

**Fraktografische Untersuchungen an
basischen feuerfesten Baustoffen
unterschiedlicher Sprödigkeit**

Dissertation am Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde
der Montanuniversität Leoben

Manhart Christian

Leoben, im Juli 2007

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1 Kurzfassung..... | 1 |
| 2 Problemstellung..... | 2 |
| 3 Stand des Wissens..... | 3 |
| 3.1 Einleitung..... | 3 |
| 3.2 Fraktografie..... | 3 |
| 3.3 Verfahren zur Abbildung von Oberflächen..... | 9 |
| 3.3.1 Einführung..... | 9 |
| 3.3.2 Zweidimensionale Abtastung..... | 9 |
| 3.3.3 Berührungsfreie Erfassung durch optische Instrumente..... | 12 |
| 3.3.4 Berührungsfreie Erfassung durch rastersondenmikroskopische Techniken..... | 13 |
| 3.3.5 Sonstige Verfahren..... | 13 |
| 3.3.6 Die Auflösungen und Abbildungsbereiche der Verfahren..... | 15 |
| 3.4 Das Stereomatching-Verfahren zur Erfassung der Topografie von Bruchoberflächen..... | 17 |
| 3.4.1 Die Photogrammetrie..... | 17 |
| 3.4.2 Die Anwendung des stereoskopischen Verfahrens an Kippbildern..... | 19 |
| 3.4.3 Die Entwicklung der Stereomatching-Technik..... | 20 |
| 3.4.4 Der computergestützte Stereomatchingvorgang..... | 21 |
| 3.4.5 Der Begriff Rekonstruktion von Oberflächen..... | 21 |
| 3.5 Anwendungsrelevante Eigenschaften der digitalen Kameratechnik..... | 22 |
| 3.5.1 Die Technik von Bildsensoren..... | 22 |
| 3.5.2 Der Bloomingeffekt..... | 23 |
| 3.6 Die Berechnung der Schärfentiefe..... | 23 |
| 4 Verfahren, Geräte, Analysemethoden und Durchführung..... | 26 |
| 4.1 Untersuchte Materialien..... | 26 |
| 4.1.1 Feuerfestbaustoffe..... | 26 |
| 4.1.2 Zementmörtel..... | 26 |
| 4.2 Probenherstellung..... | 28 |
| 4.3 Geräte..... | 29 |
| 4.3.1 Mechanische Prüfung..... | 29 |
| 4.3.2 Die stereoskopische Vorrichtung..... | 29 |
| 4.3.3 Bilderstellung..... | 30 |
| 4.4 Software..... | 32 |
| 4.4.1 Kamerasoftware..... | 32 |
| 4.4.2 Die Software MeX 4.1 zur Durchführung der 3D-Rekonstruktion..... | 33 |
| 4.4.3 Selbst entwickelte Software..... | 33 |
| 4.4.3.1 Fracture Analyzer..... | 33 |
| 4.4.3.2 Histogrammanalysesoftware..... | 34 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4.3.3 Software zur Mittelung von Bildern..... | 35 |
| 4.5 Die Bestimmung der bruchmechanischen Eigenschaften..... | 36 |
| 4.5.1 Bruchmechanische Parameter..... | 36 |
| 4.5.2 Elastische Konstanten..... | 37 |
| 4.6 Die dreidimensionale Abbildung der Bruchoberfläche..... | 38 |
| 4.7 Fraktografische Analyse..... | 38 |
| 4.7.1 Die laterale Korrelationslänge..... | 38 |
| 4.7.2 Die quadratische mittlere Profilneigung..... | 40 |
| 4.7.3 Der Rauigkeitsparameter R_s | 41 |
| 4.7.4 Die fraktale Dimension..... | 41 |
| 4.7.5 Ablauf der Erstellung und fraktografischen Analyse der 3D-Daten..... | 42 |
| 4.7.6 Bestimmung der lateralen Korrelationslänge anhand der 3D-Daten einer Bruchoberfläche..... | 43 |
| 4.8 Werkzeuge zur Bestimmung der Bildqualität..... | 43 |
| 4.9 Optimierung der Bildqualität..... | 44 |
| 4.9.1 Beispiele für Einflussfaktoren auf die Bildqualität..... | 44 |
| 4.9.2 Optimierung der Bildqualität..... | 47 |
| 4.10 ARIMA-Modellanalyse an Profilen..... | 50 |
| 5 Untersuchungsergebnisse..... | 53 |
| 5.1 Ergebnisse der ARIMA Modellanalyse..... | 53 |
| 5.2 Untersuchung der Reproduzierbarkeit des stereoskopischen Verfahrens anhand der lateralen Korrelationslänge..... | 53 |
| 5.3 Ergebnisse der fraktografischen Untersuchungen..... | 56 |
| 5.3.1 Feuerfeststeine..... | 56 |
| 5.3.1.1 Untersuchungen an basischen Steinen mit unterschiedlicher Sprödigkeit..... | 56 |
| 5.3.1.2 Untersuchungen an basischen Feuerfestbaustoffen mit unterschiedlichem Bindungstyp..... | 66 |
| 5.3.2 Zementmörtel..... | 70 |
| 6 Diskussion und Ausblick..... | 76 |
| 6.1 Diskussion..... | 76 |
| 6.1.1 Zusammenfassung der Bruchflächenanalyse..... | 76 |
| 6.1.2 Experimentelle Herausforderungen..... | 76 |
| 6.2 Ausblick..... | 78 |
| 7 Quellen..... | 80 |
| 8 Anhang..... | 85 |

1 Kurzfassung

Die Durchführung von fraktografischen Analysen an Bruchoberflächen von basischen gebrannten Feuerfestbaustoffen ist nicht Stand der Technik. Aus diesem Grund wurde ein fraktografisches Analyseverfahren entwickelt. Es umfasst die digitale dreidimensionale (3D) Erfassung der Bruchoberfläche und die Berechnung von strukturbeschreibenden Kennwerten der Oberfläche.

