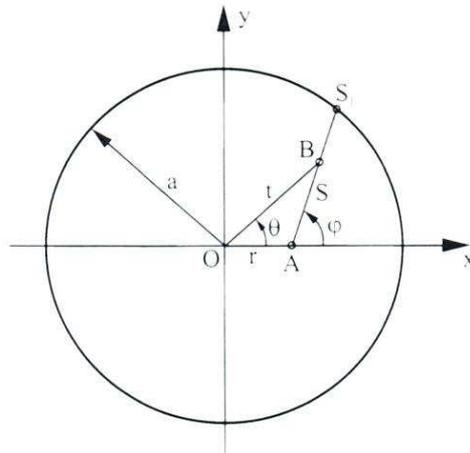
$$E^* = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \quad \text{Gl. 3}$$

Aufgrund der Rotationssymmetrie der Spannungsverteilung hängt die vertikale Verschiebung in einem Oberflächenpunkt nur vom Abstand  $r$  eines beliebigen Punktes vom Koordinatenursprung ab. Das bedeutet, es genügt die Verschiebungen von Punkten der  $x$ -Achse zu bestimmen.

$$u_z = \frac{1}{\pi E^*} \iint \frac{P(x' y')}{r} dx' dy' \quad \text{Gl. 4}$$

$$r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2} \quad \text{Gl. 5}$$

Es wird nun schematisch die Verschiebung eines Punktes  $B$  bestimmt und danach über alle möglichen Positionen der Kontaktfläche integriert um die Verschiebung in Abhängigkeit von der Position zu bestimmen. Die Verschiebung im Punkt  $B$  hängt aufgrund der Rotationssymmetrie ebenso nur vom Abstand  $t$  des Koordinatenursprungs ab (Abbildung 4). Für den Abstand  $t$  des Punktes vom Koordinatenursprung gilt Gl. 6, die Berechnung von  $t^2$  erfolgt durch die Anwendung des Cosinus Satzes.<sup>(8)</sup>



**Abbildung 4: Geometrische Betrachtung der Kontaktfläche zur Berechnung der Verschiebung eines beliebigen Punktes B, aus <sup>(8)</sup>**

$$t^2 = r^2 + s^2 + 2rs \cos \varphi \quad \text{Gl. 6}$$

Die dadurch resultierende Druckverteilung sieht folgendermaßen aus:

$$p(s, \varphi) = p_0 \left( 1 - \frac{r^2 + s^2 + 2rs \cos \varphi}{a^2} \right)^{1/2} \quad \text{Gl. 7}$$

$$= p_0 a (a^2 - r^2 - s^2 - 2rs \cos \varphi)^{1/2} \quad \text{Gl. 8}$$

$$\alpha^2 = a^2 - r^2, \beta = r \cos \varphi \quad \text{Gl. 9}$$

$$= p_0 a (\alpha^2 - 2\beta s - s^2)^{1/2} \quad \text{Gl. 10}$$

Durch Einsetzen in Gl. 4 der Elastizitätstheorie erhält man:

$$u_z = \frac{1}{\pi E^*} p_0 a \int_0^{2\pi} \left( \int_0^{s_1} (\alpha^2 - 2\beta s - s^2)^{1/2} ds \right) d\varphi \quad \text{Gl. 11}$$

$s_1$  ist die positive Wurzel der Gleichung:  $\alpha^2 - 2\beta s - s^2 = 0$ ; das resultierende Integral über  $ds$  berechnet sich zu:

$$\int_0^{s_1} (\alpha^2 - 2\beta s - s^2)^{1/2} ds = -\frac{1}{2} \alpha \beta + \frac{1}{2} (\alpha^2 + \beta^2) \cdot \left( -\frac{\pi}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\beta}{\alpha} \right) \right) \quad \text{Gl. 12}$$

Bei der Integration über  $d\varphi$  fallen alle Glieder mit  $\alpha\beta$  und  $\tan^{-1}(\ )$  heraus. Die verbleibenden Glieder ergeben:

$$u_z = \frac{1}{\pi E^*} p_0 a \int_0^{2\pi} \frac{\pi}{4} d\varphi (\alpha^2 + \beta^2) = \frac{(1 - \nu^2) p_0}{4 E a} \int_0^{2\pi} (a^2 - r^2 + r^2 \cos^2 \varphi) d\varphi \quad \text{Gl. 13}$$

$$u_z = \frac{1}{E^*} \frac{\pi p_0}{4 a} (2a^2 - r^2) \quad \text{Gl. 14}$$

Jetzt müssen die Parameter  $p_0$  und  $a$  so gewählt werden, dass sich exakt die Verschiebung  $u_z$  ergibt, das erfolgt durch Gleichsetzen der beiden Definitionen der Verschiebungen von Gl. 1 und Gl. 14.

$$\frac{\pi p_0}{4 E^* a} (2a^2 - r^2) = d - \frac{r^2}{2R} \quad \text{Gl. 15}$$

$$\Rightarrow a = \frac{\pi p_0 R}{2 E^*} \quad \text{Gl. 16}$$

$$\Rightarrow d = \frac{\pi a p_0}{2 E^*} \quad \text{Gl. 17}$$

Durch den Abgleich von  $a$  und  $d$  kann der Zusammenhang mit dem Radius  $R$  der Kugel hergestellt werden.

$$a^2 = R d \quad \text{Gl. 18}$$

Nun gilt für den maximalen Druck  $p_0$  der Ausdruck in Gl. 19.

$$p_0 = \frac{2}{\pi} E^* \left( \frac{d}{R} \right)^{1/2} \quad \text{Gl. 19}$$

Um nun vom Kontaktdruck  $p(r)$  als Funktion des Kontaktradius  $r$  ( $0 \leq r \leq a$ ) auf die Normalkraft  $P$  zu schließen, muss der Kontaktdruck  $p(r)$  über die gesamte Kreisfläche integriert werden.

$$P = \int_0^a p(r) 2\pi r dr = \frac{2}{3} p_0 \pi a^2 = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} d^{3/2} \quad \text{Gl. 20}$$

Mittels der Beziehungen für  $p_0$  und  $P$  kann der Kontaktdruck  $p_0$  und der Kontaktradius  $a$  auch als Funktion der Normalkraft  $P$  berechnet werden.

$$p_0 = \left( \frac{4PE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3} \quad \text{Gl. 21}$$

$$a = \left( \frac{3PR}{4E^*} \right)^{1/3} \quad \text{Gl. 22}$$

Um nun die Spannungen im Probenmaterial ermitteln zu können wird entweder der mittlere Kontaktdruck  $p_m$  oder der maximale Kontaktdruck  $p_0$  benötigt. Der mittlere Kontaktdruck ergibt sich aus der aufgebrachten Normalkraft  $P$  und der projizierten Kontaktfläche  $\pi a^2$ .

$$p_m = \frac{P}{\pi a^2} \quad \text{Gl. 23}$$

Zufolge der allgemeinen Druckverteilung lässt sich die Spannungsverteilung in Abhängigkeit vom Kontaktradius  $r$  darstellen, im Wesentlichen ist nur die Radialspannungsverteilung  $\sigma_r$  von Bedeutung für die Entstehung von Hertz Rissen in spröden Festkörpern. Zuerst wird die allgemeine Radialspannungsverteilung in Gl. 24 gezeigt. <sup>(2), (7), (8), (9)</sup>

$$\frac{\sigma_r}{p_m} = \frac{1-2\nu}{2} \left( \frac{a^2}{r^2} \right) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{3/2} \right] - \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2}; 0 \leq r \leq a \quad \text{Gl. 24}$$

$$\frac{\sigma_r}{p_m} = \frac{1-2\nu}{2} \left( \frac{a^2}{r^2} \right); r > a$$

In Abbildung 5 ist die Radialspannungsverteilung dargestellt.

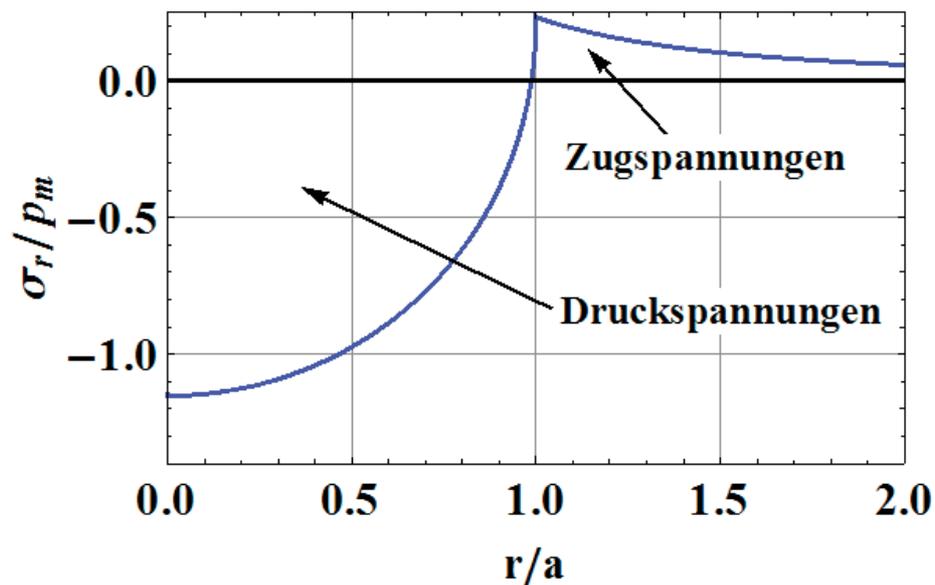


Abbildung 5: Radialspannungsverteilung an der Oberfläche eines elastischen Halbraumes mit  $\nu = 0,27$

Wenn man die Spannungsverteilung näher betrachtet sieht man, dass am äußersten Rand, an  $r = a$ , eine Zugspannungskomponente auftritt. Nach außen hin nimmt die Zugspannung ab, das Maximum der Zugspannung ist in nachfolgender Gl. 25 gegeben.

$$\sigma_{Zug,Max} = \frac{1 - 2\nu}{2} \cdot p_m \quad \text{Gl. 25}$$

### 2.1.2 Kontakt zwischen zwei elastischen Körpern mit gekrümmter Oberfläche

Bei einem Kontakt zwischen einer ebenen Fläche (elastischer Halbraum) und einem starren Körper mit den Hauptkrümmungsradien  $R_{11}$  und  $R_{12}$  ergibt sich ein elliptisches Kontaktgebiet. Dieses tritt auch bei einem Kontakt zwischen zwei elastischen Kugeln in einer besonderen Form auf, weil die Halbachsen des elliptischen Kontaktgebiets gleich lang sind. Die vorher erarbeiteten Ergebnisse für den Kontaktradius, den maximalen Druck und der Normalkraft bedürfen nur kleinen Modifikationen um sie für zwei gekrümmte Oberflächen elastischer Körper in Kontakt gültig zu machen. <sup>(3), (7), (8), (9)</sup>

1. Falls beide Körper elastisch sind, müssen sie nicht notwendigerweise den gleichen Elastizitätsmodul haben. In diesem Fall bewirkt ein effektiver Elastizitätsmodul  $E^*$ , der sich wie folgt aus den elastischen Konstanten der beiden Körpern zusammensetzt, eine Beziehung zwischen den beiden Körpern.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_{Ind}}{E_{Ind}} + \frac{1 - \nu_{Probe}}{E_{Probe}} \quad \text{Gl. 26}$$

$E_{Ind}$  und  $E_{Probe}$  sind die verschiedenen Elastizitätsmoduli der beiden Körper,  $\nu_{Ind}$  und  $\nu_{Probe}$  sind die Poisson-Zahlen (Querkontraktionszahlen) für das jeweilige Material.

2. Weiters müssen die beiden Radien der Kugeln durch einen relativen Krümmungsradius  $R_{rel}$  in Beziehung gesetzt werden:

$$\frac{1}{R_{rel}} = \frac{1}{R_{Ind}} + \frac{1}{R_{Probe}} \quad \text{Gl. 27}$$

Dieser Zusammenhang gilt in jedem Fall, selbst wenn der Radius einer der beiden gekrümmten Körper negativ ist. Die möglichen Krümmungsverhältnisse sind in Abbildung 6 gezeigt.

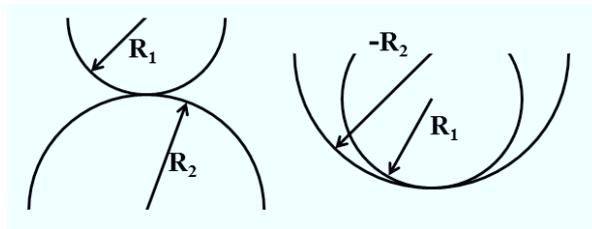


Abbildung 6: mögliche auftretende Krümmungsverhältnisse, nach <sup>(8)</sup>

Das Hertzsche Kontaktproblem von zwei elastischen Körpern ist somit dem in 2.1.1 beschriebenen Problem (starre Kugel auf elastischem Halbraum) äquivalent.

## 2.2 Vergleich von theoretischen Ansätzen aus diverser Literatur

Für den Kontakt zwischen einer Kugel (Indenter) und einer flachen Probe ist der Radius des Eindringkörpers ausschlaggebend. Da der Radius der Probe  $R_{probe} = \infty$  ist und die relative Krümmung durch  $\frac{1}{R_{rel}} = \frac{1}{R_{Ind}} + \frac{1}{R_{Probe}}$  bestimmt wird, ist der relative Radius  $R_{rel}$  für den Kugel-Platte Kontakt:

$$R_{rel} = R_{Ind} \quad \text{Gl. 28}$$

Der Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl des Indenters und der Probe werden durch den effektiven Elastizitätsmodul  $E^*$  ausgedrückt:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{E_{Ind}} + \frac{1}{E_{Probe}} \quad \text{Gl. 29}$$

Durch den effektiven Elastizitätsmodul  $E^*$  wird eine Beziehung zwischen dem Indentermaterial und dem Probenmaterial hergestellt. In den hier angeführten Betrachtungen sind das Indenter- und das Probenmaterial ident.

### 2.2.1 Berechnung nach Lawn:

Der Vorfaktor  $k_{Lawn}$  setzt die Querkontraktionszahlen ( $\nu_{Ind}, \nu_{Probe}$ ) und die Elastizitätsmoduli ( $E_{Ind}, E_{Probe}$ ) von Probe und Indenter in Beziehung. Für die Berechnung des Kontaktradius  $a_{Lawn}$  geht weiters die aufgebrauchte Normalkraft  $P$  ein. Wichtig ist, dass bei

der Berechnung des Kontaktradius nach Lawn  $a_{Lawn}$  immer der Elastizitätsmodul der Probe  $E_{Ind}$  eingesetzt wird.<sup>(10)</sup>

$$k_{Lawn} = \frac{9}{16} \left[ (1 - \nu_{Ind}^2) + (1 - \nu_{Probe}^2) \cdot \frac{E_{Ind}}{E_{Probe}} \right] \quad \text{Gl. 30}$$

$$a_{Lawn} = \left( \frac{4 \cdot k_{Lawn} \cdot P \cdot R_{rel}}{3 \cdot E_{Ind}} \right)^{1/3} \quad \text{Gl. 31}$$

### 2.2.2 Berechnung nach Fischer Cripps:

Im Wesentlichen ist die Berechnung des Kontaktradius nach Fischer Cripps sehr ähnlich zur Berechnung nach Lawn, der Vorfaktor  $k_{Lawn}$  wird nicht benötigt und weiters wird immer der effektive Elastizitätsmodul  $E^*$  eingesetzt, dadurch gehen die elastischen Konstanten (Elastizitätsmodul ( $E_{Ind}$ ,  $E_{Probe}$ ) und Querkontraktionszahl ( $\nu_{Ind}$ ,  $\nu_{Probe}$ ) von Indenter und Probe) direkt in die Kontaktradienberechnung ein.<sup>(3)</sup>

$$a_{Fischer-Cripps} = \left( \frac{3 \cdot P \cdot R_{rel}}{4 \cdot E^*} \right)^{1/3} \quad \text{Gl. 32}$$

### 2.2.3 Berechnung nach Timoshenko:

Für die Kontaktradienberechnung nach Timoshenko werden vorerst zwei k-Faktoren definiert, nämlich  $k_1$  und  $k_2$  um die Querkontraktionszahlen ( $\nu_{Ind}$ ,  $\nu_{Probe}$ ) und den Elastizitätsmodul ( $E_{Ind}$ ,  $E_{Probe}$ ) von Indenter und Probe einfließen zu lassen. In weiterer Folge kommen nur noch konstante Faktoren, der Radius des Indenters  $R_{Ind}$  und die aufgebrauchte Normalkraft  $P$  in der Berechnung vor.<sup>(9)</sup>

$$k_1 = \frac{1 - \nu_{Ind}^2}{\pi \cdot E_{Ind}}; \quad k_2 = \frac{1 - \nu_{Probe}^2}{\pi \cdot E_{Probe}} \quad \text{Gl. 33}$$

$$a_{Timoshenko} = \left( \frac{(k_1 + k_2) \cdot 3 \cdot \pi \cdot P \cdot R_{rel}}{4} \right)^{1/3} \quad \text{Gl. 34}$$

### 2.2.4 Berechnung nach Popov:

Die Kontaktradienberechnung nach Popov ist völlig ident mit der aus Fischer Cripps. In weiterer Folge wird die Berechnung nach Popov beim Kugel-Platte Kontakt nicht mehr separat angeführt. <sup>(8)</sup>

$$a_{Popov} = \left( \frac{3 \cdot P \cdot R_{rel}}{4 \cdot E^*} \right)^{1/3} \quad \text{Gl. 35}$$

### 2.2.5 Vergleich aller Berechnungsarten

Alle Formeln für die Berechnung des Kontaktradius  $a$  liefern exakt das gleiche Ergebnis. Ein wichtiger Aspekt ist, dass bei der Berechnung des Kontaktradius nach Lawn (Gl. 31) immer nur der Elastizitätsmodul  $E_{Ind}$  im Nenner stehen darf, da ansonsten die Berechnung für den Kontaktradius  $a_{Lawn}$  ein falsches Ergebnis liefert. Für die Berechnung des Kontaktradius  $a$  in Abhängigkeit von der aufgebrachten Normalkraft  $P$  und dem mittleren Kontaktdruck  $p_m$  beziehungsweise der maximal auftretenden Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  wurden in Tabelle 1 aufgelistete Materialkennwerte für Siliziumnitrid gewählt.

**Tabelle 1: Materialkennwerte für  $\text{Si}_3\text{N}_4$  die theoretische Betrachtung der Hertz-Theorie <sup>(11)</sup>**

<b>Eigenschaft:</b>	<b>Einheit:</b>	<b>Wert:</b>
Elastizitätsmodul E:	[GPa]	306
Querkontraktionszahl $\nu$ :	[N]	0,268

In Abbildung 7 ist eine grafische Darstellung des Kontaktradius in Abhängigkeit von der aufgebrachten Normalkraft  $P$  für alle in dieser Arbeit relevanten Kugeldurchmesser (5 mm, 10,3 mm und 12,7 mm) gezeigt.

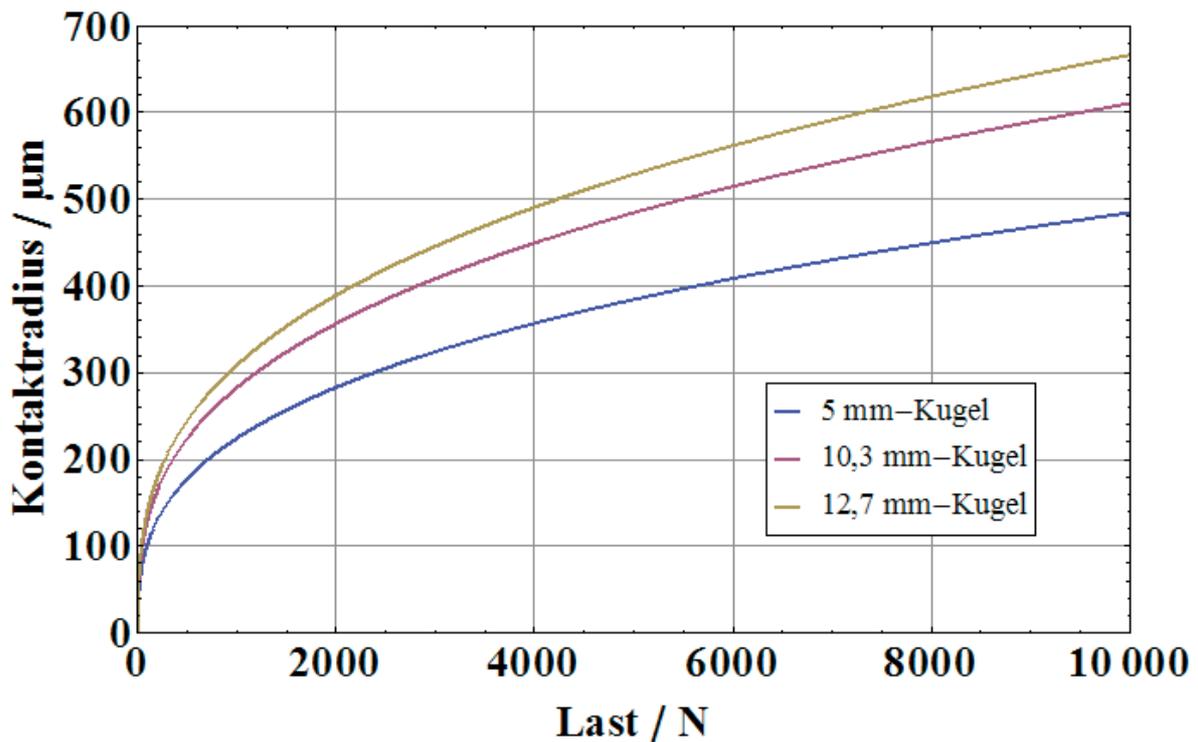


Abbildung 7: Kontaktradius  $a$  zufolge einer Normalkraft  $P$  beim Kugel-Platte Kontakt für drei unterschiedliche Kugeldurchmesser

Im nächsten Schritt werden der mittlere Kontaktdruck  $p_m$  und die maximal auftretende Zugspannung am Kontaktring  $\sigma_{Zug,Max}$  für vier Berechnungsarten verglichen. Dieser Vorgang stellt sich als sehr einfach dar, da jede der vier Berechnungsarten den gleichen Ansatz für die weitere Vorgehensweise verwendet. So werden der maximale Kontaktdruck  $p_0$  und der mittlere Kontaktdruck  $p_m$  durch  $p_0 = 1,5 \cdot p_m$  in Beziehung gesetzt und der maximale Kontaktdruck über die projizierte Fläche  $\pi a^2$  und einem Faktor von 1,5 folgendermaßen berechnet.

$$p_0 = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot a^2} \quad \text{Gl. 36}$$

Aufgrund der gleichen Vorgangsweise sind auch alle Ergebnisse ident, wodurch klar wird, dass auch hier alle vier Theorien gleichwertig sind. In Abbildung 8 wird der mittlere Kontaktdruck  $p_m$  zufolge der aufgebrachten Normalkraft  $P$  dargestellt, wiederum sind alle für diese Arbeit relevanten Kugeldurchmesser dargestellt.

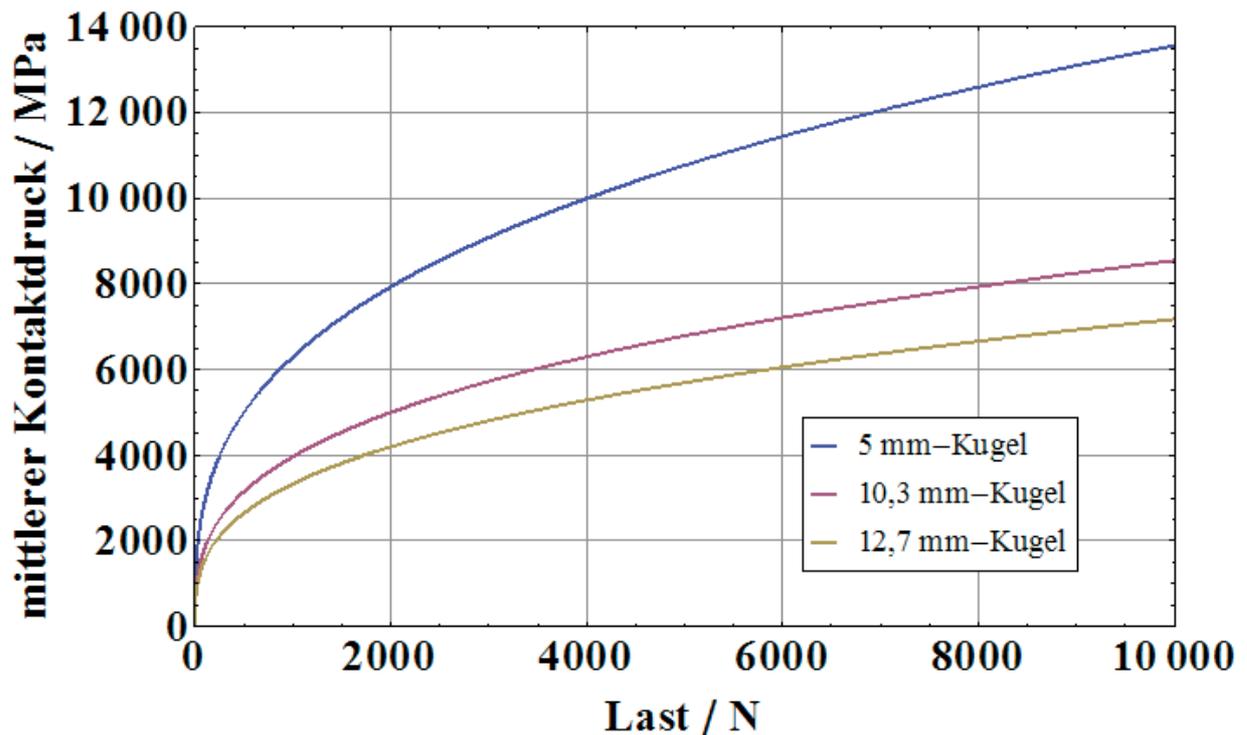


Abbildung 8: mittlerer Kontaktdruck  $p_m$  zufolge einer Normalkraft  $P$  beim Kugel-Platte Kontakt für drei unterschiedliche Kugeldurchmesser

Für die Berechnung der maximalen Zugspannung ist es nötig zu wissen, wo die maximale Zugspannung auftritt, dafür muss man sich die Druckverteilung  $p(r)$  in der Probe genauer ansehen.

$$p(r) = p_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{1/2} \quad \text{Gl. 37}$$

Um den Druck maximal werden zu lassen, dadurch  $p(r) = p_0$  ist, muss  $r$  gleich null sein. In der Mitte des Kontaktfeldes herrscht deshalb der maximale Druck  $p_0$ , dadurch auch die maximale Druckspannung. Aufgrund dieser Erkenntnis muss die maximale Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  außerhalb des Kontaktkreises liegen. Die Berechnung in Abhängigkeit von der aufgetragenen Normalkraft  $P$  lautet wie folgt:

$$\sigma_{Zug,Max} = \frac{1 - 2\nu_{Probe}}{3} \cdot p_0 \quad \text{Gl. 38}$$

Auch die Berechnungen der maximalen Zugspannungen  $\sigma_{Zug,Max}$  knapp außerhalb des Kontaktkreises führen auf gleiche Ergebnisse aller vier Theorien hin, somit ist durch die Spannungsberechnung der endgültige Beweis erbracht, dass alle vier Theorien gleichwertig

sind und dadurch unabhängig voneinander verwendet werden können. In Abbildung 9 wird die maximale Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  zufolge der aufgebrachten Normalkraft  $P$  dargestellt.

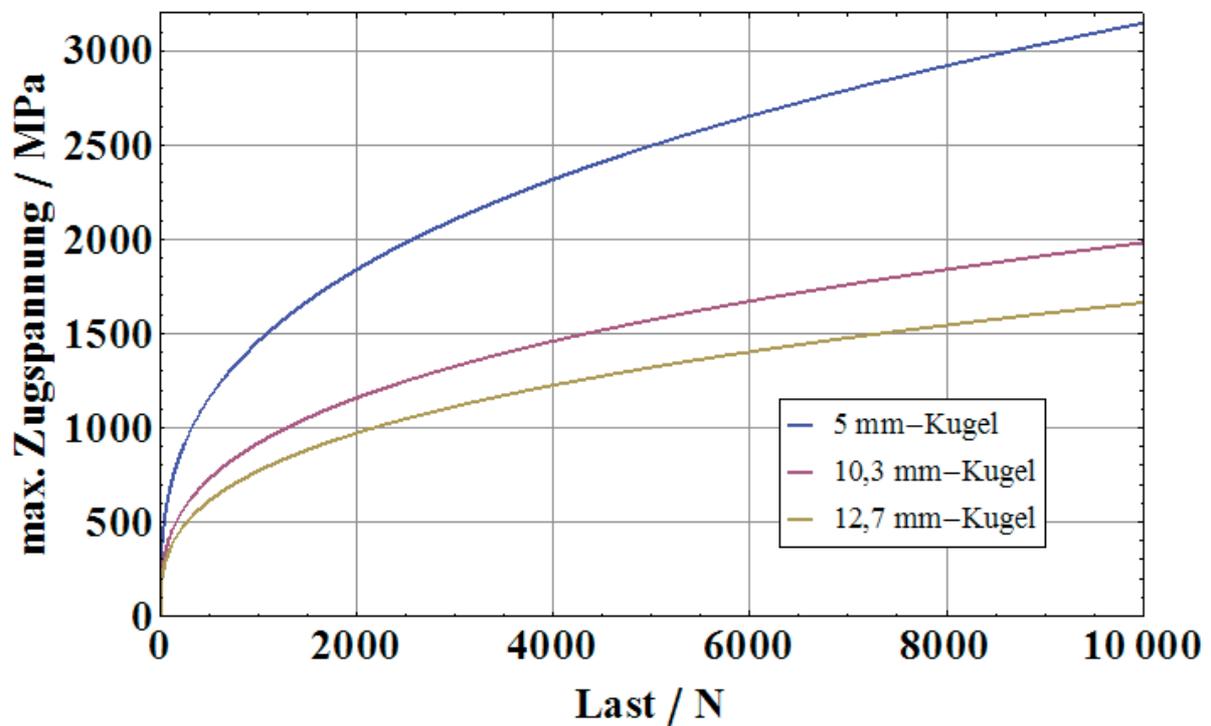


Abbildung 9: maximale Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  zufolge einer Normalkraft  $P$  beim Kugel-Platte Kontakt für drei unterschiedliche Kugeldurchmesser

### 2.2.6 Kugel-Kugel Kontakt:

Um nun die kontaktmechanischen Daten für den Kugel-Kugel Kontakt zu ermitteln, muss die relative Krümmung mithilfe von Gl. 27 neu berechnet werden. Für den Radius der Probe  $R_2$  wird nun der Kugelradius eingesetzt und somit die Kontaktverhältnisse zwischen den beiden Kugeln hergestellt. Die restlichen Schritte der Kontaktradienberechnung und der Kontaktspannungs- beziehungsweise Kontaktdruckberechnung bleiben ident; auch für den Kugel-Kugel Kontakt sind die Ergebnisse für alle vier Theorien gleich, deshalb dürfen alle vier Theorien gleichwertig verwendet werden.

In Abbildung 10 werden wieder einheitlich für  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (siehe Tabelle 1) die Kontaktradien in Abhängigkeit von der aufgetragenen Normalkraft  $P$  dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Kontaktradien bei gleicher Last im Vergleich zum Kugel-Platte Versuch deutlich geringer sind, was plausibel ist.

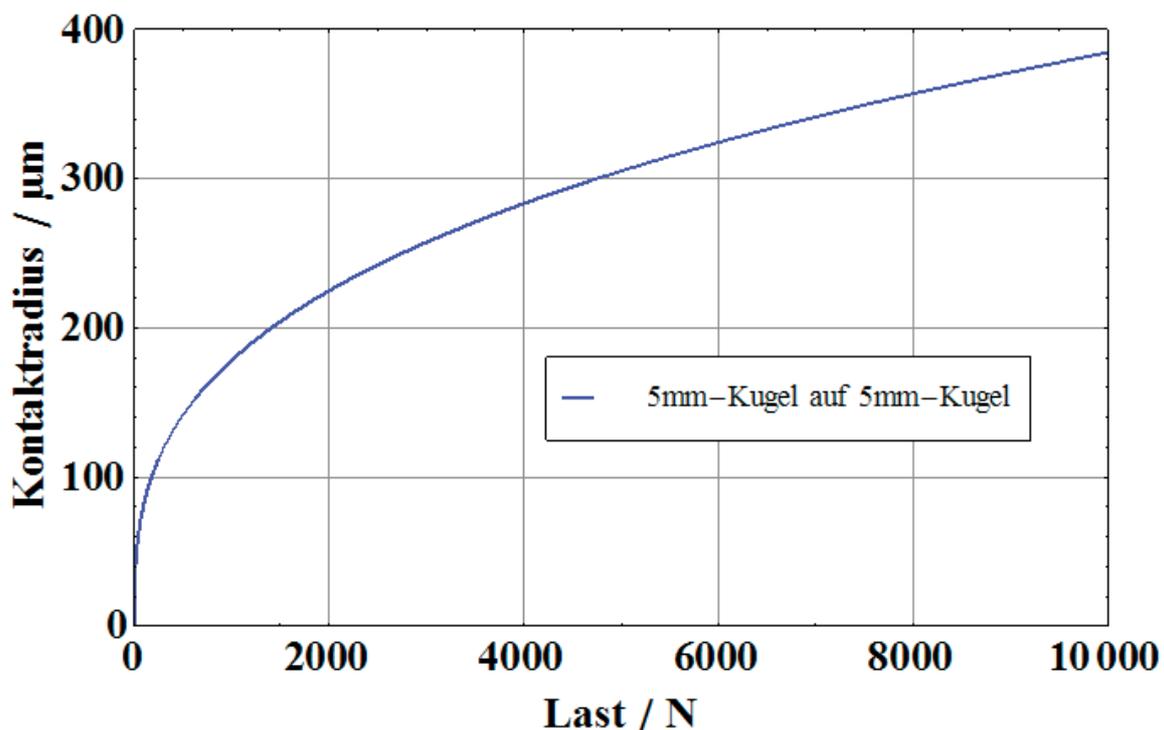


Abbildung 10: Kontaktradius  $a$  zufolge einer Normalkraft  $P$  beim Kugel-Kugel Kontakt

Abbildung 11 zeigt den mittleren Kontaktdruck  $p_m$  beziehungsweise die maximale Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  des Kontakts beim Kugel-Kugel Kontakt. Sowohl die maximale Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  als auch der mittlere Kontaktdruck  $p_m$  sind in Abhängigkeit von der aufgetragenen Normalkraft  $P$  wesentlich größer als beim Kugel-Platte Kontakt, da der Kugel-

Kugel Kontakt eine wesentlich intensivere Belastung für das Probenmaterial beziehungsweise das Indentermaterial darstellt.

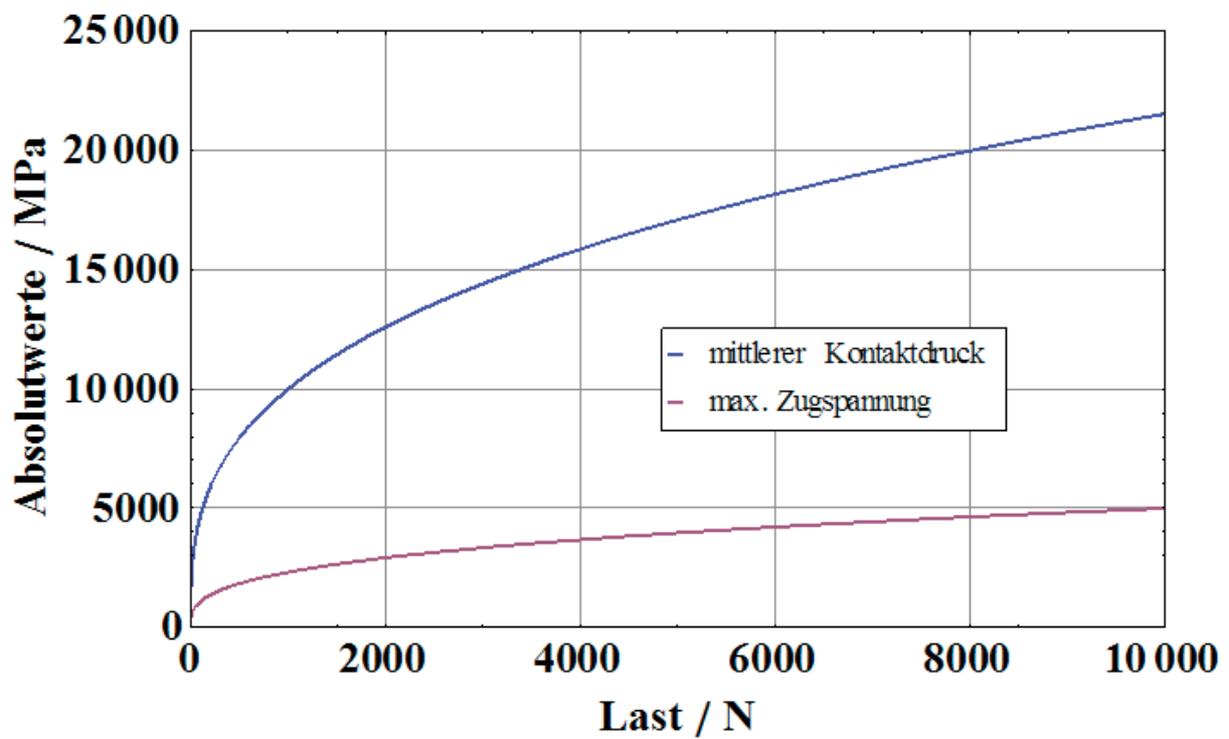


Abbildung 11: Absolutwerte des mittleren Kontaktdrucks  $p_m$  beziehungsweise der maximalen Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  zufolge einer Normalkraft  $P$  beim Kugel-Kugel Kontakt

## 2.3 Verwendete Notation und Formeln

Da im vorigen Kapitel nachgewiesen wurde, dass alle Ansätze aus der Literatur gleichwertig sind, wird in dieser Arbeit die Variante nach Fischer-Cripps verwendet und die Notation angepasst um die Berechnung übersichtlicher zu gestalten. Die gewählte Notation wird von Gl. 39 bis Gl. 44 übersichtlich dargestellt. Ab diesem Punkt wird nur noch mit der gezeigten Notation gearbeitet.

Effektiver Kontaktradius:

$$R_{rel} = \left( \frac{1}{R_{Ind}} + \frac{1}{R_{Probe}} \right)^{-1} \quad \text{Gl. 39}$$

Effektiver Elastizitätsmodul:

$$E_{eff} = \left( \frac{1}{E_{Ind}} + \frac{1}{E_{Probe}} \right)^{-1} \quad \text{Gl. 40}$$

Kontaktradius:

$$a = \left( \frac{3 \cdot P \cdot R_{rel}}{4 \cdot E_{eff}} \right)^{1/3} \quad \text{Gl. 41}$$

Maximaler Kontaktdruck:

$$p_0 = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot a^2} \quad \text{Gl. 42}$$

Mittlerer Kontaktdruck:

$$p_m = \frac{p_0}{1,5} \quad \text{Gl. 43}$$

Maximale Zugspannung:

$$\sigma_{Zug,Max} = \frac{1 - 2\nu}{2} \cdot p_m \quad \text{Gl. 44}$$

## 3 Experimentelles

---

In diesem Abschnitt werden der Versuchsaufbau und damit die Einprägung von Kontaktspannungen beschrieben. Des Weiteren wird die Art der Aufnahme von akustischen Signalen und deren Verarbeitung erläutert.