Für die 3D-Erfassung der Bruchoberfläche wurde ein optisches stereoskopisches Verfahren in Verbindung mit einer Stereomatchingsoftware gewählt. Die Erstellung der Kippbilder erfolgt mit einer Präzisionsdigitalkamera, die in eine stereoskopische Vorrichtung eingebaut wurde. Die Kippbilder stellen die Basis für die Berechnung der 3D-Daten dar. Deshalb werden hohe Ansprüche an die Qualität der Bilder gestellt. Die Bildqualität hängt auch von den optischen Eigenschaften der Probe ab und wird durch die Anforderungen der Stereomatchingsoftware definiert. Aufgrund der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung der untersuchten Feuerfestbaustoffe weisen auch die optischen Eigenschaften der Bruchoberflächen eine dementsprechende Variation auf. Aufgrund dessen wurde eine Prozedur zur Kontrolle und Optimierung der Bildqualität entwickelt und angewandt. Dafür werden verschiedene Messwerkzeuge, wie z. B. die Histogrammanalyse oder die Bildqualitätsanalyse der Stereomatchingsoftware, eingesetzt. Die Optimierung der Bildqualität erfolgt durch Variation der Kameraparameter, der Beleuchtungsstärke und durch Beschichtung der Bruchoberfläche.

Die Herstellung der für die Untersuchungen benötigten Bruchoberflächen erfolgte mit dem Keilspalttest nach Tschegg [50,51]. Dabei wurden mechanische und bruchmechanische Parameter der Probe bestimmt. Dazu gehören der Elastizitätsmodul E , die spezifische Bruchenergie G_f , die charakteristische Länge l_{ch} und die nominelle Kerbzugfestigkeit σ_{NT} .

Für die fraktografische Analyse wurden folgende Parameter gewählt: die laterale Korrelationslänge ξ [44 - 46], die fraktale Dimension D_s [47], der Rauigkeitsparameter R_s und die mittlere quadratische Profilneigung $P_{\Delta q}$ nach EN 4287 [36].

Die Untersuchungen in dieser Arbeit haben gezeigt, dass die optische Stereoskopie für die Anwendung an grobkeramischen Bruchoberflächen geeignet ist. Die fraktografische Analyse ergab für alle Materialien eine nichtlineare Korrelation zwischen der lateralen Korrelationslänge ξ und der charakteristischen Länge l_{ch} . Die Gegenüberstellung des Rauigkeitsparameters R_s , der fraktalen Dimension D und der mittleren quadratischen Profilneigung $P_{\Delta q}$ mit der charakteristischen Länge l_{ch} sowie der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT} ergab keine Korrelation.

2 Problemstellung

Es sollen fraktografische Untersuchungen an Bruchoberflächen von basischen Feuerfestbaustoffen mit unterschiedlicher Sprödigkeit durchgeführt werden. Die Herstellung der Bruchoberflächen erfolgt mit dem Keilspalttest nach Tschegg. Die zu untersuchenden Materialien sind grobkeramische Baustoffe mit einer Maximalkorngröße von vier bis fünf Millimeter. Die Bruchoberflächen dieser Baustoffe weisen eine dementsprechende Topografie auf.

Die fraktografische Analyse erfolgt an den dreidimensionalen (3D) Daten der Bruchoberfläche. Dafür muss eine geeignete Methode zur 3D-Erfassung ausgewählt werden. Das Verfahren sollte eine laterale Auflösung von 100 µm aufweisen, damit die Rauigkeit der Bruchoberfläche, welche aus der Kornzusammensetzung und den bruchmechanischen Eigenschaften resultiert, wiedergegeben werden kann.

Bei der fraktografischen Analyse sollen Parameter der Bruchoberfläche berechnet werden. Diese müssen die Rauigkeit und die durch den Bruchvorgang entstandenen Strukturen beschreiben. Diese fraktografischen Parametern sollen den bruchmechanischen Eigenschaften der Proben gegenübergestellt werden.

Mit Hilfe der Arbeit soll geprüft werden, ob ein Zusammenhang zwischen den quantitativen Merkmalen der Bruchfläche und den bruchmechanischen Eigenschaften erhalten werden kann.

3 Stand des Wissens

3.1 Einleitung

Bei metallischen Werkstoffen ist die Fraktografie seit geraumer Zeit eine etablierte Wissenschaft. Sie findet bei der Analyse von Schadensfällen und zur Vertiefung des Verständnisses des bruchmechanischen Verhaltens Verwendung. Im Gegensatz dazu ist die Fraktografie bei Baustoffen eine sehr junge Wissenschaft und wird bei Feuerfestbaustoffen kaum angewendet. Bei Beton- und Mörtelbaustoffen wurden bereits Anstrengungen unternommen, um die Anwendbarkeit von Parametern der Bruchoberfläche, wie die fraktale Dimension oder die Rauigkeitsparameter, anhand von Gesetzmäßigkeiten zu beweisen. Bei diesen Untersuchungen wurden hauptsächlich Zusammenhänge zwischen der Rauigkeit der Bruchoberfläche und bruchmechanischen Kennwerten gesucht. Die Herstellung der dafür benötigten Bruchoberflächen erfolgte ausschließlich mit bruchmechanischen Prüfverfahren. Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

3.2 Fraktografie

Bei Baustoffen wurden einige fraktografische Arbeiten durchgeführt [1 - 11], für die Untersuchungen kamen folgende Kenngrößen zur Beschreibung der Bruchoberfläche zum Einsatz:

- Rauheitsparameter R_L und R_s
- Fraktale Dimension D

R_L ist der Quotient aus der wahren und der projizierten Länge eines Profiles. Ein Beispiel für Profile einer Oberfläche, die im Rahmen dieser Arbeit bestimmt wurden, ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Parameter R_s ist der Quotient aus der wahren und der projizierten Oberfläche einer Bruchfläche.

Die oben genannte fraktale Dimension D wird auf unterschiedliche Arten ermittelt:

- Richardson Plot des Rauheitsparameters R_s [1],
- Grid Scaling Methode [2] nach V. Mechtcherine,
- Slit-Island Methode [3, 4] und die modifizierte Slit-Island Methode [3, 4, 5],
- Spektralmethode oder die Methode der 2D Fast Fourier Transformation [3, 4, 6],
- und die Box Counting Methode [6, 7].

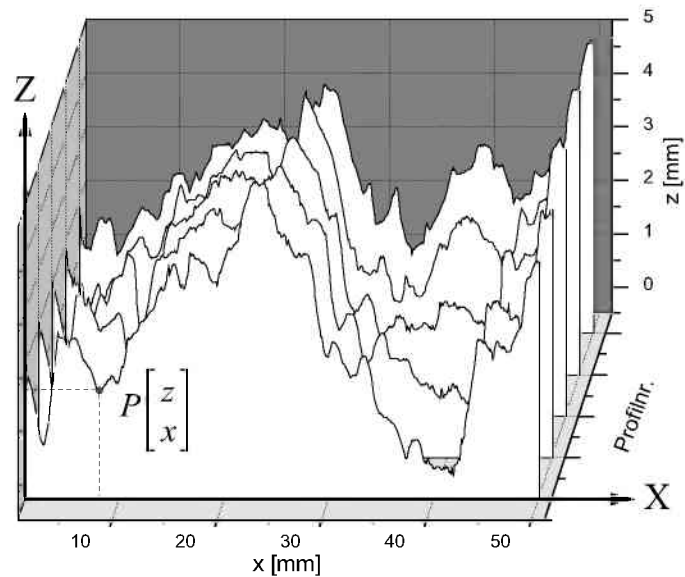


Abb. 1: Darstellung der Oberflächendaten in Form von Profilen und eines Punktes $P(z,x)$

Die Ermittlung der fraktalen Dimension D anhand des Richardson-Plots [1] erfolgt mit dem Rauigkeitsparameter R_s . R_s wird für verschiedene Gitter ermittelt. Wobei die Größe der quadratischen Gitterelemente variiert wird. In den Abbildungen 2a und 2b sind Beispiele für Gitter mit unterschiedlichen Elementgrößen dargestellt.

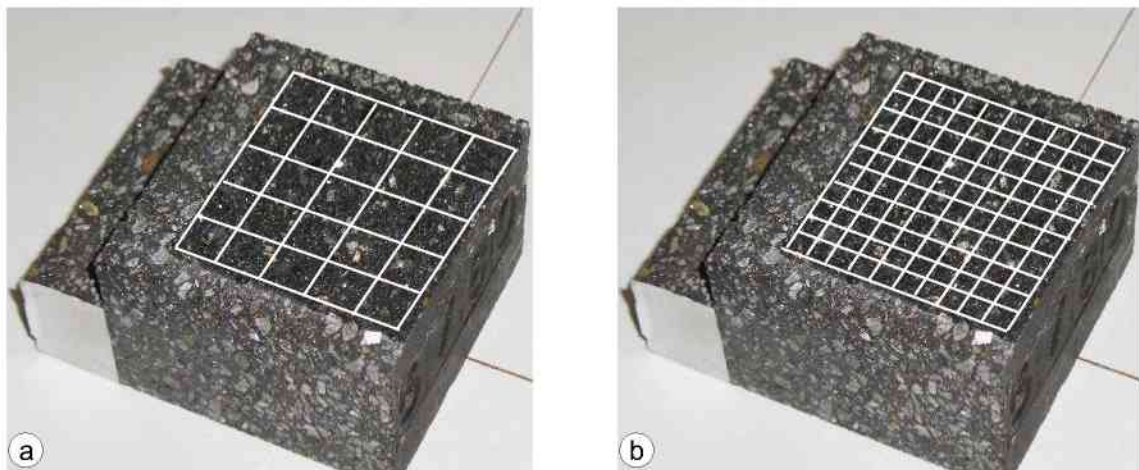


Abb. 2: Beispiel einer Bruchfläche mit einer schematischen Darstellung eines Gitters. In b) wurde die Elementgröße gegenüber a) halbiert

Die in den Abbildungen 2a und 2b dargestellten Probekörper wurden im Rahmen dieser Arbeit untersucht. In jedem Knoten des Gitters ist eine Höheninformation enthalten. Dieses Gitter kann auch mit einer Matrix verglichen werden, in dessen Matrixelementen die Höhe abgelegt wurde. Der Abstand der Elemente zueinander ist innerhalb der Spalten und Zeilen der Matrix äquidistant. Die Bestimmung der wahren Oberfläche, welche für die Berechnung von R_s benötigt wird, erfolgt nach [1] durch Berechnung eines Modells der Bruchfläche. Dies wird durchgeführt indem zwischen den Höhenwerten an den jeweiligen Gitterpositionen Dreiecke aufgespannt werden. Die Flächen der Dreiecke werden summiert und so die approximierte Oberfläche berechnet. Im Richardson-Plot wird auf der Ab-

szisse der quadratische Gitterabstand logarithmisch und auf der Ordinate R_s logarithmisch aufgetragen. Die Bestimmung der fraktalen Dimension D erfolgt anhand der Gleichung (1).

$$D = 2 - s \quad (1)$$

Die Steigung s wird im linearen Abschnitt der Regressionskurve im Richardson Plot ermittelt.