### 3.1 Konzept

Es soll ein einfacher Druckversuch an einer Universalprüfmaschine durchgeführt werden. Mittels eines Ultraschallmikrophons sollen der Zeitpunkt der Entstehung von Rissen aufgenommen und die dabei entstehenden Signale in einem dafür geeigneten Gerät verarbeitet werden. Ein wichtiger Eckpunkt ist, die auf die Probe wirkenden Normalkräfte mit den akustischen Signalen der Ultraschallmikrophone abzugleichen und die Erstschädigung exakt zu erkennen und zu definieren. Mithilfe eines Stereomikroskops sollen das Ausmaß der Erstschädigung ermittelt und Rissgrößen bestimmt werden, sodass ein Vergleich mit theoretischen Modellen möglich wird. Abschließend soll die Risstiefe gemessen werden. Dazu müssen die Proben zerschnitten und eingebettet werden, um die Risse freizulegen und sie einer mikroskopischen Beobachtung zugänglich zu machen.

### 3.2 Aufbau

Um Hertz Risse in spröden Festkörpern wie Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) zu erzeugen wird eine sehr steife Prüfmaschine benötigt, durch die hohe Steifigkeit wird wenig Energie in der Maschine gespeichert. Stoppt die Maschine nach dem Erkennen einer ersten Schädigung, so erfolgt dann kein Nachfedern des Querhauptes, was eine weitere unerwünschte Schädigung verursachen könnte.

Die Kraftereinleitung erfolgt durch eine Universalprüfmaschine des Typs MIDI der Firma Messphysik (Abbildung 12), indem die Verschiebung des oberen Querhauptes eine Normalkraft auf den Probenkörper, welcher am unteren Auflager befestigt ist, bewirkt. Die Auflager der Prüfmaschine sind ebenso wie die Kugeln aus Siliziumnitrid gefertigt, spezielle Vorrichtungen um die Kugeln gegen Verrutschen abzusichern, wurden aus Stahl (St600) gefertigt. Um die Position der Kugeln im Versuch zu fixieren wurden die Auflager mit Vertiefungen versehen (Diese Vertiefungen wurden durch Druckbelastung erzeugt). So kann gewährleistet werden, dass die Kugeln während des Versuches eine ideale Position aufweisen.

Der Verlauf der Normalkraft mit der Zeit, wird durch eine 25kN Kraftmessdose aufgenommen und als Spannungssignal an die Steuereinheit (DOLI EDC 580) weitergegeben.



**Abbildung 12: Universalprüfmaschine MIDI mit zugehöriger Mess- und Steuereinheit DOLI EDC 580 und dem Servoantriebsverstärker**

Die Mess- und Steuereinheit DOLI EDC 580 übernimmt die Kommunikation zwischen der Prüfmaschine und dem PC. Die verarbeiteten Signale werden nun über eine Schnittstelle an den PC weitergegeben und können durch den Anwender weiter verarbeitet und dargestellt werden. Vom PC aus werden Signale an die Steuereinheit der DOLI EDC 580 geschickt, um die exakte, zuvor programmierte Prüfmaschinenbewegung vorzugeben. Die Programmierung erfolgt durch die sogenannte „Blockprogrammierung“, die jede Aktion der Prüfmaschine genau vorgibt, und die somit individuell auf die Bedürfnisse der Messung abgestimmt ist. Als Grundlage für die Blockprogrammierung diente ein detaillierter Versuchsablauf, der dann als Befehlskette programmiert wurde. Der Versuch wird zuerst mit einem definierten Abstand zwischen den Auflagern starten, die Prüfmaschine beginnt nach dem Einlegen der Probe mit der Bewegung in Richtung des anderen Auflagers, das heißt in Richtung des Prüfkörpers. Beim Kontakt zwischen dem Prüfkörper und der von oben kommenden Siliziumnitrid Kugel soll die Maschine bei einer sehr geringen definierten Vorkraft (zum Beispiel 5 N) stoppen, um die exakte Ausrichtung der Probe zu gewährleisten. In Tabelle 2 erfolgt eine Gegenüberstellung der Blockprogrammierung mit der Bedeutung im Versuchsablauf.

Tabelle 2: Beschreibung der Blockprogrammierung

<b>Programm:</b> STOP TARE LOAD TARE STROKE SPEED 1 mm/min DOWN LOAD >= 5 N STOP CLOCK 10 sec SPEED 1 mm/min DOWN ENDTEST	Maschinenstopp
	tarieren der Kraftmessdose
	tarieren der Wegaufnehmer
	Geschwindigkeit des Querhauptes von 1 mm/min
	Richtung des Querhauptes: nach unten
	bis zu einer Last von 5N
	Maschinenstopp
	Timer mit Countdown von 10s
	Geschwindigkeit des Querhauptes von 1 mm/min
	Richtung des Querhauptes: nach unten
	Ende des Tests

### 3.2.1 VALLEN Acoustic Emission (VALLEN AE)

Um nun akustische Signale während der Messung detektieren zu können, müssen die Ultraschallmessköpfe in der Nähe der Prüfkörper an den Auflagern angebracht werden. Wie in Abbildung 13 gezeigt wurden zwei Messpunkte gewählt, ein Messpunkt am oberen und am unteren Auflager. Die Ultraschallmessköpfe wurden mittels Klebeband fest mit dem Auflager verbunden und zusätzlich mit Elektrodengel benetzt um die Schallübertragung zu verbessern.

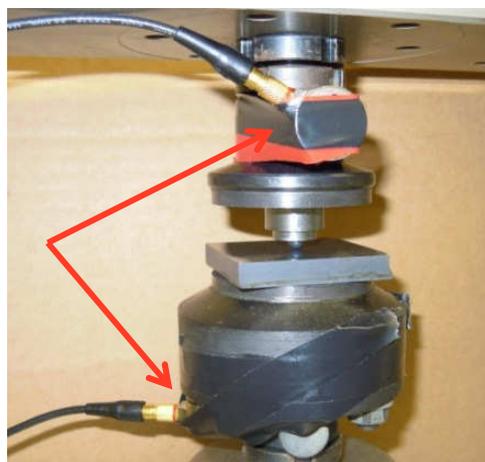
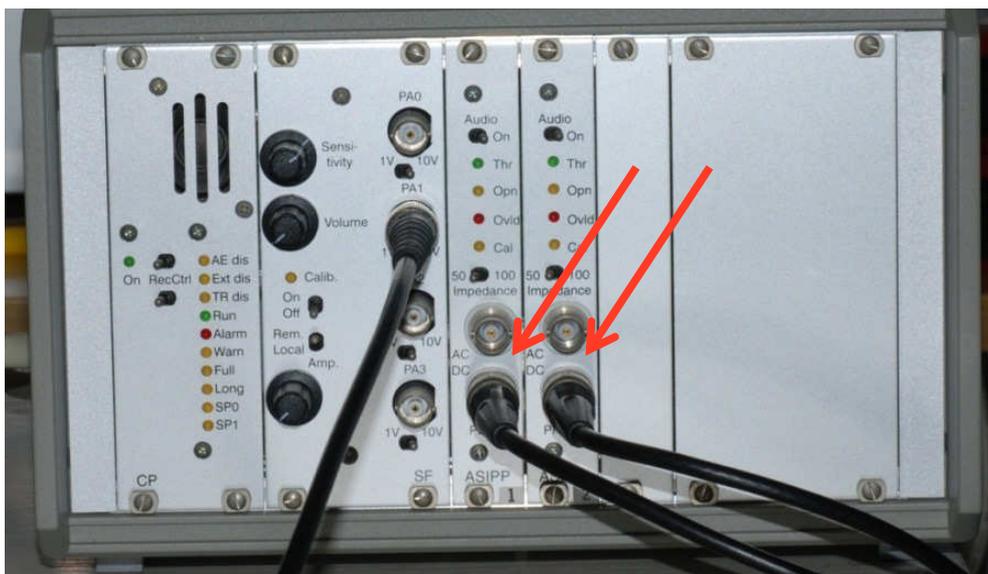


Abbildung 13: Ultraschallmessköpfe (rote Pfeile) an den Auflagern beim Kugel-Platte Versuch

Die detektierten Schallsignale werden vom Ultraschallmikrophon über einen Messvorverstärker in das Ultraschallmessgerät des Typs VALLEN Acoustic Emission (VALLEN AE) geschickt. Die Daten werden direkt über eine PC-Schnittstelle geleitet und aufgezeichnet. Um Störsignale auszufiltern wird ein unterer Grenzwert für die Aufzeichnung der Messsignale eingestellt. Die exakte Einstellung der Ultraschallmikrophone ist im Anhang ersichtlich, dabei handelt es sich um die tatsächlich verwendeten Einstellungen bei den Versuchen.

Durch die Aktivierung der Lautsprecher am Special Functions Panel des VALLEN AE ist es möglich eine „Live“ Wiedergabe der detektierten Grenzwertüberschreitungen zu hören. Da es nicht möglich ist akustische Signale direkt als Abbruchparameter der DOLI EDC 580 zuzuführen, musste eine Alternative gefunden werden. Das Alarmsignal bei einer vordefinierten oberen Grenzwertüberschreitung des VALLEN AE stellt eine Lösung für dieses Problems dar, bei der Überschreitung des oberen Grenzwertes fällt die Spannung eines Pins des 9-poligen D-Sub Alarmsteckers von fünf auf null Volt ab. So musste nur noch ein passender Stecker angebracht werden, um diesen Spannungsabfall in der DOLI EDC 580 als Abbruchparameter einzubringen und definieren zu können.

Für die Überlagerung der akustischen Signale und der aufgebrachten Kraft wurde der parametrische Input PA1 des VALLEN AE verwendet (Abbildung 14). So konnte eine zeitgleiche Darstellung des Kraftverlaufes und der aufgenommenen Signale der Ultraschallmessköpfe erzielt werden, um den akustischen Signalen die dabei aufgebrachte Kraft zuzuordnen. Die Konfiguration des parametrischen Eingangs befindet sich im Anhang.



**Abbildung 14: VALLEN AE mit angeschlossenen Ultraschallmessköpfen (siehe Pfeile) und dem parametrischen Eingang**

### 3.2.2 Datenauswertung

Die Auswertung der aufgenommenen Daten erfolgt über eine Tabelle der akustischen Signale mit den zugehörigen elektrischen Spannungen, die am analogen Output der DOLI EDC 580 anliegen, und die am parametrischen Input PA1 des VALLEN AE aufgenommen wurden. Mithilfe der VALLEN Visual AE Software ist es möglich die Spannungssignale am parametrischen Input auf Kraftsignale umzurechnen, falls der Verlauf des Spannungsanstiegs bei gleichmäßig steigender Kraft am analogen DOLI EDC 580 Ausgang linear verläuft. Dadurch ist eine Leermessung bei verschiedenen Kräften nötig, um aussagekräftige Spannungs-Kraft-Zusammenhänge herzustellen. Wie sich herausstellte, ist der Zusammenhang zwischen dem analogen Spannungsausgang der DOLI EDC 580 und der Kraft an der MIDI-Universalprüfmaschine linear. So konnte die Funktion der parametrischen Umrechnung von einem Spannungssignal in ein Kraftsignal verwendet werden. Durch die Einstellung des Offsets und der Steigung der Geraden war die Umrechnung möglich und die Zuordnung der akustischen Signale zu den angelegten Kräften äußerst simpel. Abbildung 15 zeigt die Auswertung des Zusammenhangs zwischen der Ausgangsspannung an der DOLI EDC 580 und der tatsächlich aufgebrachten Kraft. Der Offset bei einer Kraft von 0 N beträgt 50,99 mV und die Steigung der Geraden beträgt 2,52 mV/N.

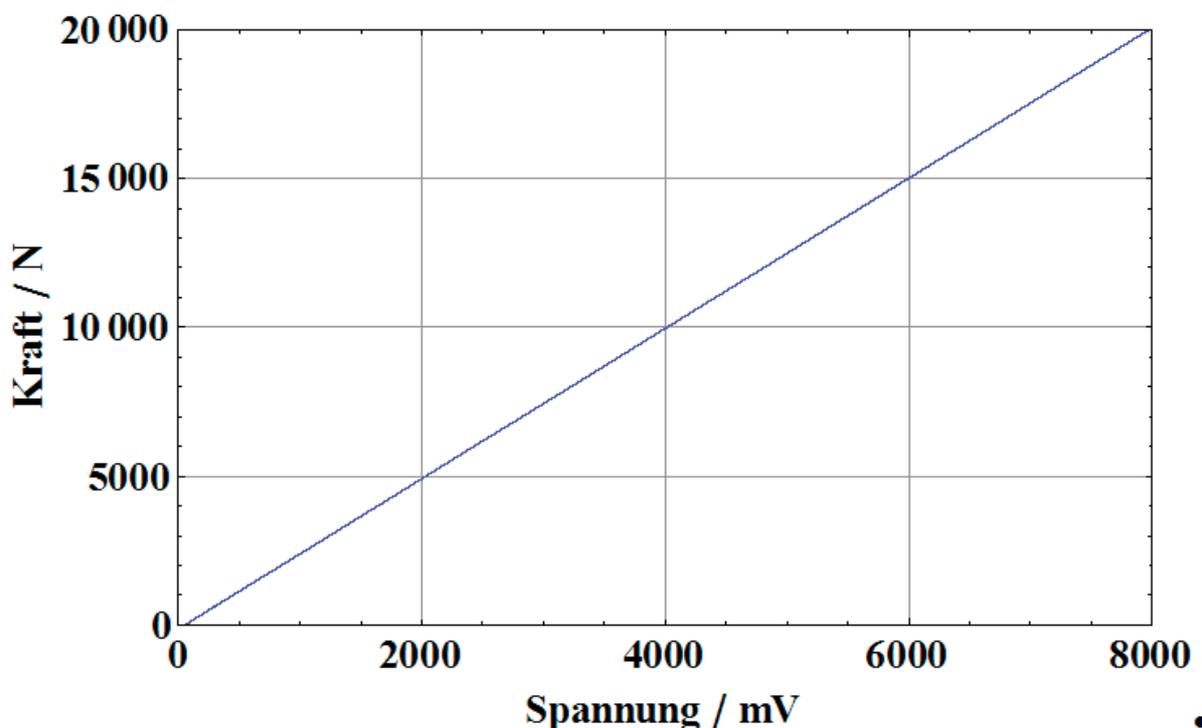


Abbildung 15: Zusammenhang zwischen der elektrischen Spannung in mV am analogen Ausgang der DOLI EDC 580 mit der tatsächlichen Kraft in N

### **3.3 Durchführung**

Um nun eine zuverlässige Durchführung der Versuche zu gewährleisten wurden alle Daten im Laptop des VALLEN AE gesammelt und ausgewertet. Der analoge Ausgang der DOLI EDC 580 wurde nach allen Messserien neu kalibriert und kontrolliert, um Abweichungen von der Maschinenseite auszuschließen.

## 4 Ergebnisse und Interpretation

---

### 4.1 Erstschädigung beim Kugel – Platte Kontakt

Um das Schädigungsverhalten einer keramischen  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Platte im Kontakt mit Kugeln hinreichend zu charakterisieren wurde der Kugel-Platte Kontaktversuche an mehreren Kugeln mit unterschiedlichen Durchmessern durchgeführt. Wie in den Berechnungen von Gl. 39 bis Gl. 44 ersichtlich geht sowohl die aufgebrachte Normalkraft  $P$  als auch der Krümmungsradius der Kugeln  $R_{eff}$  direkt in die Berechnung des Kontaktradius  $a$ , des maximalen Kontaktdrucks  $p_0$  und der maximalen Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  ein. Daher ist eine Abhängigkeit der Erstschädigung vom Durchmesser der Kugeln zu erwarten. Um die Auswertung der Ergebnisse, die einer Streuung unterworfen sind, anschaulich zu gestalten werden sie mithilfe der Weibullverteilung dargestellt. Die Weibullverteilung ermöglicht auch die Abschätzung des effektiv belasteten Volumens und der Zuverlässigkeit der ermittelten Werte.

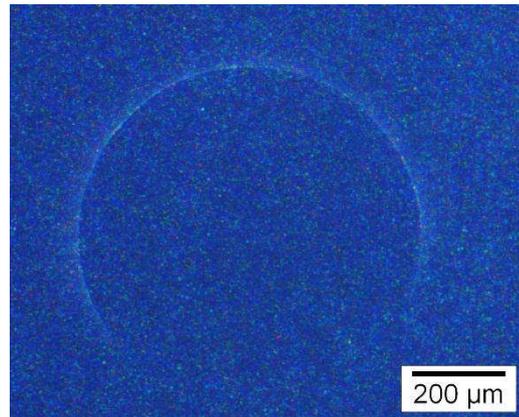
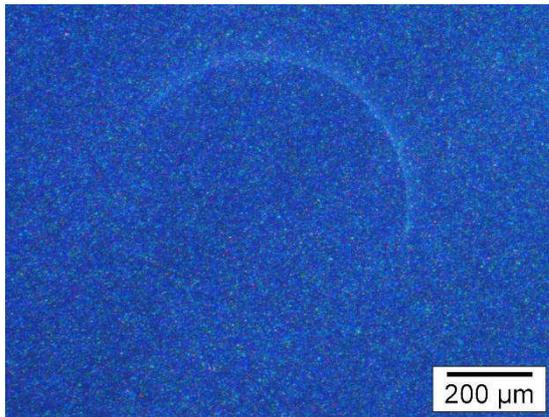
#### 4.1.1 Kugel mit 5 mm Durchmesser auf eine geschliffene Platte

Die Versuche, die mit  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Kugeln mit 5 mm Durchmesser durchgeführt wurden, gestalteten sich unproblematisch. Bei der mikroskopischen Untersuchung der geschädigten Kugeln (Versuchsabbruch nach der Erstschädigung = dem ersten Auftreten eines akustischen Signales) zeigte, dass statt des erwarteten vollständigen Kreisrisses nur ein partieller Kreisriss entstanden war (siehe Abbildung 16 a.). In weiteren Versuchen wurde nach dem ersten akustischen Signal die Kraft weiter erhöht, bis sich ein vollständiger Kreisriss gebildet hat. Beim zweiten akustischen Signal war der partielle Kreisriss bereits weiter fortgeschritten (Abbildung 16 b.). Es hat sich aber immer noch kein vollständiger Kreisriss gebildet. Erst beim dritten akustischen Ereignis konnte bei allen Proben einen vollständiger Kreisriss festgestellt werden (Abbildung 16 c.)

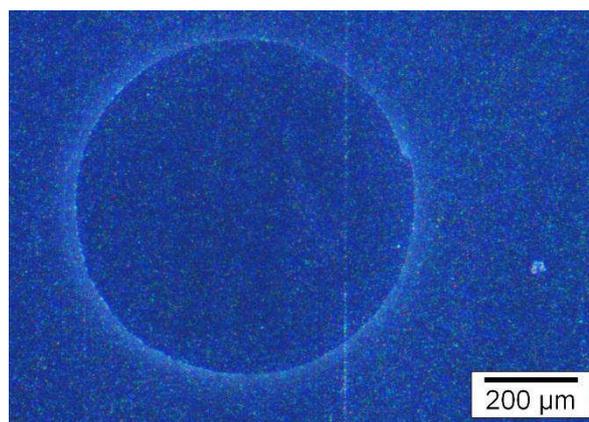
Der wesentliche Vorteil der akustischen Messung von Rissen in der Kontaktzone ist, dass selbst bei Messungen bis zum dritten Signal der Zeitpunkt der vorangegangenen Signale bekannt ist, und diese somit für die Bestimmung der Erstschädigung herangezogen werden können. Im Weiteren wird immer, wenn über Erstschädigung berichtet wird, das erste Signal zur Auswertung herangezogen. Nach jedem Versuch wurde die Indenterkugel untersucht, sodass eine Schädigung der Kugel als Beitrag zur Erstschädigung der Platte ausgeschlossen

werden konnte. In Abbildung 16 sind die mittleren Versagenskräfte (arithmetisches Mittel) dargestellt. Details zu den Versagenskräften sind im Kapitel 4.1.1.1 und 4.1.1.2 dargestellt.

<b>a.</b>	<b>b.</b>
<b>ein detektiertes akustisches Signal</b>	<b>zwei detektierte akustische Signale</b>
$P_C = 2259[N]$	$P_C = 3025[N]$



<b>c.</b>
<b>drei detektierte akustische Signale</b>
$P_C = 3730[N]$



**Abbildung 16: Überblick der Schädigungsstufen beim 5 mm Kugel-Platte Kontakt**

#### 4.1.1.1 Versuchsabbruch nach einem detektierten akustischen Signal

Wie bereits beschrieben gibt es mehrere Schädigungsstufen beim Erzeugen eines Kreisrisses durch den Kontakt einer Kugel mit 5 mm Durchmesser mit einer Platte. In diesem Abschnitt wird die Erstschädigung (erstes akustisches Signal) besprochen. Zusätzlich werden die ersten detektierten Signale der nachfolgenden Messungen (bis zum vollständigen Kreisriss) zur Untersuchung des Rissfortschrittes für die Berechnung des Mittelwertes herangezogen. In Tabelle 3 ist der Mittelwert der aufgebrauchten Normalkraft, welche zur Erstschädigung führt, über 30 Messungen dargestellt. Die Amplitude des akustischen Signals bezieht sich immer auf den Ultraschallmesskopf welcher der Kontaktzone näher ist. Der Rissradius  $a'$  in der Platte wurde lichtmikroskopisch ermittelt. Er ist ebenfalls in Tabelle 3 eingetragen.

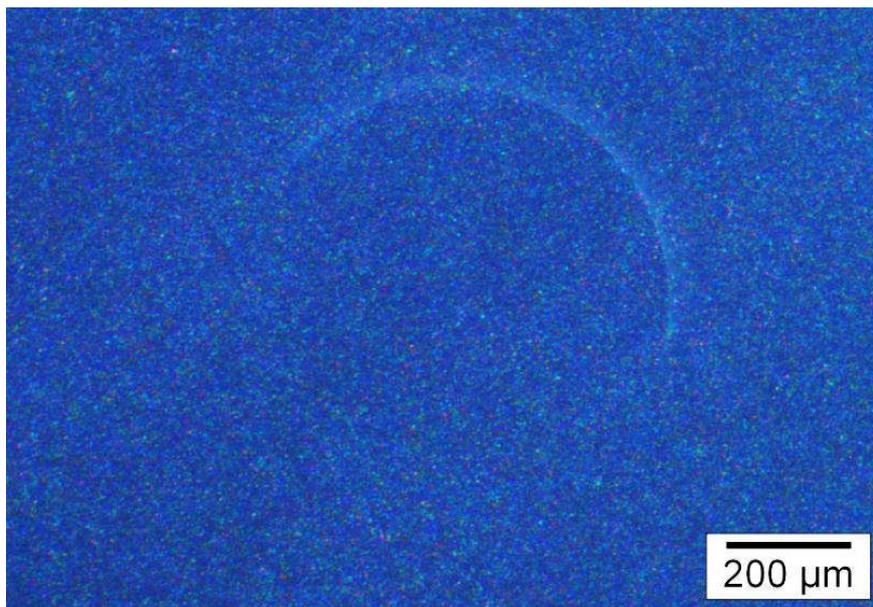
Da nun die Erstschädigungskraft  $P_C$  für die Einbringung eines Teilrisses bekannt ist, werden der Kontaktradius  $a$ , der mittlere Kontaktdruck  $p_m$  und die maximale Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  mithilfe der Theorie von Hertz berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 farbig gekennzeichnet. Bei allen berechneten und gemessenen Werten wird ab diesem Punkt die Standardabweichung mit angegeben.

**Tabelle 3: Experimentell ermittelte und berechnete Daten für die Erstschädigung beim 5 mm Kugel-Platte Kontakt (Mittelwerte inklusive Standardabweichung)**

<b>Eigenschaft:</b>	<b>Einheit:</b>	<b>Wert:</b>
Anzahl der Proben:	[-]	30
Erstschädigungskraft $P_C$ :	[N]	2259 $\pm$ 185
Amplitude des Signals:	[dB]	66
Rissradius $a'$ :	[ $\mu\text{m}$ ]	363 $\pm$ 19
Kontaktradius $a$ :	[ $\mu\text{m}$ ]	297 $\pm$ 8
mittlerer Kontaktdruck $p_m$ :	[MPa]	8150 $\pm$ 230
max. Zugspannung $\sigma_{Zug,Max}$ :	[MPa]	1890 $\pm$ 53

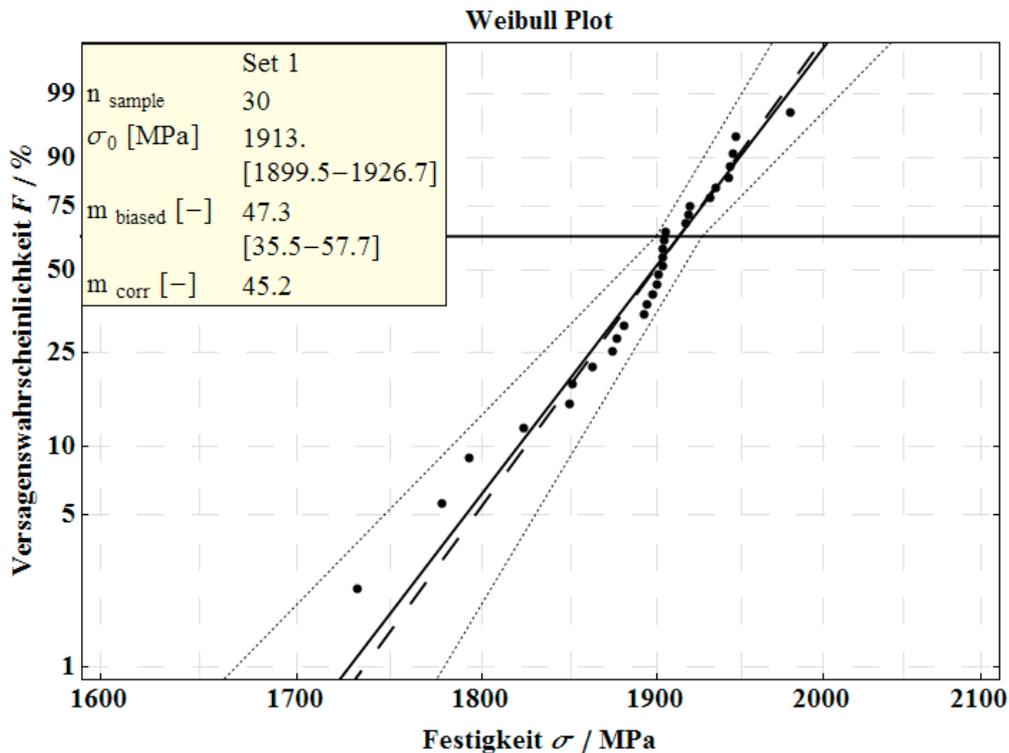
Mithilfe eines Bildanalyseprogramms des Typs Analysis 5 konnte an den lichtmikroskopischen Aufnahmen der Rissradius  $a'$  gemessen werden. Er beträgt (gemittelt über alle Messungen) 363  $\mu\text{m}$ , das in etwa 67  $\mu\text{m}$  (18 %) größer als der berechnete Kontaktradius  $a$ . Dies ist darauf zurückzuführen, dass die maximale Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$

nicht an der Kontaktgrenze auftritt, sondern etwas außerhalb der Kontaktgrenze. Auch in der Literatur <sup>(4), (12), (13)</sup> wurde bereits aufgezeigt, dass die Rissentstehung etwa 10 bis 20 % außerhalb der Kontaktgrenze erfolgt. In Abbildung 17 ist eine typische stereomikroskopische Aufnahme eines partiellen Kreisrisses beim Versuchsabbruch nach dem ersten akustischen Signal dargestellt. Grundsätzlich trat die Schädigung beim 5 mm Kugel-Platte Versuch immer in der Platte ein, die Kugel blieb in jedem Fall unbeschädigt.



**Abbildung 17: Risse in einer D15 geschliffenen plattenförmigen Probe erzeugt durch eine 5 mm Kugel bei einem Versuchsabbruch nach einem akustischen Signal**

Um nun die experimentellen Ergebnisse bezüglich der maximalen Zugspannungen übersichtlich darzustellen wurde die Weibullstatistik herangezogen. In Abbildung 18 sind die Daten in einem Weibulldiagramm nach Norm EN 843-5 dargestellt. Bei Biegeversuchen <sup>(14)</sup> beträgt der Weibullmodul typischerweise 15 bis 20. Im Fall unserer Daten ist der Modul viel höher. Das bedeutet, dass die Messungen eine geringe Streuung und damit eine große Zuverlässigkeit aufweisen.



**Abbildung 18: Weibullverteilung für die Kraft zur Bildung eines Risses zufolge des Kontaktes zwischen einer D15 geschliffenen Platte und einer 5 mm Kugel**

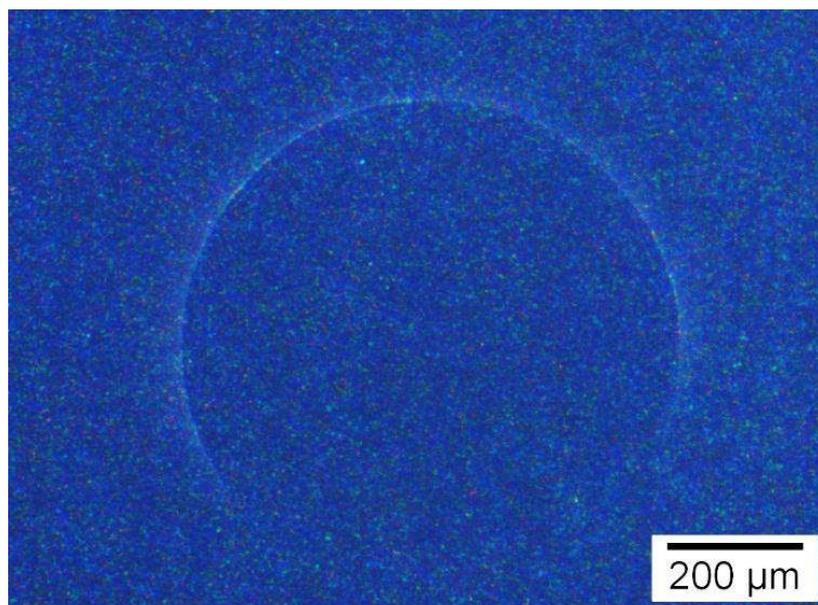
#### 4.1.1.2 Versuchsabbruch nach dem zweiten beziehungsweise dritten akustischen Ereignis

Um den Rissfortschritt weiter zu untersuchen wurde die Normalkraft weiter erhöht und weitere akustische Ereignisse abgewartet. Praktischerweise kann trotz Belastung bis zum dritten akustischen Signal das enthaltene erste und zweite Signal in die Statistik mitgenommen werden, da alle akustischen Signale separat mit zugehörigen Kräften tabellarisch gespeichert werden. In Tabelle 4 werden die Mittelwerte der aufgebrachten Normalkraft  $P$  für den Versuchsabbruch nach dem zweiten beziehungsweise dritten akustischen Signal dargestellt. Aufgrund der Kenntnis der Schädigungskräfte  $P$  nach dem zweiten und dritten akustischen Ereignis für die vollständige Kreisrisseinbringung kann wiederum der Kontaktradius  $a$ , der mittlere Kontaktdruck  $p_m$  und die maximale Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  nach der Theorie von Hertz berechnet werden, die berechneten Ergebnisse sind in Tabelle 4 farblich gekennzeichnet.

**Tabelle 4: Experimentell ermittelte und berechnete Daten für die Erstschädigung beim 5 mm Kugel-Platte Kontakt (Mittelwerte inklusive Standardabweichung)**

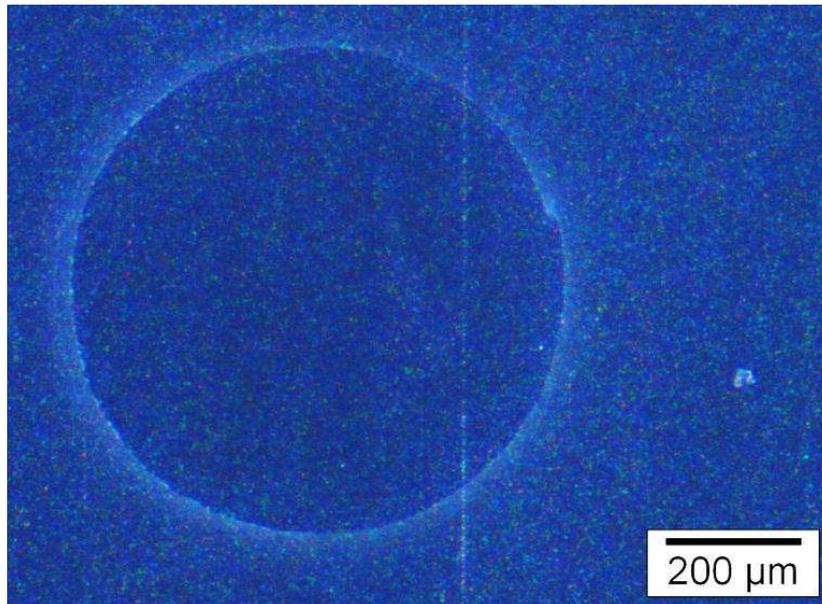
Eigenschaft:	Einheit:	Wert:		
Anzahl der Proben:	[-]	30	21	12
Nummer akustischer Signale:	[-]	eins	zwei	drei
Erstschädigungskraft $P_C$ :	[N]	$2259 \pm 185$	$3025 \pm 286$	$3730 \pm 353$
Amplitude:	[dB]	66	69	68
Rissradius $a'$ :	[ $\mu\text{m}$ ]	$363 \pm 19$	$362 \pm 12$	$379 \pm 14$
Kontaktradius $a$ :	[ $\mu\text{m}$ ]	$297 \pm 8$	$327 \pm 11$	$351 \pm 11$
mittlerer Kontaktdruck $p_m$ :	[MPa]	$8150 \pm 230$	$8980 \pm 290$	$9630 \pm 303$
max. Zugspannung $\sigma_{Zug,Max}$	[MPa]	$1890 \pm 53$	$2065 \pm 67$	$2215 \pm 70$

Bei der Betrachtung der stereomikroskopischen Aufnahme in Abbildung 19 ist ein deutlicher Fortschritt der Rissfront nach zwei akustischen Signalen erkennbar, jedoch hat sich noch immer kein vollständiger Kreisriss ausgebildet. Durch die Untersuchung aller Proben, bei denen nach zwei akustischen Signalen der Versuchsabbruch erfolgte, konnte verifiziert werden, dass es sich um die zweite Stufe der Kreisrissbildung handelt und die Rissausbreitung nach der Erstschädigung erfolgt ist.



**Abbildung 19: Risse in einer D15 geschliffenen plattenförmigen Probe, die durch den Kontakt mit einer 5 mm Kugel erzeugt wurden nach dem zweiten akustischen Ereignis**

In Abbildung 20 ist eine stereomikroskopische Aufnahme eines vollständigen Kreisrisses nach drei detektierten akustischen Signalen gezeigt. Durch eine oftmalige Wiederholung der Versuche konnte auch hier das Entstehen eines vollständigen Kreisrisses nach drei akustischen Signalen verifiziert werden.



**Abbildung 20: Risse in einer D15 geschliffenen plattenförmigen Probe, die durch den Kontakt mit einer 5 mm Kugel erzeugt wurden nach dem dritten akustischen Ereignis**

Auch für die Erfassung der Rissgrößen nach dem zweiten beziehungsweise dritten akustischen Ereignis wurde der Rissradius  $a'$  mikroskopisch ermittelt. Der Mittelwert und die Standardabweichung für den Rissradius  $a'$  und die Abweichung vom Kontaktradius  $a$  nach Hertz werden in Tabelle 5 angegeben.

**Tabelle 5: Vergleich zwischen dem experimentell ermittelten Rissradius  $a'$  und dem berechneten Kontaktradius  $a$**

Eigenschaft:	Einheit:	Wert:		
		eins	zwei	drei
Nummer der akustischen Signale:	[-]	eins	zwei	drei
Rissradius $a'$ :	[ $\mu\text{m}$ ]	363	362	379
Abweichung vom Kontaktradius:	[%]	18	11	8

Der Rissfortschritt erleichtert die mikroskopische Auswertung des Rissradius  $a'$ , da nun drei weit voneinander entfernte Stützstellen gewählt werden können, um den Radius zu ermitteln. Auch nach dem zweiten beziehungsweise dritten Signal ist der Rissradius noch größer als der berechnete Kontaktradius  $a$  nach Hertz.

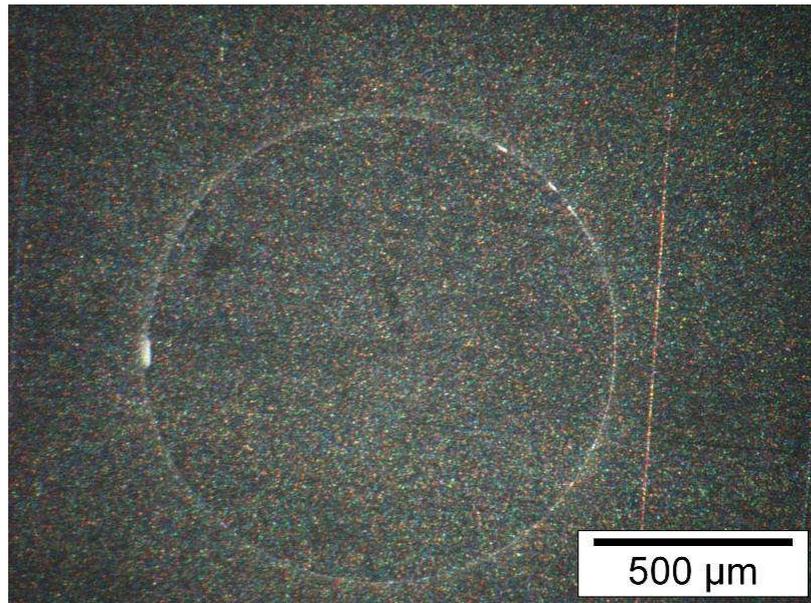
#### 4.1.2 Kugel mit 10,3 mm Durchmesser auf eine geschliffene Platte

Es wurden auch Versuche mit Kugeln anderen Durchmessers durchgeführt, da zu erwarten ist, dass die Erstschädigungskraft vom Radius der Kugel abhängt <sup>(4)</sup>. Mit einem eigens gefertigten Auflager aus Stahl (St 600) wurde der analoge Versuch mit einer 10,3 mm Kugel und einer Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Platte durchgeführt, wie oben für den Kontakt mit einer 5 mm Kugel besprochen. Es ist zu erwarten, dass die Erstschädigungskraft größer als beim Versuch mit einer 5 mm Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Kugel sein wird. Vor den Messungen wurde der analoge Ausgang der DOLI EDC 580 überprüft. Die Werte für die parametrische Umrechnung von einer Spannung in eine Kraft bleiben ident mit den Werten des 5 mm Kugel-Platte Versuchs. Auch hier wird nur die Amplitude des Ultraschallmesskopfes mit der höheren Amplitude zur Auswertung herangezogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 aufgelistet.

**Tabelle 6: Experimentell ermittelte Daten für die Erstschädigung beim 10,3 mm Kugel-Platte Kontakt (Mittelwerte inklusive Standardabweichung)**

<b>Eigenschaft:</b>	<b>Einheit:</b>	<b>Wert:</b>
Anzahl der Proben:	[-]	41
Erstschädigungskraft $P_C$ :	[N]	6051 ± 355
Amplitude des Signals:	[dB]	79
Rissradius $a'$ :	[μm]	585 ± 26
Kontaktradius $a$ :	[μm]	525 ± 10
mittlerer Kontaktdruck $p_m$ :	[MPa]	6989 ± 132
max. Zugspannung $\sigma_{Zug,Max}$ :	[MPa]	1621 ± 31

Auch bei diesen Versuchen wurde nur die Platte geschädigt. Abbildung 21 zeigt die typische Form des Risses bei der Erstschädigung der Platte durch die 10,3 mm  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Kugel. Es stellte sich bei den mikroskopischen Untersuchungen heraus, dass der so erzeugte Riss immer ein vollständiger Kreisriss ist, und nicht wie bei den 5 mm Kugel-Platte Versuchen nur ein Teilkreis. Die Kontur des Kreisrisses ist im Vergleich zu den partiellen Kreisrissen im 5 mm Kugel-Platte Versuch ebenso deutlicher zu erkennen. Dies deutet auf eine größere Risstiefe hin.