Die Grid Scaling Methode [2] basiert auf der Abhängigkeit der gemessenen Oberfläche von der Gittergröße, wobei die Oberfläche A mit abnehmender Gittergröße r zunimmt. Alle Werte von A und r werden in ein doppelt logarithmisches Diagramm eingetragen und der Steigungswinkel β am linearen Abschnitt der Korrelationskurve bestimmt. Die Berechnung der fraktalen Dimension erfolgt nach Gleichung (2).

$$D = 2 + |\tan \beta| \quad (2)$$

Bei der Slit-Island-Methode [3, 4] wird die Bruchfläche eingefärbt und anschließend um eine Höhendifferenz plan abgeschliffen (siehe Abbildung 3). So entstehen helle Flächen (Inseln) in einer dunklen Umgebung, die fotografiert und als Graustufenbild analysiert wird. Dieser Vorgang wird mehrfach durchgeführt. An jeder Insel erfolgt die Ermittlung des Umfanges P und der Fläche A . Die fraktale Dimension wird mit Gleichung (3) berechnet.

$$D = D' + 1 \quad (3)$$

D' hängt gemäß folgender Potenzfunktion von A und P ab.

$$A = P^{(2/D')} \quad (4)$$

Die Bestimmung von D' erfolgt in einem Richardson-Plot, indem der Umfang P jeder Insel auf der Ordinate und die Fläche A auf der Abszisse aufgetragen wird. Die Steigung im linearen Teil der Kurve entspricht D' .

Bei der modifizierten Slit-Island Methode [3, 4, 5] wird auf das Abschleifen der Bruchfläche verzichtet. Ein Graustufenbild der Bruchoberfläche dient als Basis für die Analyse. Das Graustufenbild kann entweder aus den Höheninformationen eines 3D-Abbildes der Bruchfläche [4] errechnet oder mit der Tauchmethode [5] erstellt werden. Bei der Tauchmethode wird eine einfarbig beschichtete Bruchoberfläche in einen Behälter mit gefärbtem Wasser platziert und anschließend fotografiert. Der Grauwert im Bild entspricht der Höheninformation. Durch die Anwendung eines Schwellwertfilters werden ebenfalls Inseln erzeugt. Dies erfolgt indem alle Farbwerte die kleiner als der Schwellwert sind, in Schwarz und die restlichen Farben in Weiß umgewandelt werden. Die Höhenschnitte werden durch Variation des Farbschwellwertes des Filters erzeugt. Die weitere Vorgehensweise erfolgt analog zur Slit-Island-Methode.

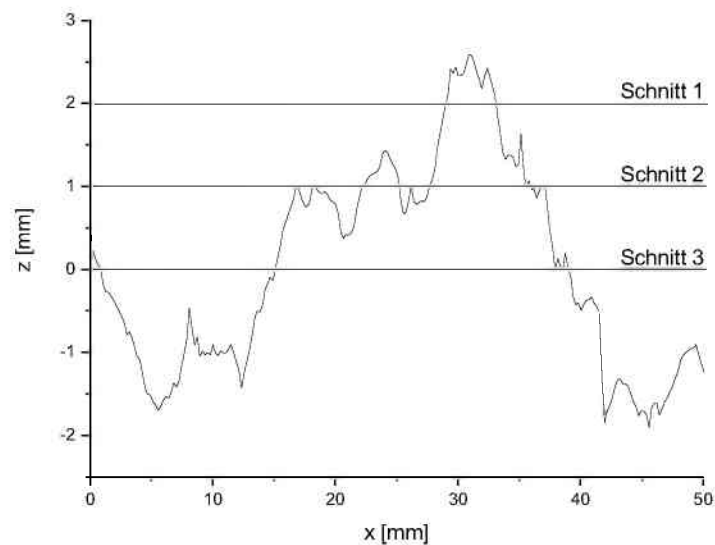


Abb. 3: Schematische Darstellung von Höhenschnitten an einem Profil

Die Methode der 2D Fast Fourier Transformation oder auch Spektralmethode [3, 4, 6] analysiert ein Profil einer Bruchoberfläche. Voraussetzung ist, dass das Profil frei von globalen Trends ist. Diese Bedingung wird durch Korrektur des Profils erreicht. Dies erfolgt, indem vom Ausgangsprofil die Regressionsgerade des Ausgangsprofils (siehe Abb. 4a) subtrahiert wird.

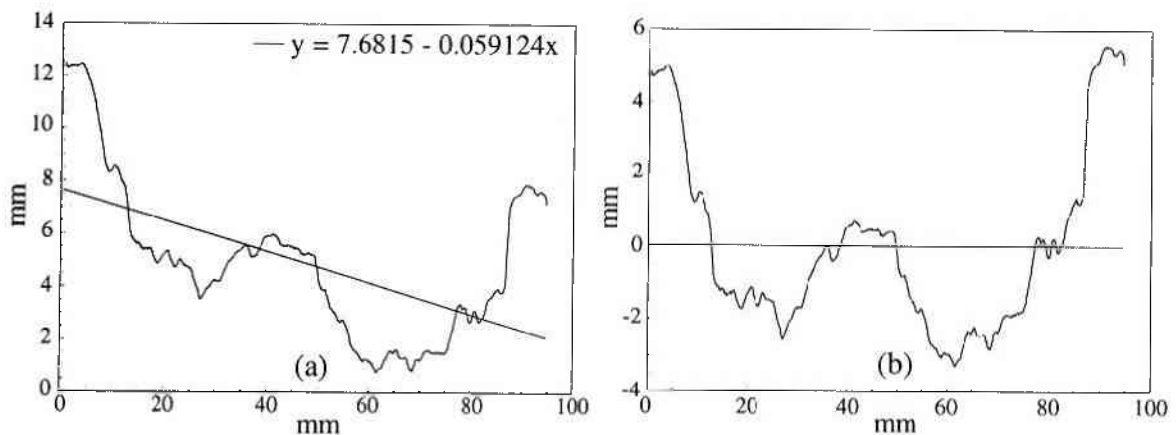


Abb. 4: Korrektur eines globalen Trends durch Überlagerung mit einer Regressionsgeraden [6]