**Abbildung 21: Risse in einer D15 geschliffenen plattenförmigen Probe erzeugt durch eine 10,3 mm Kugel**

Wie zu erwarten war, steigt der Rissradius  $a'$  beim Kontakt zwischen der 10,3 mm an. Der ermittelte Rissradius  $a'$  ist wiederum größer als der berechnete Kontaktradius  $a$ . In Tabelle 7 werden der Rissradius  $a'$  und der berechnete Kontaktradius  $a$  nach Hertz angegeben, Der Rissradius ist um 11 % größer als der Kontaktradius. <sup>(4), (12), (13)</sup>

**Tabelle 7: Vergleich zwischen dem experimentell ermittelten Rissradius  $a'$  und dem Kontaktradius  $a$**

Eigenschaft:	Einheit:	Wert:
Rissradius $a'$ :	[ $\mu\text{m}$ ]	585
Abweichung vom berechneten Kontaktradius:	[%]	11

Auch hier erfolgt eine Auswertung der Versuchsergebnisse mithilfe der Weibullstatistik, nach EN 843-5. Auch beim Kugel-Platte Versuch mit der Kugel mit 10,3 mm Durchmesser ist der Weibullmodul ungewöhnlich hoch, was auf die geringe Datenstreuung zurückzuführen ist (Abbildung 22).

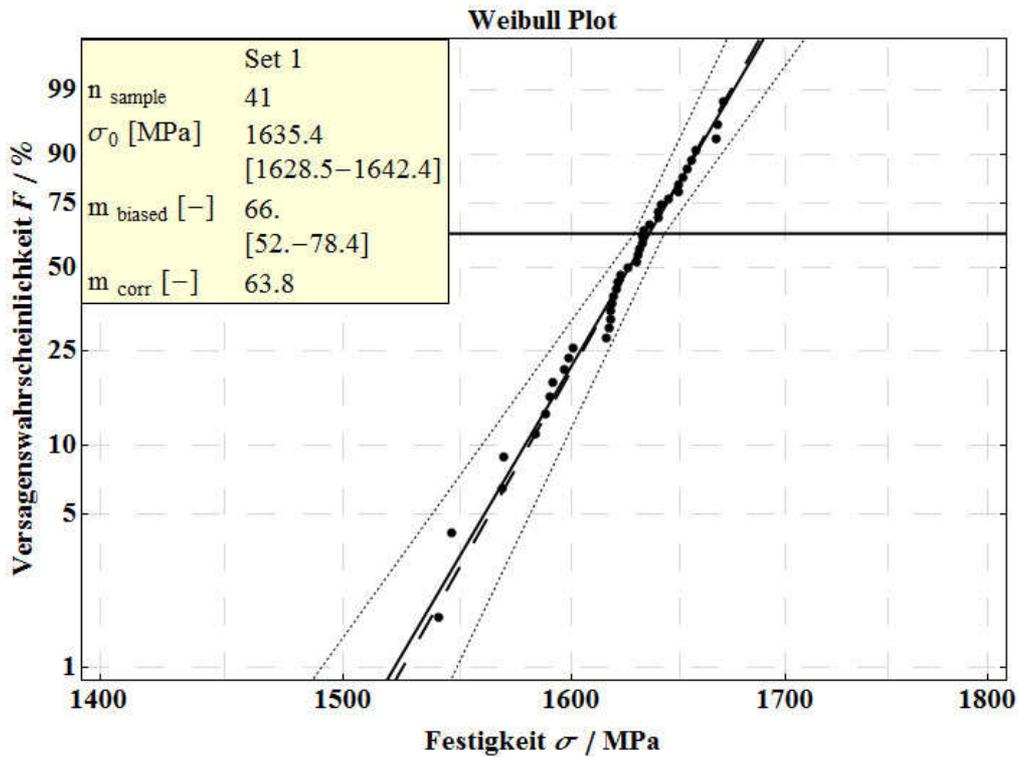


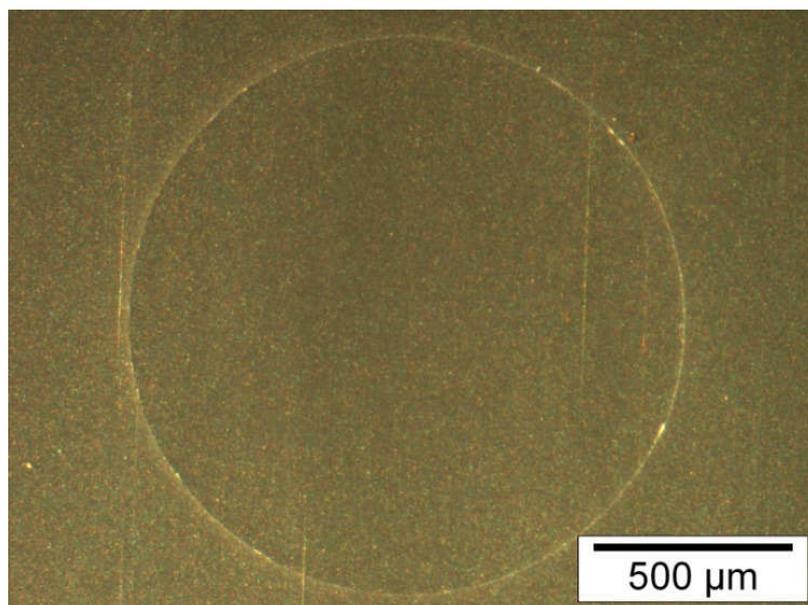
Abbildung 22: Weibullverteilung für die Kraft zur Bildung eines Risses zufolge des Kontaktes zwischen einer D15 geschliffenen Platte und einer 10,3 mm Kugel

### 4.1.3 Kugel mit 12,7 mm – Durchmesser auf eine geschliffene Platte

Analoge Versuche wie oben besprochen wurden auch mit einer 12,7 mm Kugel durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8, Tabelle 9 und Abbildung 23 und Abbildung 24 dargestellt.

**Tabelle 8: Experimentell ermittelte Daten für die Erstschädigung beim 12,7 mm Kugel-Platte Kontakt (Mittelwerte inklusive Standardabweichung)**

Eigenschaft:	Einheit:	Wert:
Anzahl der Proben:	[-]	29
Erstschädigungskraft $P_C$ :	[N]	$8978 \pm 647$
Amplitude des Signals:	[dB]	90
Rissradius $a'$ :	[ $\mu\text{m}$ ]	$703 \pm 22$
Kontaktradius $a$ :	[ $\mu\text{m}$ ]	$641 \pm 15$
mittlerer Kontaktdruck $p_m$ :	[MPa]	$6939 \pm 167$
max. Zugspannung $\sigma_{Zug,Max}$ :	[MPa]	$1610 \pm 39$

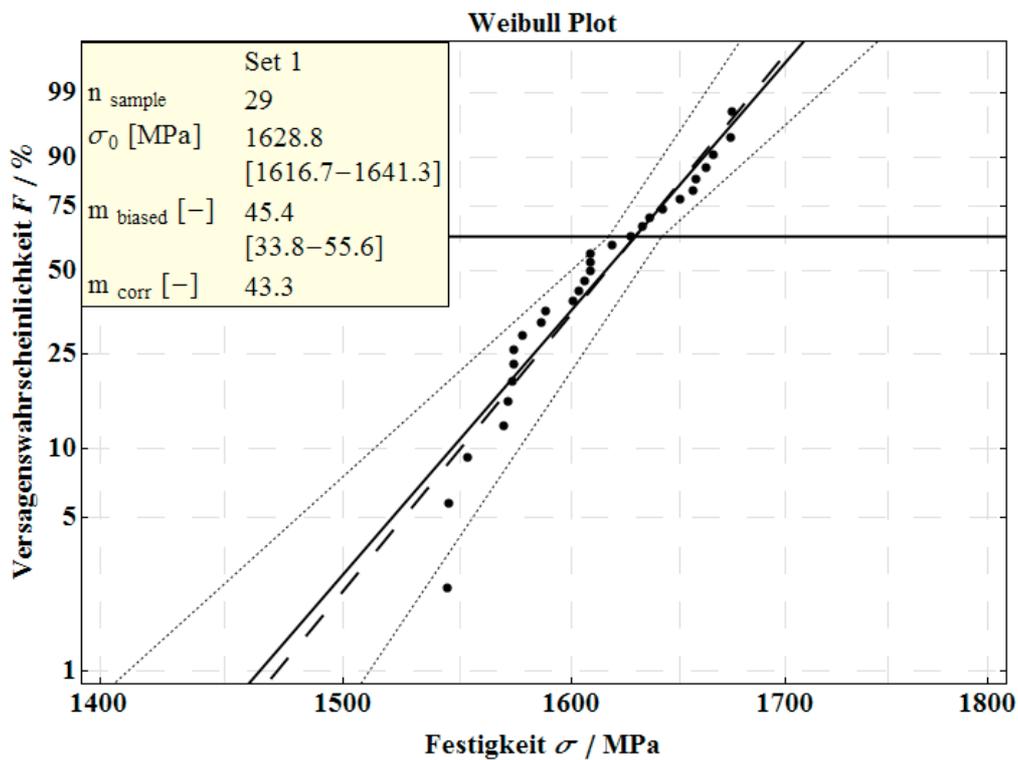


**Abbildung 23: Risse in einer D15 geschliffenen plattenförmigen Probe erzeugt durch eine 12,7 mm Kugel**

**Tabelle 9: Vergleich zwischen dem experimentell ermittelten Rissradius  $a'$  und dem berechneten Kontaktradius  $a$**

Eigenschaft:	Einheit:	Wert:
Rissradius $a'$ :	[ $\mu\text{m}$ ]	703
Abweichung vom berechneten Kontaktradius:	[%]	10

Auch bei diesen Versuchen sind die Kreisrisse beim ersten Schallereignis voll ausgebildet (Abbildung 23). Die Kontur des Risses ist besser als bei den Versuchen mit kleineren Kugeln zu erkennen. Der Radius des Risses ist etwa 10 % größer als der Kontaktradius (Tabelle 9). Wegen der geringen Datenstreuung ist der Weibullmodul der Kraftverteilung wiederum sehr groß.



**Abbildung 24: Weibullverteilung für die Kraft zur Bildung eines Risses zufolge des Kontaktes zwischen einer D15 geschliffenen Platte und einer 12,7 mm Kugel**

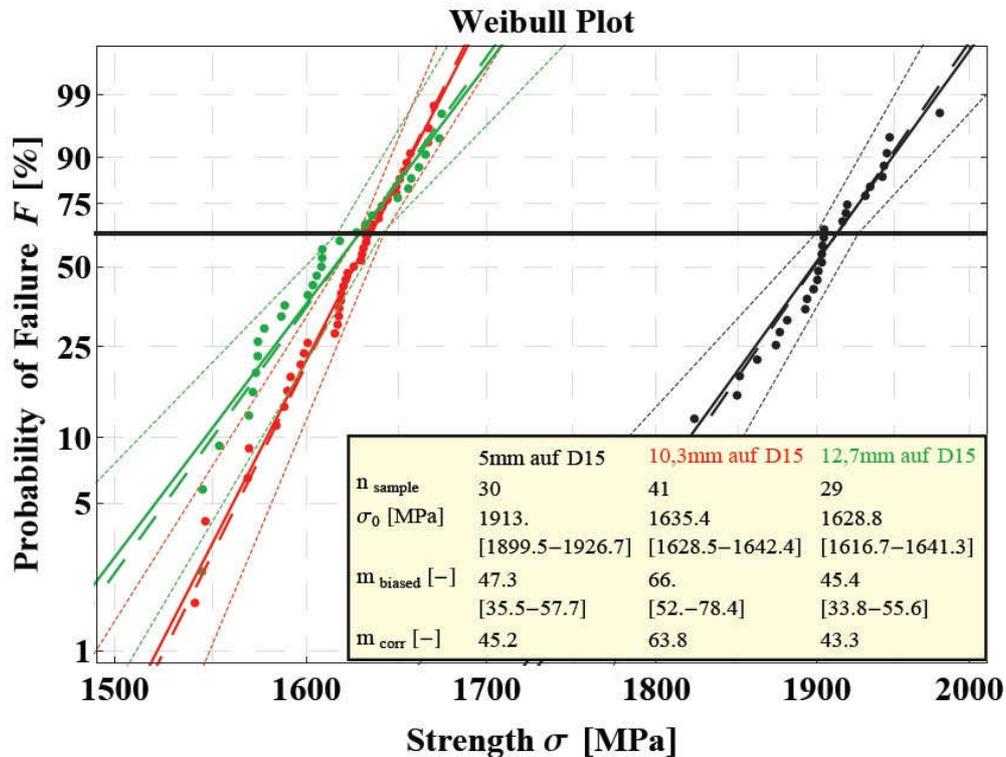
## 4.2 Vergleich der Kugel-Platte Versuche

In Tabelle 10 werden die Erstschädigungskräfte  $P_C$  gezeigt und die maximalen auftretenden Zugspannungen dargestellt.

**Tabelle 10: mittlere Erstschädigungskräfte und Spannungen für Kugel-Platte Kontaktversuche mit Kugeln unterschiedlichen Durchmessers**

Eigenschaft:	Einheit:	5 mm:	10,3 mm:	12,7 mm:
Erstschädigungskraft $P_C$ :	[N]	2259	6051	8978
Max. Zugspannung $\sigma_{Zug,Max}$ :	[MPa]	1890	1621	1610
charakteristische Festigkeit $\sigma_0$ :	[MPa]	1913	1635	1628

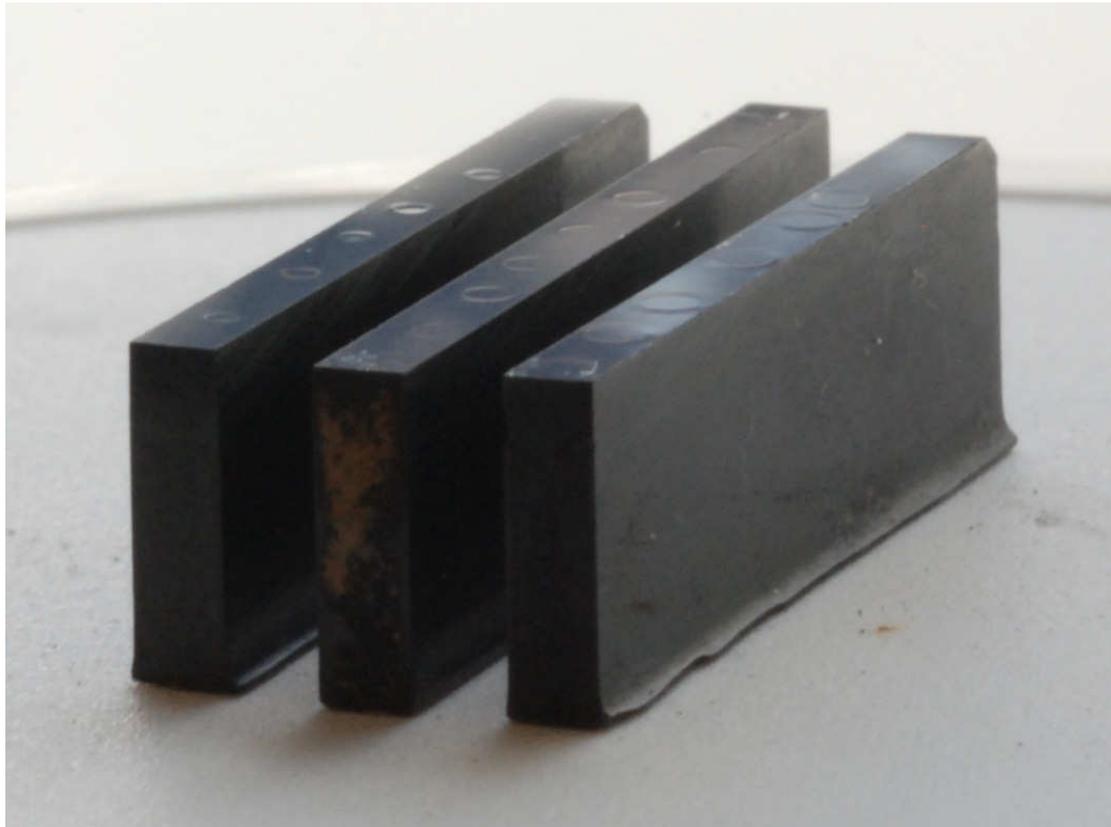
Tabelle 10 zeigt, dass die Erstschädigungskraft  $P_C$  mit größer werdendem Durchmesser zunimmt, die maximale Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  bei Rissentstehung aber abnimmt. Zwischen den Versuchen mit der 10,3 mm Kugel und der 12,7 mm Kugel ist kein signifikanter Abfall der Spannung mehr erkennbar (Abbildung 25).



**Abbildung 25: Weibullverteilung für die Kraft zur Bildung eines Risses zufolge des Kontaktes zwischen einer D15 geschliffenen Platte und Kugeln verschiedenen Durchmessers**

#### 4.2.1 Vergleich der Tiefe der Risse in der Platte

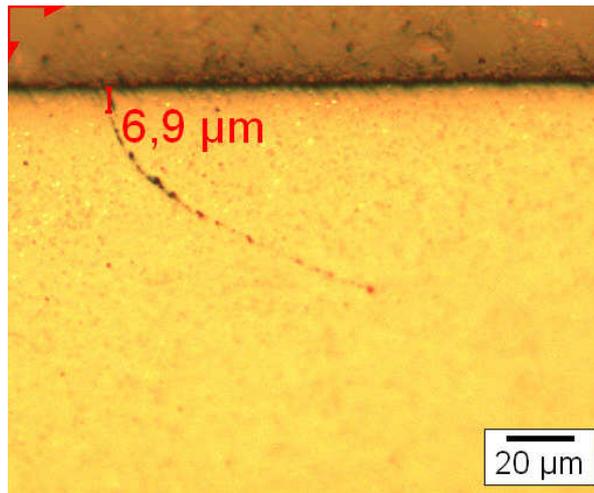
Da bei den lichtmikroskopischen Untersuchungen mit unterschiedlichen Lasten hervorgerufene Risse unterschiedlich gut erkennbar waren, wurden auch die Tiefen der Risse in den Platten untersucht. Zuerst mussten die Proben vereinzelt werden um Querschliffe anfertigen zu können. In Abbildung 26 sind die vereinzelt Proben gezeigt. Bereits hier sind die Kreisrisse zu erkennen.



**Abbildung 26: Vereinzelte Proben der mit D15 geschliffenen Platte, die mit Kugeln unterschiedlichen Durchmessers belastet wurden (links: 5 mm; Mitte: 10,3 mm, rechts: 12,7 mm)**

Nach dem Einbetten wurde ein lichtmikroskopisch bestimmter Wert abgetragen um in den Bereich des Kreisrisses zu gelangen und die Tiefe des Risses zu bestimmen. Es ist bekannt, dass die Risse zunächst normal zur Oberfläche wachsen. Ab einer gewissen Tiefe dreht der Riss in einem schrägen Winkel zur Oberfläche, sodass er kegelförmig ins Material wächst. Dieser Befund konnte durch unsere Untersuchungen bestätigt werden.

In Abbildung 27 wird gezeigt, wie die Tiefe des Risses normal zur Oberfläche der Probe bestimmt wurde.



**Abbildung 27: Bestimmung der Tiefe des Ringrisses an den eingebetteten Proben**

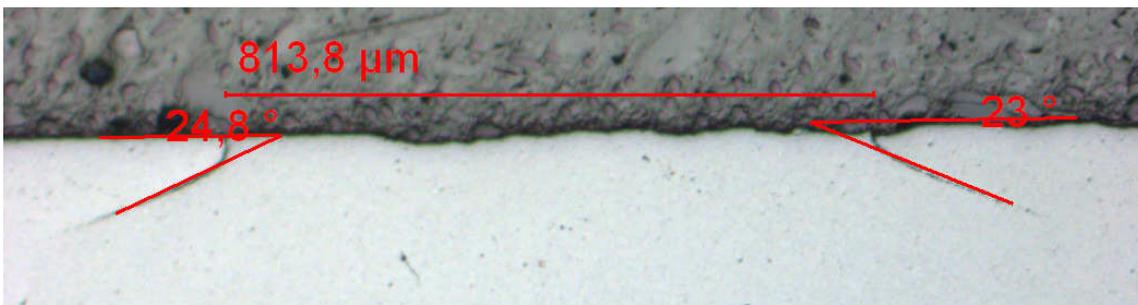
Die Tiefe der Ringrisse in Abhängigkeit vom Durchmesser der Prüfkugel ist in Tabelle 11 angegeben. Es ist ersichtlich, dass sie mit steigendem Kugeldurchmesser zunimmt. Dies ist darin begründet, dass der Kontaktdruck mit steigendem Kugeldurchmesser zunimmt, und dadurch mehr Energie zur Rissöffnung vorhanden ist. Daher kann der Riss tiefer in das Material wachsen.

Zusätzlich zu den Risstiefen wurde der Winkel des Kegelrisses ermittelt. In der Literatur gefunden, wo ein Risswinkel von  $26,5^\circ$  für Siliziumnitrid bei einem Durchmesser eines kugelförmigen Eindringkörpers von 5 mm ermittelt wurde. <sup>(15)</sup> Um den Risswinkel zu bestimmen, wurde die Messsoftware des Analysis 5 Tools verwendet. Der Winkel zwischen der Oberfläche und dem Riss wurde durch zwei Geraden, die durch jeweils zwei Punkte definiert wurden, bestimmt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 11 dargestellt. Die Tendenz ist, dass der Winkel mit steigendem Durchmesser des Eindringkörpers zunimmt. Die gemessenen Winkel stimmen mit den in der Literatur gefundenen Werte in etwa überein. <sup>(15)</sup>

**Tabelle 11: Tiefe der Ringrisse und Winkel des Kegelrisses beim Kugel-Platte Kontakt für Eindringkörper unterschiedlichen Durchmessers**

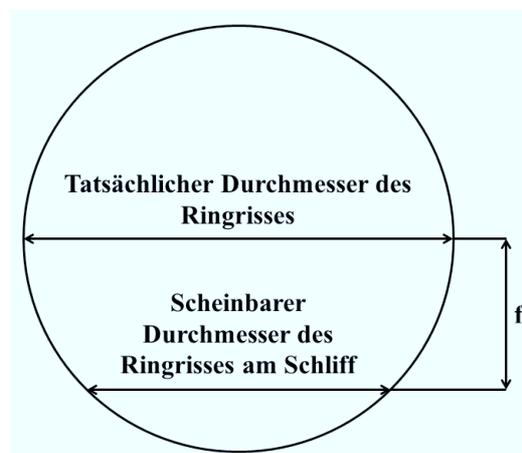
<b>Kugeldurchmesser:</b>	<b>Risstiefe normal zur Oberfläche:</b>	<b>Risswinkel:</b>
5 mm	14 µm	$24,7^\circ$
10,3 mm	26 µm	$27,5^\circ$
12,7 mm	30 µm	$31,5^\circ$

Da es nicht möglich war, alle Risse genau bis zum größten Ringdurchmesser zu schleifen, wurde der Durchmesser jedes Kreisrisses vor der Herstellung der Querschliffe vermessen. Anschließend wurden die Rissparameter wie der Radius des Schnittes durch den Ringriss, seine Tiefe normal zur Oberfläche und der Winkel des Schnittes durch den Kegelryss vermessen. In Abbildung 28 ist ein solches lichtmikroskopisches Bild gezeigt. Der ermittelte Radius des Schnittes durch den Ringriss und der gemessene Winkel des Schnittes durch den Kegelryss sind eingezeichnet. Der so bestimmte Winkel des Schnittes im Rissystem ist jedoch nicht der Winkel des Kegels.



**Abbildung 28: Querschliff durch das Rissystem mit gemessenem Radius und Winkel. Die Datenauswertung wurde mithilfe von Analysis 5 durchgeführt**

Um nun vom vorliegenden Winkel des Schnittes durch den Ringriss auf den tatsächlichen Winkel des „schief“ verlaufenden Risses zu schließen, muss angenommen werden, dass die Form des Risses im Material tatsächlich einem Kegel entspricht. Durch den Schleifvorgang entsteht ein Schnitt des Kegels mit einer Ebene. Der Winkel des Kegels kann mithilfe eines Hyperbelfits des Softwaretools Mathematica 8 aus dem am Schliffbild ermittelten Winkel berechnet werden. In Abbildung 29 ist der Sachverhalt dargestellt, der als Grundlage der Berechnung dient.



**Abbildung 29: Durchmesser des Ringrisses und Schnitt des Ringrisses mit der Schleifebene**

Für die folgende Betrachtung wird von einem Kegel der Form Gl. 45 in Hauptlage (Schnitte parallel zur  $xy$ -Ebene) ausgegangen, wobei der Mittelpunkt axial um  $z_0$  verschoben sei. Der Skalierungsparameter  $c$  entspricht dabei dem Tangens des Öffnungswinkels  $\alpha'$  des Kegels, vgl Gl. 46.

$$x^2 + y^2 = (z - z_0)^2 \cdot c^2 \quad \text{Gl. 45}$$

$$c = \tan \alpha' \quad \text{Gl. 46}$$

Ausgehend von der allgemeinen Kegelgleichung erfolgt nun ein Schnitt der allgemeinen Kegelgleichung mit einer Ebene im Abstand  $f$ . Für den Schnitt mit einer Ebene  $y = 0$ , müssen sich als Lösung zwei Geraden ergeben. Mithilfe der Geradengleichung in Gl. 47 ist der Winkel  $\alpha'$  direkt zu ermitteln (Gl. 46).

$$z = \pm \frac{x}{c} + z_0 \quad \text{Gl. 47}$$

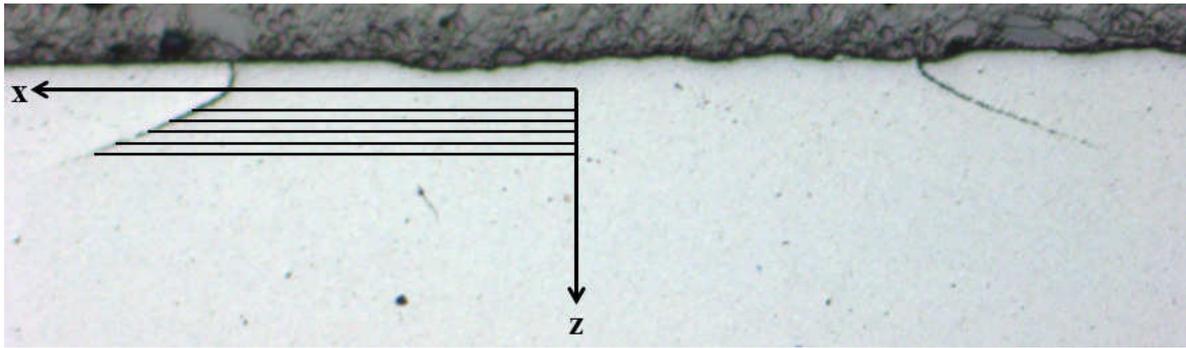
Der Schnitt mit der Ebene erfolgt jedoch an  $y = f$ , so muss die Schnittfigur eine Hyperbel sein (Gl. 48).

$$x^2 + f^2 = (z - z_0)^2 \cdot c^2 \quad \text{Gl. 48}$$

Die entstehende Form der Gleichung durch eine Umformung auf  $z$  ergibt die Fitfunktion für eine Hyperbel (Gl. 49) mithilfe von Stützstellen aus Abbildung 30. Aus Gl. 49 ist ersichtlich, dass für große  $x$  der Term unter der Wurzel  $\approx 1$  wird, das bedeutet, dass für große  $x$  die Hyperbel in sehr guter Näherung den beiden asymptotischen Geraden entspricht.

$$z = \pm \frac{x}{c} \sqrt{1 + \frac{f}{x^2}} + z_0 \quad \text{Gl. 49}$$

Um nun Stützstellen zu finden, werden Koordinaten aus den Bildern des Querschliffes ermittelt. In Abbildung 30 ist die schematische Vorgangsweise skizziert.

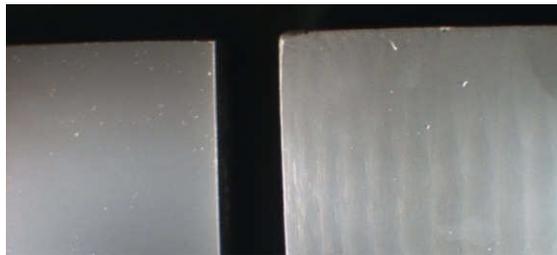


**Abbildung 30: Ermittlung von Stützstellen für den Hyperbelfit**

Nun werden die gemessenen Punkte  $(x, z)$  als Grundlage für den Hyperbelfit an das Softwaretool Mathematica übergeben um schließlich die Parameter der Hyperbel  $(c, z_0)$  durch die gegebenen Punkte zu ermitteln. Mathematica liefert die Werte für  $z_0$  und  $c$ , wobei mithilfe von  $c$  (Gl. 46) der wahre Öffnungswinkel des Kegels ermittelt werden kann. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 aufgelistet.

#### 4.2.2 Kugel mit 5 mm Durchmesser auf polierte Platte

Es ist zu vermuten, dass die Oberflächenrauigkeit einen Einfluss auf die Entstehung der Risse hat. Daher wurden Kugel-Platte Versuche an Proben durchgeführt, die eine unterschiedliche Rauigkeit (mit D15 geschliffen beziehungsweise poliert) aufweisen. Nach dem Polieren erfolgte keine weitere Oberflächenbehandlung mehr, es wurde direkt mit den Versuchen begonnen. In Abbildung 31 ist eine stereomikroskopische Aufnahme der beiden Oberflächen zu sehen. Selbst mit freiem Auge ist erkennbar, dass die Oberflächenbeschaffenheit wesentlich besser als bei der mit D15 geschliffenen Platte ist.



**Abbildung 31: Übersichtsbild der polierten Platte (links) und der D15 geschliffenen Platte (rechts)**

Der Poliervorgang wurde an einer plattenförmigen Probe, die in Stücke geteilt wurde, durchgeführt. Zuerst wurden die Teilstücke auf eine Scheibe aufgeklebt und plan geschliffen. Danach wurde der Poliervorgang mit sechs unterschiedlichen Schleifpapieren mit zunehmender Feinheit durchgeführt, um eine möglichst gute Oberflächenqualität zu erzielen. In Tabelle 12 sind sowohl die Schleif- bzw. Politurkräfte gezeigt.

**Tabelle 12: Polier- beziehungsweise Schleifstufen mit zugehörigen Kräften**

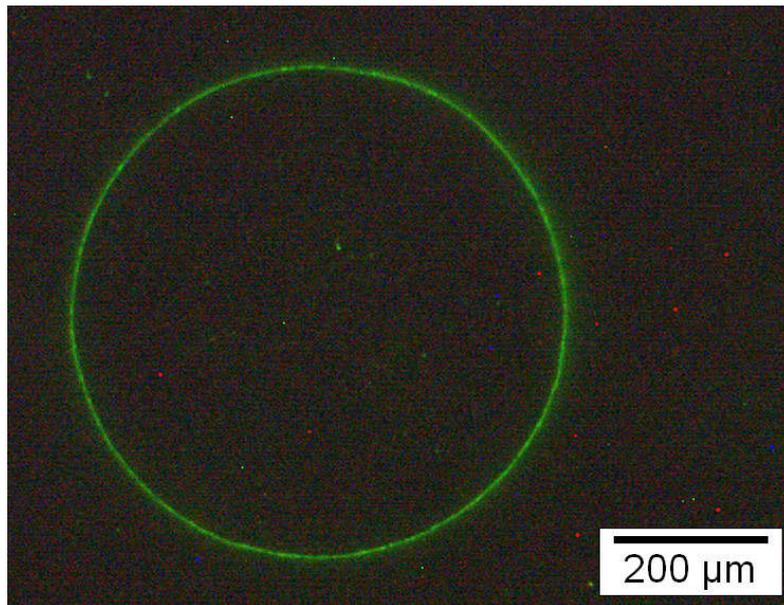
<b>Körnung:</b>	<b>Kraft in N:</b>	<b>Dauer in min:</b>
65 $\mu\text{m}$	180	10
15 $\mu\text{m}$	150	15
9 $\mu\text{m}$	150	15
6 $\mu\text{m}$	150	15
3 $\mu\text{m}$	150	15
1 $\mu\text{m}$	150	15

In Tabelle 13 sind die Werte für die Kraft zur Erzeugung des ersten Risses sowie die Amplitude des akustischen Signals und der Radius des Ringrisses aufgelistet. Aufgrund der Kenntnis der Erstschädigungskraft, ist es nun möglich den Kontaktradius  $a$ , den mittleren Kontaktdruck  $p_m$  und die maximal auftretende Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  zu berechnen. Die nach Hertz ermittelten Daten (Kontaktradius, mittlere und maximale Kontaktspannung), sind in Tabelle 13 farbig hinterlegt.

**Tabelle 13: Daten für die Erstschädigung beim 5 mm Kugel-polierete Platte Kontakt (Mittelwerte inklusive Standardabweichung)**

Eigenschaft:	Einheit:	Wert:
Anzahl der Proben:	[-]	20
Erstschädigungskraft $P_C$ :	[N]	1822 [1774 – 1870]
Amplitude des Signals:	[dB]	65
Rissradius $a'$ :	[ $\mu\text{m}$ ]	318 [311 – 324]
Kontaktradius $a$ :	[ $\mu\text{m}$ ]	276 [274 – 279]
mittlerer Kontaktdruck $p_m$ :	[MPa]	7590 [7523 – 7656]
max. Zugspannung $\sigma_{Zug,Max}$ :	[MPa]	1746 [1730 – 1761]

Bei der mikroskopischen Untersuchung wurde festgestellt, dass die Risse in den Platten unter Weißlicht nicht sichtbar sind. Um sie sichtbar zu machen wurde die Platte in Fluoreszenzfarbe getränkt und nach einer gewissen Einwirkzeit unter ultraviolettem (UV) Licht lichtmikroskopisch untersucht. Abbildung 32 zeigt einen typischen Riss in einer polierten Platte. Charakteristisch ist, dass bereits nach dem ersten akustischen Signal ein vollständiger Kreisriss vorhanden ist. Dies wurde bei allen Proben beobachtet (Anmerkung: Bei der mit D15 geschliffenen Platte trat als Erstschädigung immer ein partieller Kreisriss auf). Das Verhalten ist möglicherweise auf Zugeigenspannungen zurückzuführen, die beim Polieren der Probe entstanden sind.



**Abbildung 32: Vollständiger Kreisriss in einer polierten plattenförmigen Probe, erzeugt mit einer 5 mm Kugel**

In Tabelle 14 sind die Normalkräfte  $P$  bei der Erstschädigung für die polierte und die geschliffene Probe angegeben.

**Tabelle 14: Vergleich der Erstschädigungskräfte und der maximalen Zugspannungen bei zwei verschiedenen Oberflächen (D15 beziehungsweise poliert)**

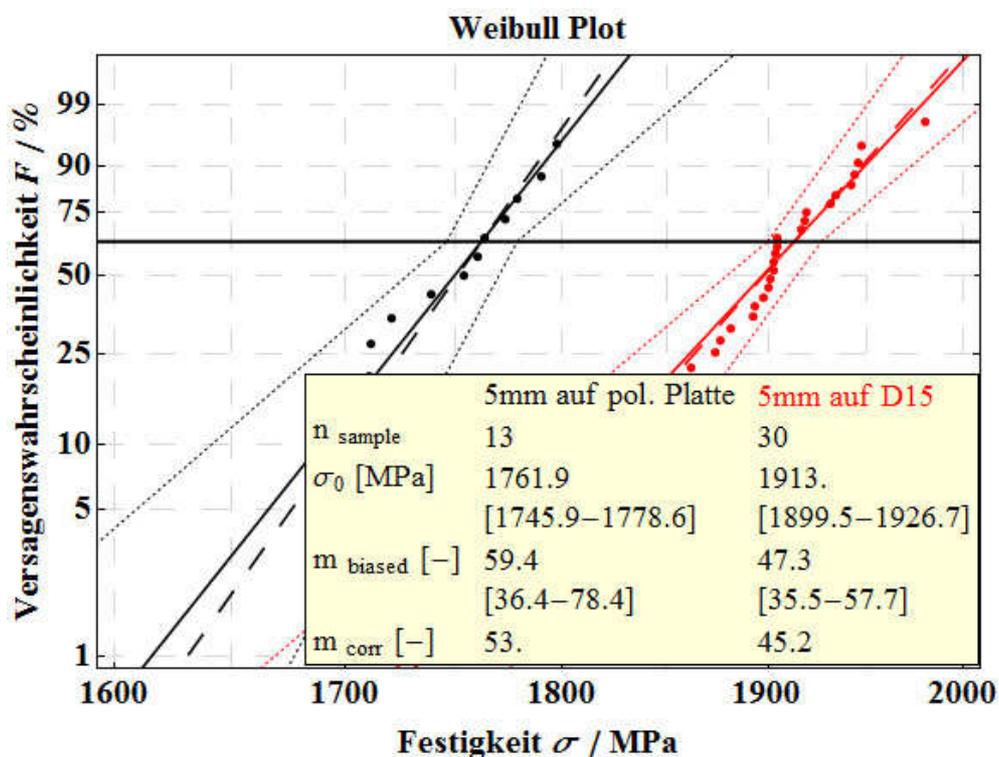
<b>Eigenschaft:</b>	<b>Einheit:</b>	<b>5 mm D15</b>	<b>5 mm poliert</b>
Erstschädigungskraft $P_C$ :	[N]	2259	1822
Max. Zugspannung $\sigma_{Zug,Max}$ :	[MPa]	1890	1746

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Bauteile mit polierter Oberfläche eine höhere Festigkeit besitzen als Bauteile mit geschliffener Oberfläche. Hier wurde gefunden, dass die Platte mit der polierten Oberfläche eine geringere maximale Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  zur Erzeugung von Kreisrissen benötigt. Um eine Begründung zu finden wurde eine Eigenspannungsmessung mittels Raman Streuung<sup>(16), (17)</sup> durchgeführt. Es wurden an den beiden Oberflächen unterschiedliche Zugspannungen festgestellt. Die polierte Oberfläche weist im Mittel  $95 \pm 5$  MPa größere Zugspannung als die geschliffene Oberfläche auf. Die Absolutwerte der Spannung konnten aber nicht angegeben werden. Dieses Ergebnis zeigt,

dass in der polierten Probe bereits geringere Normalkräfte zur Erstschädigung führen können, als bei der Platte mit der geschliffenen Oberfläche.

Der Unterschied zwischen dem Verhalten der beiden Oberflächen wird auch in der Weibullauswertung nach Norm EN 843-5 deutlich. Aufgrund der Zugspannungen die durch das Polieren eingebracht wurden, erfolgt eine Verschiebung der Weibullgeraden zu geringeren Spannungswerten (Abbildung 33).

Die Eigenspannungen an der Oberfläche könnten durch eine Glühbehandlung reduziert werden. Des Weiteren würden Messung mittels Röntgenstrahlung (XRD) Aufschluss über die Eigenspannungsverhältnisse an der Oberfläche geben.

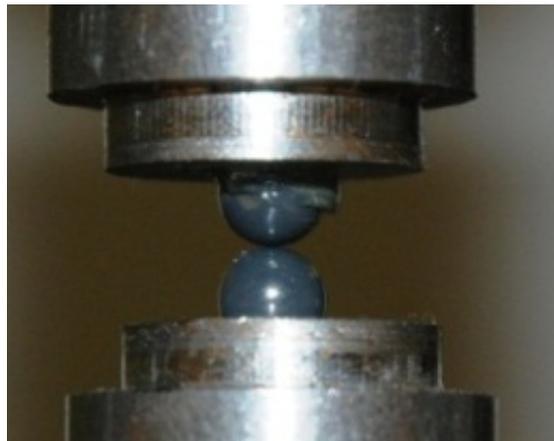


**Abbildung 33: Vergleich der Verteilung der maximal auftretenden Kontaktzugspannungen bei der Erstschädigung für Proben mit unterschiedlicher Oberfläche erzeugt mit 5 mm Kugeln**

### 4.3 Erstschädigung beim Kugel – Kugel Kontakt

Bisher wurde der Kontakt zwischen einer Kugel und einer Platte unter einer einwirkenden Normalkraft untersucht. Nun wird der Kontakt zwischen zwei Kugeln näher studiert. Es ist aus der Theorie bekannt, dass die bei gleicher Normalkraft auftretenden maximalen Zugspannungen  $\sigma_{Zug,Max}$  wesentlich höher sind, als beim Kontakt zwischen Kugel und Platte. Es ist zu erwarten, dass daher die Kraft, die eine Kreisrissentstehung bewirkt, geringer ist als beim Kugel-Platte Kontakt. Beim Kontakt zweier Kugeln durch eine Normalkraft entsteht ein reibungsloser Kontakt, was die Berechnung des Kontaktdrucks beziehungsweise einer maximalen Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  wesentlich erleichtert. Für die Berechnung der Spannungen werden der relative Krümmungsradius  $R_{rel}$  (Gl. 39) und der effektive Elastizitätsmodul  $E_{eff}$  ( Gl. 40) benötigt.