An einem Profil P (Abb. 3) erfolgt die Anwendung der Fast Fourier Transformation (FFT).

$$F = FFT(P) \quad (5)$$

Der Vektor F enthält die Amplituden und Frequenzen f , die im Profil P durch die FFT-Analyse gefunden wurden. An F erfolgt die Berechnung der Power Spectral Density $S(f)$, die auch spektrale Leistungsdichte genannt wird.

$$S(f) = \frac{1}{L} F \text{conj}(F) \quad (6)$$

L stellt die projizierte Länge des Profils dar. In einem doppelt logarithmischen Diagramm wird auf der Ordinate der Wert von $S(f)$ und auf der Abszisse der Wert von f aufgetragen. Es erfolgt anschließend eine lineare Korrelation der Wertepaare im Diagramm. Die Steigung β wird zur Berechnung der fraktalen Dimension D verwendet.

$$D = \frac{5 - \beta}{2} \quad (7)$$

Die Box Counting Methode [6, 7] analysiert ebenfalls Profile von Bruchoberflächen. Dafür wird ein Profil mit einem Gitter überlagert, dessen quadratische Elemente die Seitenlänge ϵ besitzen. Es wird die Anzahl N der Quadrate gezählt, welche die Profillinie berühren (siehe Abbildung 5). Die fraktale Dimension D ist mit der Gittergröße ϵ und der Anzahl N der Quadrate, nach Gleichung (8) verknüpft.

$$N(\epsilon) = a \cdot \epsilon^{-D} \quad (8)$$

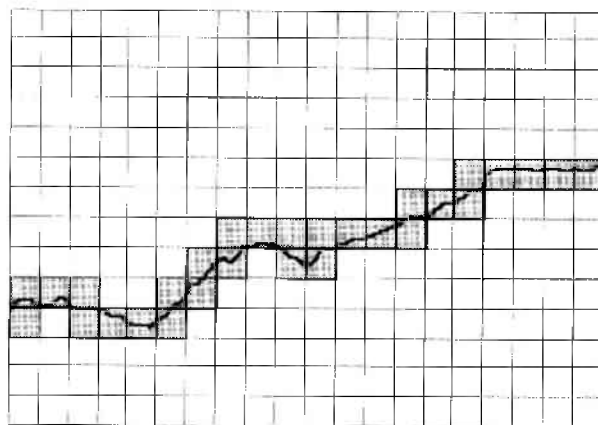


Abb. 5: Ein Profil das mit einem quadratischen Gitter überlagert wurde [6]

Die Bestimmung von N erfolgt für verschiedene Gittergrößen ϵ . In einem doppelt logarithmischen Diagramm wird auf der Abszisse der Wert von ϵ und auf der Ordinate $N(\epsilon)$ aufgetragen. Es erfolgt anschließend eine lineare Korrelation der Wertepaare im Diagramm. Der Betrag der Steigung β entspricht der fraktalen Dimension D .

Die fraktale Dimension ist entsprechend den Erkenntnissen von A. Carpinteri vom Beobachtungsmaßstab abhängig [6, 8]. Die in Abbildung 6 dargestellte Abhängigkeit der fraktalen Dimension von der Skalierung der Probengröße, wird in [6] und [8] Geometrical Multifractality genannt. Die Skalierung beschreibt die Probengröße aber auch das Gitter, das auf die Bruchfläche gelegt wird. Die Anzahl der Gitterelemente ist unabhängig von der Skalierung und bleibt bei Veränderung der Skalierung konstant. Der fraktale Charakter nimmt mit zunehmender Probengröße ab und ebenso dessen Einfluss auf das bruchmechanische Verhalten. Daraus leitet Carpinteri die Multifractal Scaling Laws [6, 9] ab. Damit beschreibt der Autor die Abhängigkeit der Zugfestigkeit und der Bruchenergie von der Probengröße von Betonproben.

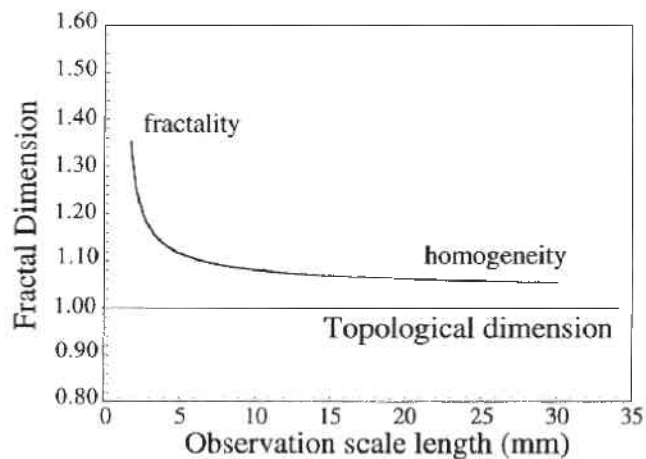


Abb. 6: Abhängigkeit der fraktalen Dimension von der Länge der Bruchfläche [6, 8]

Die oben angeführten Parameter R_L , R_S und D wurden zur fraktografischen Analyse bereits von verschiedenen Autoren an Baustoffen bestimmt, wobei folgende Baustoffarten untersucht wurden:

- Zementstein,
- Zementmörtel,
- Beton
- und hochfester Beton.