In Abbildung 34 ist ein Übersichtsbild des Versuchsaufbaus dargestellt. Durch die beiden Stahl-Auflager wurde eine Zentrierung und so der möglichst perfekte Kontakt gewährleistet.



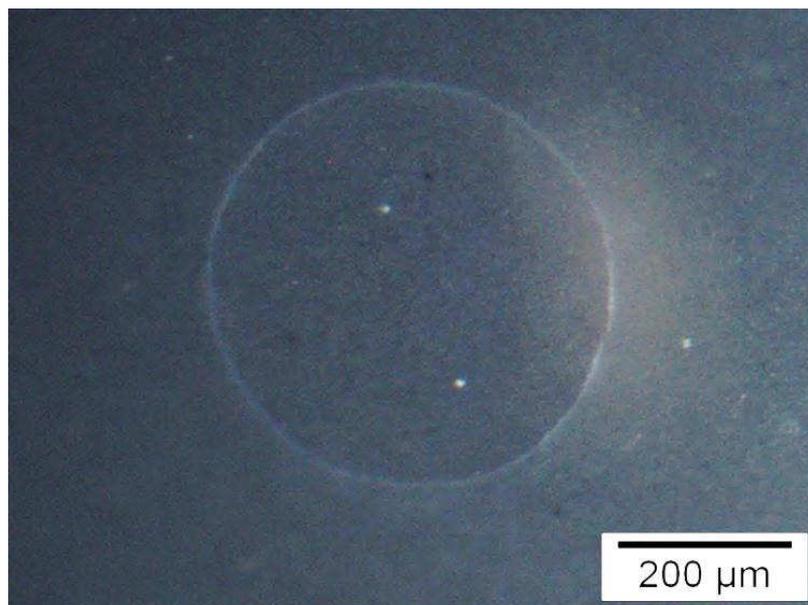
**Abbildung 34: Versuchsaufbau zur Messung des Kugel-Kugel Kontakts**

In Tabelle 15 werden die auftretenden mittleren Kräfte, die zur Erstschädigung notwendig sind, aufgelistet. Zusätzlich sind auch die Rissradien  $a'$  und die mittlere Amplitude des akustischen Signals zum Zeitpunkt der Erstschädigung angegeben. Aufgrund der Kenntnis der Erstschädigungskraft  $P_C$  sind die Ergebnisse für den Kontaktradius  $a$ , für den mittleren Kontaktdruck  $p_m$  beziehungsweise und für die maximale Zugspannung  $\sigma_{Zug,Max}$  nach Hertz dargestellt und farbig markiert.

**Tabelle 15: Experimentell ermittelte Daten für die Erstschädigung beim 5 mm Kugel-Kugel Kontakt (Mittelwerte inklusive Standardabweichung)**

Eigenschaft:	Einheit:	Wert:
Anzahl der Proben:	[-]	20
Erstschädigungskraft $P_C$ :	[N]	$1947 \pm 125$
Amplitude des Signals:	[dB]	51
Rissradius $a'$ :	[ $\mu\text{m}$ ]	$231 \pm 11$
Kontaktradius $a$ :	[ $\mu\text{m}$ ]	$224 \pm 5$
mittlerer Kontaktdruck $p_m$ :	[MPa]	$12314 \pm 262$
max. Zugspannung $\sigma_{Zug,Max}$ :	[MPa]	$2832 \pm 60$

Abbildung 35 zeigt eine typische stereomikroskopische Aufnahme eines Hertz-Risses. In allen durchgeführten Versuchen treten in beiden Kugeln vollständige Kreisrisse auf. Der Kontaktradius  $a$  ist hier nur geringfügig kleiner als der Rissradius  $a'$ . Es ist interessant, dass nur ein akustisches Signal detektiert wird. Daher müssen die Risse in den beiden Kugeln gleichzeitig entstanden sein.

**Abbildung 35: Risse in einer kugelförmigen Probe erzeugt durch eine 5 mm Kugel**

In Abbildung 36 sind die Ergebnisse in einem Weibulldiagramm dargestellt. Auch hier zeigt der hohe Weibullmodul  $m$  die große Zuverlässigkeit der Messergebnisse und die geringe Streuung der ermittelten Spannungen.

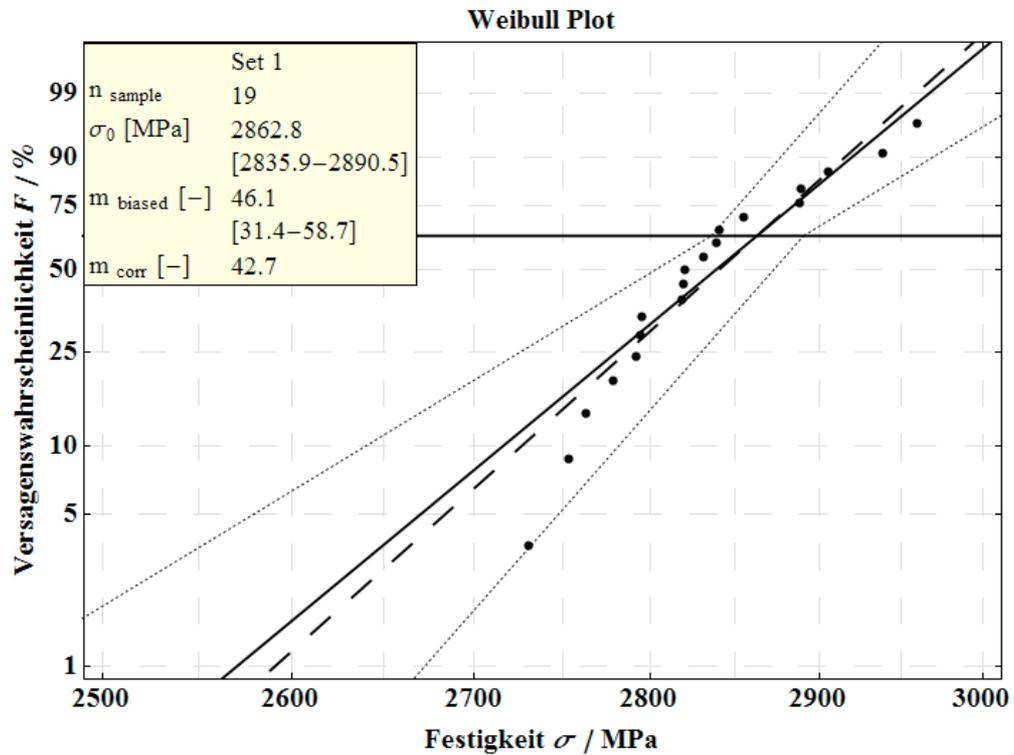


Abbildung 36: Weibullauswertung für den Kontakt zwischen zwei 5 mm Kugeln

#### 4.4 Untersuchung der Rissöffnung beim Kugel-Kugel Kontakt

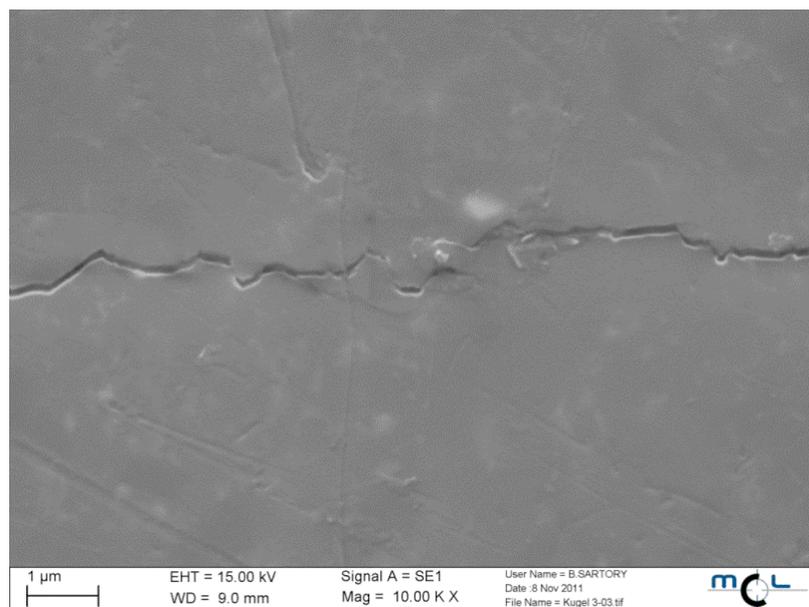
Um die Rissöffnung in den Kugeln der Kugel-Kugel Versuche zu ermitteln ist es notwendig eine Untersuchung mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops durchzuführen. Dazu musste die Kugel in Aceton mithilfe eines Ultraschallreinigers gesäubert werden. Danach wurde der Kreisriss lichtmikroskopisch lokalisiert und mit Kupferklebeband an den Probenhalter geklebt. Dann wurde die Probe besputtert um einen günstigen Kontrast im Rasterelektronenmikroskop zu erzielen. Es wurden drei Proben im Rasterelektronenmikroskop untersucht. Eine Auflistung der Ergebnisse ist in Tabelle 16 dargestellt.

**Tabelle 16: Rissöffnung beim Kugel Kugel Kontakt, siehe Anhang**

Eigenschaft:	Rissöffnung in nm:	Erstschädigungskraft in N:
Probe 1	116	1916
Probe 3	107	1863
Probe 6	296	1919

Obwohl die Rissöffnung der dritten Kugel fast dreimal so groß wie bei den anderen ist, wurde kein signifikanter Unterschied bei den Erstschädigungskräften ermittelt.

In Abbildung 37 ist ein Ausschnitt eines Hertz Risses in einer Kugel zu sehen.



**Abbildung 37: Detailansicht eines Hertz-Risses in einer Kugel bei hoher Vergrößerung**

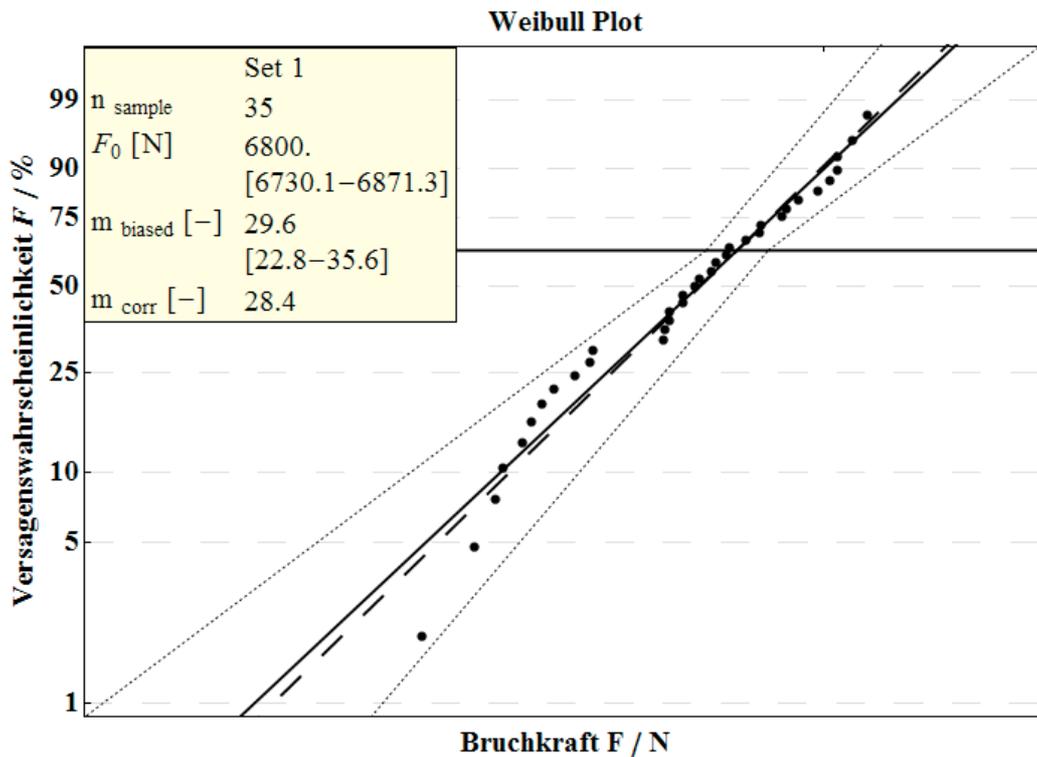
## 4.5 Korellation mit dem Crush Test

Um einen Zusammenhang mit dem Crush-Test zur Materialcharakterisierung herzustellen wurden die 5 mm Kugeln im Kugel-Kugel Kontakt auch bis zur Totalschädigung belastet. Man kann einige Stufen der Schädigung erkennen. Es ist möglich eine Verbindung zwischen den Materialkennwerten, die im Crush-Test ermittelt wurden, und den durch akustische Rissdetektion gewonnenen Schädigungsstufen zu erhalten. Es ist auch eine Aussage über das Verhältnis zwischen Erstschädigung und Totalschädigung beim Kontakt zwischen zwei Kugeln möglich. Die ermittelten Werte des Crush-Tests sind in Tabelle 17 dargestellt. Die Totalschädigungskraft wurde bereits am ISFK für 29 Kugeln ermittelt. In dieser Arbeit wurde überprüft, ob die akustischen Signale zu den Ergebnissen der früheren Versuche passen.

**Tabelle 17: Totalschädigungskraft (Mittelwerte inklusive Standardabweichung)**

<b>Eigenschaft:</b>	<b>Einheit:</b>	<b>Wert:</b>
Totalschädigungskraft aus <sup>(18)</sup>	[N]	6630 ± 289
Totalschädigungskraft:	[N]	6922 ± 129

Die früher bestimmten Werte und die Ergebnisse der eigenen Arbeit sind in Abbildung 38 in einer Weibulldarstellung aufgetragen. Es ist feststellbar, dass sich die akustisch ermittelten Totalschädigungskräfte makellos in die Verteilung der Totalschädigungskräfte aus <sup>(18)</sup> einfügen.



**Abbildung 38: Weibullauswertung für das Crush-Verhalten beim Kugel-Kugel Kontakt mit einem Kugeldurchmesser von 5 mm <sup>(18)</sup>**

Nun ist es möglich, die Erstschädigungskraft beim Kugel-Kugel Kontakt mit der Kraft die zum Totalversagen führt zu vergleichen. In Tabelle 18 sind die beiden Kräfte gegenübergestellt.

**Tabelle 18: Vergleich zwischen der Erstschädigungskraft und der Totalschädigungskraft (Mittelwerte inklusive Standardabweichung)**

Eigenschaft:	Einheit:	Wert:
Erstschädigungskraft $P_C$ :	[N]	$1947 \pm 125$
Totalschädigungskraft:	[N]	$6922 \pm 129$

Durch die Gegenüberstellung der Erstschädigungskraft und der Totalschädigungskraft lässt sich sagen, dass erste Risse, welche durch den Kontakt zwischen den Kugeln entstehen, bereits bei etwa 30 % der Bruchlast auftreten. Das bedeutet, dass der Werkstoff bereits unter sehr viel geringeren Belastungen als der Totalschädigungskraft, stark geschädigt wird und bereits große Risse aufweist.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

---

In dieser Arbeit wurde ein Messstand entwickelt, der eine zuverlässige Detektion der Erstschädigung bei Kontaktbelastung sowohl in Plattenmaterial (Kugel-Platte Versuch) als auch beim Kugel-Kugel Kontakt ermöglicht.

Beim Kugel-Platte Versuch wurden Versuche mit Kugeln mit drei verschiedenen Durchmessern durchgeführt. Bei den Kugeln mit dem kleinsten Durchmesser (5 mm) waren mehrere Schädigungsstufen bis zum Auftreten eines vollständigen Kreisrisses erkennbar. Bei den größeren Kugeln (Durchmesser 10,3 und 12,7 mm) wurden immer vollständige Kreisrisse beobachtet. Die Kraft für die Erzeugung dieser Risse stieg mit steigendem Durchmesser der Kugeln an. Risse, die mit größeren Kugeln erzeugt wurden, waren auch tiefer und wiesen einen größeren Durchmesser auf.

Da das Risswachstum in Keramiken auf einer Defektverteilung beruht, wurde zur Auswertung der Messergebnisse die Weibullstatistik herangezogen. Die Spannungen für die Erstschädigung wiesen eine sehr geringe Streuung auf, was einen sehr hohen Weibullmodul (etwa 50) bedingte. Typischerweise beträgt der Weibullmodul der Biegefestigkeitsverteilung von Keramiken etwa 10 bis 20. Bei steigendem Kugeldurchmesser zeigte sich eine Tendenz zur Verschiebung der Spannungen für die Erstschädigung zu geringeren Spannungswerten. Dieses Phänomen ist eine Analogie zur Volumenabhängigkeit der Festigkeit von keramischen Werkstoffen.

Weiters wurde der Einfluss von unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen untersucht. Es lagen eine geschliffene und eine polierte Platte vor, an denen Kugel-Platte Versuche durchgeführt wurden. Die Kugeln hatten durchwegs die gleiche Oberflächenqualität und es wurden über alle Versuche hinweg identische Kugeln verwendet. Es wurde festgestellt, dass bei polierten Proben die notwendige Normalkraft, um Erstschädigung zu bewirken, im Durchschnitt deutlich geringer war als bei der geschliffenen Probe. Das bedeutet, dass eine Verbesserung der Oberflächenqualität zu einer signifikanten Verringerung der charakteristischen Festigkeit für die Erstschädigung führt. Eine Eigenspannungsmessung nach Raman ergab eine Zugeigenspannungsdifferenz von etwa 100 MPa zwischen den beiden Platten. Des Weiteren konnten in der polierten Probe gegenüber der geschliffenen Probe immer vollständige Kreisrisse direkt nach der Erstschädigung festgestellt werden.

Der Kugel-Kugel Versuch eröffnete die Möglichkeit auch hier die Erstschädigung akustisch zu erkennen, zu charakterisieren und eine Beziehung zum Crush-Test, in welchem zwei aufeinander gestapelte Kugeln bis zum Kollaps belastet werden, herzustellen. Es wurde festgestellt, dass die Kontaktspannungen zwischen zwei Kugeln nach Hertz bei Erstschädigung wesentlich größer sind als beim Kontakt zwischen einer Kugel und einer Platte. Der Vergleich zwischen der Versagenskraft beim Crush-Test und der Erstschädigungskraft zeigte, dass die Erstschädigung bereits bei 30 % der Kraft für das Totalversagen auftritt, somit erste Schritte zum Versagen bei deutlich geringeren Belastungen auftreten.

Die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, die Erstschädigung an Siliziumnitrid zu messen und zu charakterisieren. Für Arbeiten, die in Zukunft durch dieses Messverfahren möglich wurden, soll eine Übersicht der nächsten sinnvollen Schritte der Untersuchungen von Kontaktschädigung gegeben werden.

Mithilfe der akustischen Detektion von Risswachstum ist es möglich, rasch Materialbeziehungsweise Bauteilkennwerte bezüglich der Erstschädigung zu ermitteln.

Durch den Kugel-Kugel Kontakt mit größerem Durchmesser soll bestätigt werden, ob die Kraft die zur Erstschädigung notwendig ist, stets zirka 30 % der Kraft für Totalschädigung im Crush-Test beträgt.