An Zementstein und Zementmörtel wurde an der Bruchoberfläche des Notched Beam Tests der fraktografische Parameter R_S bestimmt [1]. Die Autoren sprechen von einer Korrelation zwischen R_S und den bruchmechanischen Eigenschaften, die man teilweise schwer nachvollziehen kann.

Der Rauheitsparameter R_S wurde an Bruchflächen von verschiedenen Mörtelproben, die bei unterschiedlichem Prüfalter bruchmechanisch geprüft wurden, bestimmt [10]. Es konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Festigkeit und R_S festgestellt werden.

Für Beton und hochfesten Beton wurde in [2] ein Zusammenhang, zwischen R_S beziehungsweise der fraktalen Dimension D und der Druckfestigkeit festgestellt.

In [4] konnte ein Zusammenhang zwischen der Maximalkorngröße von Beton und der fraktalen Dimension der Bruchoberfläche festgestellt werden.

In einer weiteren Untersuchung [11] wurden Betonproben mit dem Notched Beam Test geprüft. Der Gipsabdruck der Bruchfläche wurde in Profile geschnitten, die normal auf den Kerbgrund ausgerichtet waren. An diesen Profilen erfolgte die Bestimmung der fraktalen Dimension D anhand von R_L . Es zeigte sich, dass D mit zunehmenden kritischen Spannungsintensitätsfaktor K_{Ic} abnimmt.

3.3 Verfahren zur Abbildung von Oberflächen

3.3.1 Einführung

Ein Überblick der zur Verfügung stehenden Verfahren zur 3D Abbildung von Oberflächen ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Unterteilung der Verfahren erfolgt in die Profilometertechnik, berührungsfreie Erfassung und sonstige Verfahren.

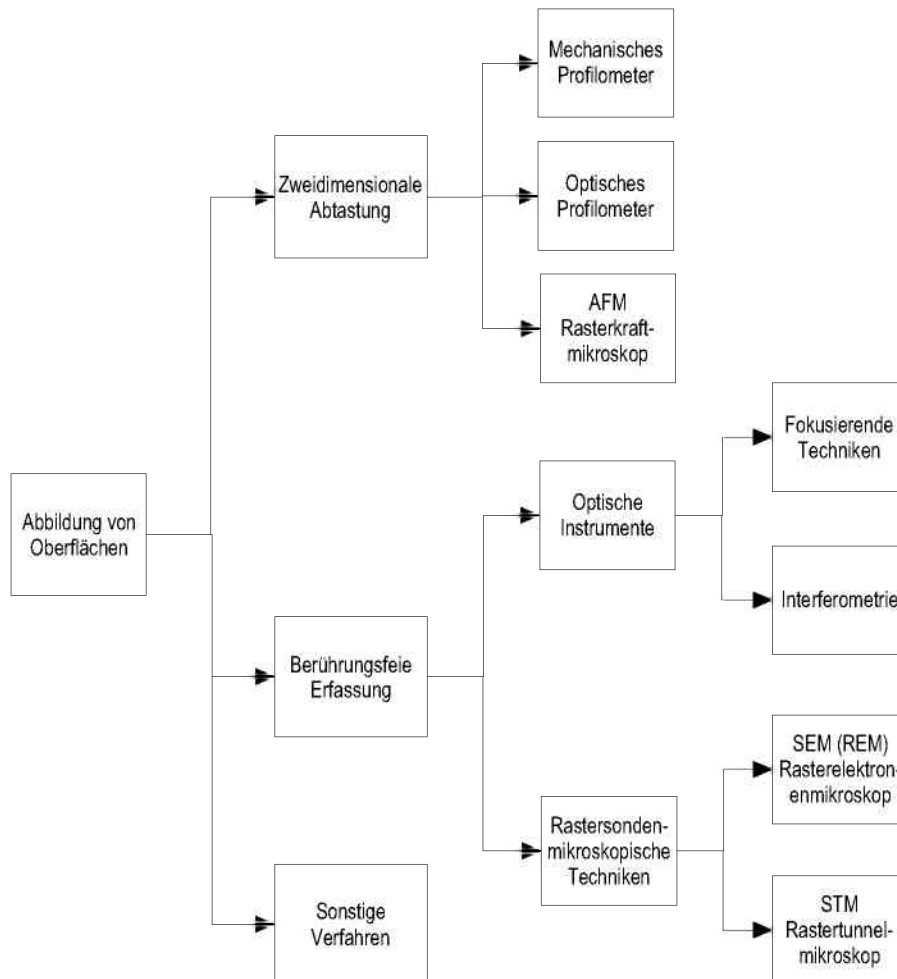


Abb. 7: Eine Übersicht von Verfahren zur 3D Abbildung von Oberflächen [12]

3.3.2 Zweidimensionale Abtastung

Am Anfang der Entwicklung der Profilometertechnik stand das mechanische Tastschnittgerät, das um 1930 für die Charakterisierung der Rauheit von Oberflächen entwickelt wurde. Es funktionierte rein mechanisch und übertrug die Rauheit auf eine mit Ruß geschwärzte Glasplatte.