In weiterer Folge können verschiedene Materialien oder Kugeln mit unterschiedlichen Durchmessern miteinander in Kontakt gebracht werden. Für einen Vergleich mit theoretischen Berechnungen ist zu beachten, dass bei Kombination von verschiedenen Materialien der Unterschied der elastischen Eigenschaften und somit die Reibung eine große Rolle spielen kann.

Möglicherweise könnten Wärmebehandlungen zur Verminderung der Eigenspannungen einen Einfluss bezüglich der Erstschädigungskraft zeigen. Auch dieser Einfluss kann durch einfache akustische Detektion überprüft werden.

Ein detailliertes Verständnis für die Schädigungsvorgänge beim „statischen“ Kontakt zwischen zwei gekrümmten Körpern hilft in weiterer Folge, die Schädigung bei Überrollung und die Relevanz verschiedener Material- und Belastungsparameter besser zu verstehen.

## 6 Literaturverzeichnis

---

1. **Lawn, Brian R.** Indentation of Ceramics with Spheres: A Century after Hertz. *Journal of the American Ceramic Society*. 1998, 81.
2. **Galín, L.A.** *Contact Problems - The Legacy of L.A. Galín*. s.l. : Springer Science+Business Media, B.V., 2008.
3. **Fischer-Cripps, Anthony C.** *Introduction to Contact Mechanics-Second Edition*. s.l. : Springer Science+Business Media, LLC, 2007.
4. **Frank, F.C. und Lawn, B.R.** On the theory of Hertzian fracture. *Proceedings of the Royal Society. A*, 1967, 299.
5. **Lee, Seung Kun, Wuttiaphan, Sataporn und Lawn, Brian R.** Role of Microstructure in Hertzian Contact Damage in Silicon Nitride: I, Mechanical Characterization. *Journal of the American Ceramic Society*. 1997, 80.
6. **Christ, H.J.** Universität Siegen. <http://www.uni-siegen.de>. [Online] [Zitat vom: ] [http://www.uni-siegen.de/fb11/lmw/downloads\\_prints/materialermuedung/bruchmechanik-steilkurs.pdf](http://www.uni-siegen.de/fb11/lmw/downloads_prints/materialermuedung/bruchmechanik-steilkurs.pdf).
7. **Johnson, K.L.** *Contact Mechanics*. s.l. : Cambridge University Press, 1987.
8. **Popov, Valentin L.** *Kontaktmechanik und Reibung*. Berlin Heidelberg : Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2009. 978-3-642-13301-5.
9. **Timoshenko, S.P. und Goodier, J.N.** *Theory of Elasticity - Third Edition*. s.l. : McGraw-Hill Publishing Company, 1970.
10. **Lawn, Brian.** *Fracture of Brittle Solids - Second Edition*. s.l. : Cambridge University Press, 1993.
11. **Witschnig, Stefan.** Zähigkeitsmessung an keramischen Kugeln. Leoben : s.n., 2010.
12. **Licht, V., Hülsmeier, P. und Fett, T.** Probability of cone crack initiation due to spherical contact loading. *Journal of European Ceramic Society*. 2004, 24.
13. **Ohgushi, Kohji und Ichikawa, Masahiro.** Fracture Mechanics Study of Ring Crack Initiation in Ceramics by Sphere Indentation. *JSME International Journal*. 1996, Bd. A, 39.

14. **Harrer, W., Supancic, P. und Danzer, R.** *Bestimmung der Festigkeit scheibenförmiger Proben bei Raumtemperatur.* 2009.
15. **Hegedusova, Lucia, Kovalcikova, A. und Ceniga, L.** Contact strength and crack formation in monolithic ceramic materials. *Materials Science and Engineering.* 2010, Bd. A, 527.
16. **Muraki, N., Katagiri, G. und Sergio, V.** Mapping of residual stresses around indentation in beta-silicon nitride using Raman spectroscopy. *Journal of Materials Science.* 1997, 32.
17. **Ohtsuka, S., Wenliang, Z. und Shigemi, T.** In-depth analysis of residual stress in an alumina coating on silicone nitride substrate using confocal Raman piezi-spectroscopy. *Acta Materialia.* 2007, 55.
18. **Supancic, P., Danzer, R. und Harrer, W.** *Festigkeitsprüfung an Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Kugeln.* 2008.

# 7 Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Quasi-plastische Verformungszone bei heterogenen Keramiken nach Lawn <sup>(1)</sup> .....	12
Abbildung 2: Beanspruchung von Mode II Rissen <sup>(6)</sup> .....	12
Abbildung 3: Verformung einer ebenen Oberfläche zufolge eines kugelförmigen Eindringkörpers unter Normkrafteinwirkung, aus <sup>(8)</sup> .....	15
Abbildung 4: Geometrische Betrachtung der Kontaktfläche zur Berechnung der Verschiebung eines beliebigen Punktes B, aus <sup>(8)</sup> .....	17
Abbildung 5: Radialspannungsverteilung an der Oberfläche eines elastischen Halbraumes mit $\nu = 0,27$ .....	20
Abbildung 6: mögliche auftretende Krümmungsverhältnisse, nach <sup>(8)</sup> .....	22
Abbildung 7: Kontaktradius $a$ zufolge einer Normalkraft $P$ beim Kugel-Platte Kontakt für drei unterschiedliche Kugeldurchmesser .....	25
Abbildung 8: mittlerer Kontaktdruck $pm$ zufolge einer Normalkraft $P$ beim Kugel-Platte Kontakt für drei unterschiedliche Kugeldurchmesser .....	26
Abbildung 9: maximale Zugspannung $\sigma_{Zug, Max}$ zufolge einer Normalkraft $P$ beim Kugel-Platte Kontakt für drei unterschiedliche Kugeldurchmesser .....	27
Abbildung 10: Kontaktradius $a$ zufolge einer Normalkraft $P$ beim Kugel-Kugel Kontakt .....	28
Abbildung 11: Absolutwerte des mittleren Kontaktdrucks $pm$ beziehungsweise der maximalen Zugspannung $\sigma_{Zug, Max}$ zufolge einer Normalkraft $P$ beim Kugel-Kugel Kontakt .....	29
Abbildung 12: Universalprüfmaschine MIDI mit zugehöriger Mess- und Steuereinheit DOLI EDC 580 und dem Servoantriebsverstärker .....	32
Abbildung 13: Ultraschallmessköpfe (rote Pfeile) an den Auflagern beim Kugel-Platte Versuch .....	33
Abbildung 14: VALLEN AE mit angeschlossenen Ultraschallmessköpfen (siehe Pfeile) und dem parametrischen Eingang .....	34
Abbildung 15: Zusammenhang zwischen der elektrischen Spannung in mV am analogen Ausgang der DOLI EDC 580 mit der tatsächlichen Kraft in N .....	35
Abbildung 16: Überblick der Schädigungsstufen beim 5 mm Kugel-Platte Kontakt .....	38
Abbildung 17: Risse in einer D15 geschliffenen plattenförmigen Probe erzeugt durch eine 5 mm Kugel bei einem Versuchsabbruch nach einem akustischen Signal .....	40
Abbildung 18: Weibullverteilung für die Kraft zur Bildung eines Risses zufolge des Kontaktes zwischen einer D15 geschliffenen Platte und einer 5 mm Kugel .....	41
Abbildung 19: Risse in einer D15 geschliffenen plattenförmigen Probe, die durch den Kontakt mit einer 5 mm Kugel erzeugt wurden nach dem zweiten akustischen Ereignis .....	42
Abbildung 20: Risse in einer D15 geschliffenen plattenförmigen Probe, die durch den Kontakt mit einer 5 mm Kugel erzeugt wurden nach dem dritten akustischen Ereignis .....	43
Abbildung 21: Risse in einer D15 geschliffenen plattenförmigen Probe erzeugt durch eine 10,3 mm Kugel .....	45

Abbildung 22: Weibullverteilung für die Kraft zur Bildung eines Risses zufolge des Kontaktes zwischen einer D15 geschliffenen Platte und einer 10,3 mm Kugel .....	46
Abbildung 23: Risse in einer D15 geschliffenen plattenförmigen Probe erzeugt durch eine 12,7 mm Kugel.....	47
Abbildung 24: Weibullverteilung für die Kraft zur Bildung eines Risses zufolge des Kontaktes zwischen einer D15 geschliffenen Platte und einer 12,7 mm Kugel .....	48
Abbildung 25: Weibullverteilung für die Kraft zur Bildung eines Risses zufolge des Kontaktes zwischen einer D15 geschliffenen Platte und Kugeln verschiedenen Durchmessers .....	49
Abbildung 26: Vereinzelte Proben der mit D15 geschliffenen Platte, die mit Kugeln unterschiedlichen Durchmessers belastet wurden (links: 5 mm; Mitte: 10,3 mm, rechts:12,7 mm) .....	50
Abbildung 27: Bestimmung der Tiefe des Ringrisses an den eingebetteten Proben.....	51
Abbildung 28: Querschliff durch das Rissystem mit gemessenem Radius und Winkel. Die Datenauswertung wurde mithilfe von Analysis 5 durchgeführt .....	52
Abbildung 29: Durchmesser des Ringrisses und Schnitt des Ringrisses mit der Schleifebene.....	52
Abbildung 30: Ermittlung von Stützstellen für den Hyperbelfit.....	54
Abbildung 31: Übersichtsbild der polierten Platte (links) und der D15 geschliffenen Platte (rechts) ..	55
Abbildung 32: Vollständiger Kreisriss in einer polierten plattenförmigen Probe, erzeugt mit einer 5 mm Kugel.....	57
Abbildung 33: Vergleich der Verteilung der maximal auftretenden Kontaktzugspannungen bei der Erstschädigung für Proben mit unterschiedlicher Oberfläche erzeugt mit 5 mm Kugeln.....	58
Abbildung 34: Versuchsaufbau zur Messung des Kugel-Kugel Kontakts .....	59
Abbildung 35: Risse in einer kugelförmigen Probe erzeugt durch eine 5 mm Kugel.....	60
Abbildung 36: Weibullauswertung für den Kontakt zwischen zwei 5 mm Kugeln .....	61
Abbildung 37: Detailansicht eines Hertz-Risses in einer Kugel bei hoher Vergrößerung .....	62
Abbildung 38: Weibullauswertung für das Crush-Verhalten beim Kugel-Kugel Kontakt mit einem Kugeldurchmesser von 5 mm <sup>(18)</sup> .....	64

# 8 Tabellenverzeichnis

---

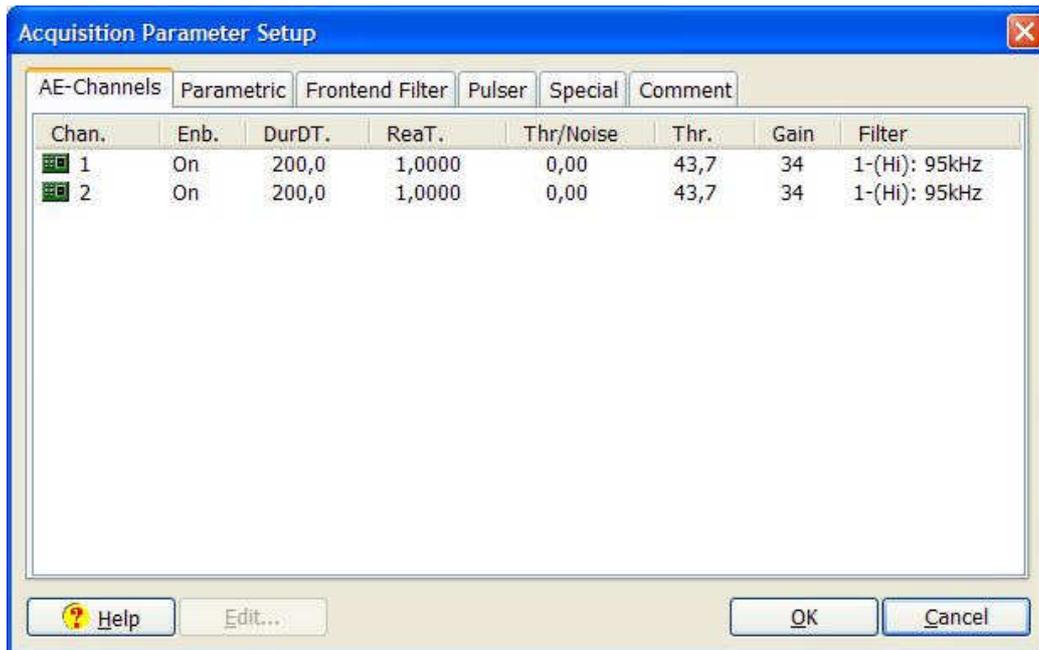
Tabelle 1: Materialkennwerte für $\text{Si}_3\text{N}_4$ die theoretische Betrachtung der Hertz-Theorie <sup>(11)</sup> .....	24
Tabelle 2: Beschreibung der Blockprogrammierung.....	33
Tabelle 3: Experimentell ermittelte und berechnete Daten für die Erstschädigung beim 5 mm Kugel- Platte Kontakt (Mittelwerte inklusive Standardabweichung) .....	39
Tabelle 4: Experimentell ermittelte und berechnete Daten für die Erstschädigung beim 5 mm Kugel- Platte Kontakt (Mittelwerte inklusive Standardabweichung) .....	42
Tabelle 5: Vergleich zwischen dem experimentell ermittelten Rissradius $a'$ und dem berechneten Kontaktradius $a$ .....	43
Tabelle 6: Experimentell ermittelte Daten für die Erstschädigung beim 10,3 mm Kugel-Platte Kontakt (Mittelwerte inklusive Standardabweichung) .....	44
Tabelle 7: Vergleich zwischen dem experimentell ermittelten Rissradius $a'$ und dem Kontaktradius $a$ .....	45
Tabelle 8: Experimentell ermittelte Daten für die Erstschädigung beim 12,7 mm Kugel-Platte Kontakt (Mittelwerte inklusive Standardabweichung) .....	47
Tabelle 9: Vergleich zwischen dem experimentell ermittelten Rissradius $a'$ und dem berechneten Kontaktradius $a$ .....	48
Tabelle 10: mittlere Erstschädigungskräfte und Spannungen für Kugel-Platte Kontaktversuche mit Kugeln unterschiedlichen Durchmessers .....	49
Tabelle 11: Tiefe der Ringrisse und Winkel des Kegelrisses beim Kugel-Platte Kontakt für Eindringkörper unterschiedlichen Durchmessers .....	51
Tabelle 12: Polier- beziehungsweise Schleifstufen mit zugehörigen Kräften.....	55
Tabelle 13: Daten für die Erstschädigung beim 5 mm Kugel-polierete Platte Kontakt (Mittelwerte inklusive Standardabweichung).....	56
Tabelle 14: Vergleich der Erstschädigungskräfte und der maximalen Zugspannungen bei zwei verschiedenen Oberflächen (D15 beziehungsweise poliert).....	57
Tabelle 15: Experimentell ermittelte Daten für die Erstschädigung beim 5 mm Kugel-Kugel Kontakt (Mittelwerte inklusive Standardabweichung) .....	60
Tabelle 16: Rissöffnung beim Kugel Kugel Kontakt, siehe Anhang .....	62
Tabelle 17: Totalschädigungskraft (Mittelwerte inklusive Standardabweichung).....	63
Tabelle 18: Vergleich zwischen der Erstschädigungskraft und der Totalschädigungskraft (Mittelwerte inklusive Standardabweichung) .....	64

# 9 Anhang

---

## 9.1 Ultraschallmikrophoneinstellungen

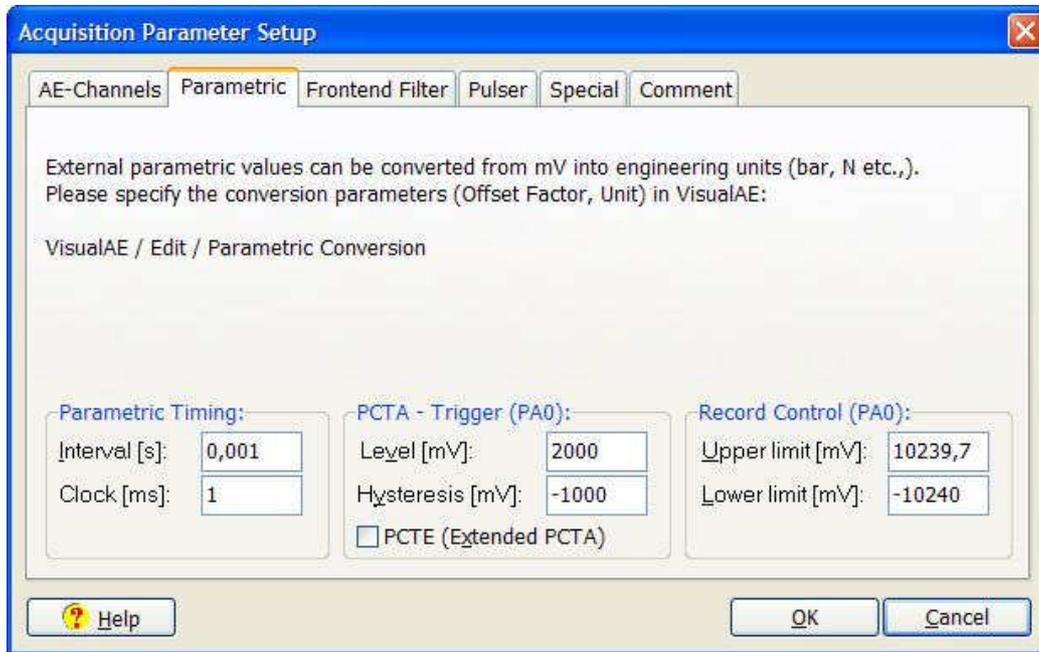
In Anhang 1 werden die Einstellungen der Ultraschallmikrophone gezeigt. An beiden Kanälen wurden die gleichen Werte gesetzt.



Anhang 1: Einstellungen der Ultraschallmikrophone des VALLEN AE

## 9.2 Parametrischer Eingang des Vallen AE

In Anhang 2 sind die gewählten Einstellungen des parametrischen Eingangs des VALLEN AE gezeigt.



Anhang 2: Einstellungen des parametrischen Eingangs des VALLEN AE

### 9.3 Experimentelle Daten Kugel-D15 Platte

Erstschädigungskraft in N		
5 mm	10,3 mm	12,7 mm
2519,58	5480,94	8941,62
2447,82	6301,92	8890,35
2589,77	6570,06	8335,14
2443,87	5189,14	9402,98
2288,51	6206,49	8377,73
2279,84	6015,64	8608,02
2462,01	5244,35	8361,17
2300,34	6176,52	10086,70
2402,08	6566,90	7917,94
2290,88	6137,09	8810,70
2347,66	6450,18	8578,05
2260,91	6143,40	8855,65
2021,16	5993,56	9099,35
2304,28	5794,03	8932,94
2110,28	5697,82	9780,74
2203,34	6092,14	7922,68
2298,76	6267,22	9753,14
1734,09	5977,00	8302,02
1921,79	6000,66	9923,49
2298,76	6359,49	8376,15
2115,80	6168,64	9339,89
2358,70	6028,26	9500,77
2153,65	6013,27	8432,15
2219,90	6408,38	9648,25
2413,91	6003,02	9858,03
2194,66	6606,33	9255,50
2355,55	6251,44	10063,10
1873,68	5633,94	8939,25
2264,85	5678,89	8056,75
2303,49	6358,70	
	5774,31	
	6247,50	
	6152,07	
	6382,36	
	6054,28	
	5473,05	
	6170,21	
	6042,45	
	5815,32	
	6427,31	
	5715,96	

#### 9.4 Experimentelle Daten Kugel-polierte Platte:

Erstschädigungskraft in N
<b>5 mm</b>
1877,58
1799,51
1866,54
1670,18
1907,55
1715,13
1924,90
1713,55
1676,48
1744,31
1985,63
1847,62
1962,76

#### 9.5 Experimentelle Daten Kugel-Kugel Kontakt:

Erstschädigungskraft in N
<b>5 mm</b>
1915,51
1835,85
1862,67
1866,61
1961,25
1918,66
1957,30
2218,35
1920,24
2062,98
2170,24
1942,32
1805,88
1785,38
1990,43
2061,41
1742,00
2098,47
1868,17