Die moderne Form des Profilometers erzeugt vollautomatisch zweidimensionale Profile [14, 16, 21]. Es fährt mit einer Tastspitze eine raue Oberfläche entlang einer vorgegebenen Strecke ab. Die Höhen und der Verfahrweg wird in elektrische Signale umgewandelt

und für die Visualisierung aufbereitet. Um eine möglichst realitätsnahe Wiedergabe der Rauigkeit sowie vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, ist die Geometrie der Spitze wichtig und entsprechend genormt. Aufgrund der Form der Tastspitze kann ein Profilometer nur eine maximal zulässige Flankensteilheit verarbeiten. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Tastspitze auch auf der Oberfläche hängen bleiben kann.

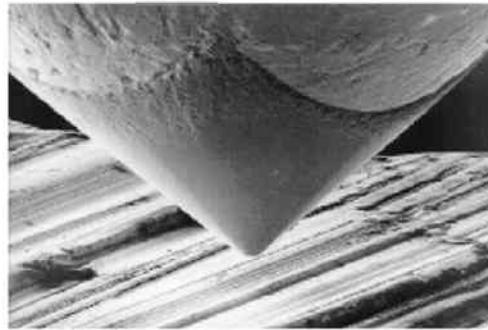


Abb. 8: *Tastspitze eines Profilometers [22]*

Beim Laserprofilometer wird ein Laserstrahl von der Probenoberfläche reflektiert und gelangt durch ein Objektiv auf einen CCD-Zeilensensor (siehe Abb. 7). Die Höhenunterschiede Δz auf der Oberfläche führen zu einer Verschiebung des projizierten Punktes am Sensor. Die Art der Detektion von Höhenunterschieden wird als Triangulationsverfahren bezeichnet. Mit dem Laserprofilometer ist neben der 2D-Abtastung auch eine 3D-Abtastung durch Verwendung eines x-y-Tisches in Verbindung mit einer entsprechenden Software möglich. Obwohl dieses Profilometer berührungsfrei arbeitet, ist es auf einen gewissen Grenzwert der Flankensteilheit der untersuchten Rauigkeit beschränkt. Bei Überschreitung der Grenzwerte wird der Laserstrahl nicht mehr in die Optik reflektiert.

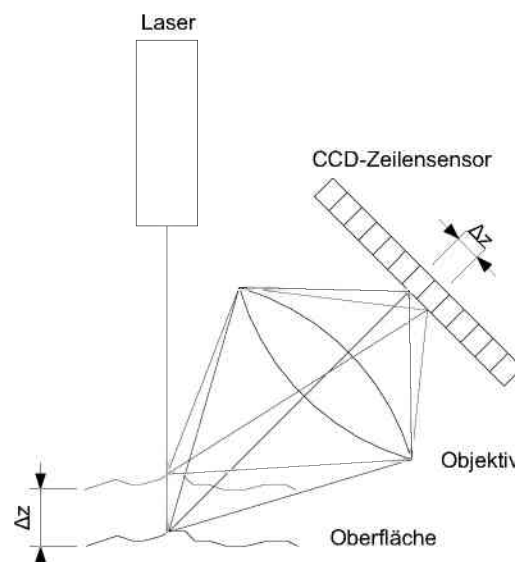


Abb. 9: *Prinzip des Laserprofilometers*

Das Laser-Triangulations-System [24] wendet ebenfalls das Triangulationsprinzip an, es tastet jedoch einzelne Punkte der Oberfläche ab und setzt mit den Informationen ein 3D-Modell zusammen. Die Probe befindet sich auf einem Tisch, der in x- und y-Richtung verstellbar ist. Ein Laserstrahl wird mit einem Linsensystem auf die Probe fokussiert und der reflektierte Punkt von einer CCD-Kamera detektiert. Die Berechnung der Höheninformati-

on des Messpunktes erfolgt anhand der Position des abgebildeten Punktes am CCD-Sensor.

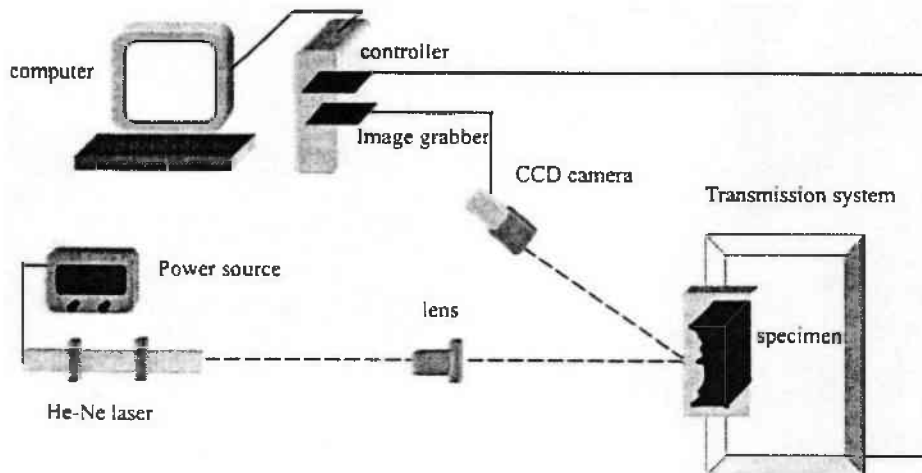


Abb. 10: Darstellung der experimentellen Anordnung des Laser Triangulationssystems [24]

Das Rasterkraftmikroskop [17, 18] nützt die Kraftwechselwirkung aus, die zwischen einer dünnen Spitze (der Radius beträgt 10 bis 50 nm) und der Oberfläche auftritt, um die Topografie zu vermessen. Die Wechselwirkung wird durch das Lennard-Jones Potenzial beschrieben. Die Spitze ist an einem Biegebalken angebracht und lenkt diesen proportional zur wirkenden Kraft aus. Die Messung der Auslenkung erfolgt indirekt mit einem Laserstrahl, indem dieser vom Biegebalken auf eine vierteilige Fotodiode reflektiert wird (siehe Abb. 11). Ein in x-, y-Richtung beweglicher Probenstisch führt die Abrasterung der Oberfläche aus. Die Auslenkung des Balkens wird während der Abtastung der Oberfläche konstant gehalten. Dies erfolgt durch die Höhenverstellung des Messkopfes mit einem Piezosteller, dessen Position ergibt die Höhe des Messpunktes.

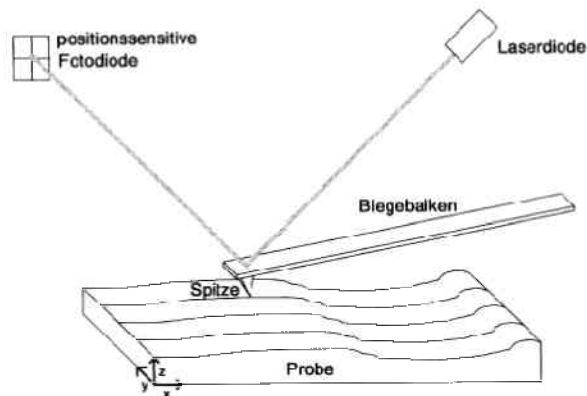


Abb. 11: Darstellung der prinzipiellen Funktionsweise des Rasterkraftmikroskopes [18]

3.3.3 Berührungsfreie Erfassung durch optische Instrumente

Bei der konfokalen Mikroskopie [16] wird eine Lichtquelle als Punkt auf eine Fokussierebene am Objekt abgebildet. Der Lichtpunkt wird reflektiert und gelangt über das Objektiv zurück zu einem halbdurchlässigen Spiegel, der die Lichtinformation über eine Lochblende zum Detektor leitet (siehe Abb. 12).

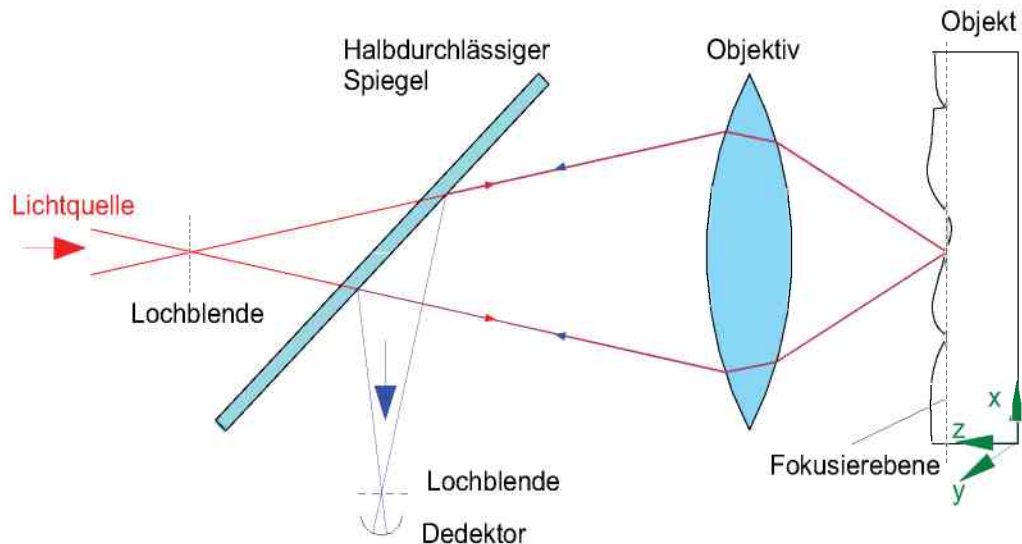


Abb. 12: Prinzipielle Darstellung der konfokalen Mikroskopie

Der Abstand zwischen der optischen Achse des Objektivs und der Fokussierebene ist konstant. Der Detektor kann z. B. als Sekundärelektronenvervielfacher ausgeführt sein. Diese Anordnung hat den Vorteil, dass nur der scharfe Lichtpunkt im Detektor abgebildet wird. Ist ein Punkt unscharf dann kann er die Lochblende, die vor dem Detektor angebracht ist, nur in sehr abgeschwächter Form passieren. Der Detektor verfügt über einen eingebauten Schwellwertfilter, der feststellt ob die Lichtstärke einen gewissen Wert überschreitet. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, dann wird ein Signal erzeugt. Die Höheninformation des Messpunktes entspricht der Position des Objektivfokusses und wird nur dann gespeichert, wenn der Detektor ein Signal abgibt. Da ein konfokales Mikroskop nur Punkte abbilden kann, muss es die Oberfläche eines Objektes abrastern.

Beim konfokalen Laser-Raster-Mikroskop (CLSM) [16, 21] kommt ein Laser anstatt einer Lichtquelle zum Einsatz. Damit ist eine Erhöhung der Lichtintensität erreichbar. Ein weiterer Vorteil ist, dass das Laserlicht kohärent ist, dadurch fällt die Lochblende, die beim konfokalen Mikroskop nach der Lichtquelle angeordnet ist, weg. Ansonsten sind die Funktionen des Gerätes analog zum konfokalen Mikroskop.

Eine weitere Technik für die Abbildung von Oberflächen ist das lichteoptische Fokussieren [16]. Dabei wird mit einem Mikroskop für jede Fokussierebene ein Bild und in Folge Bildstapel erstellt. Für die Durchführung wird ein exakt vertikal positionierbarer Objekthalter benötigt, mit dem die jeweilige vertikale Position automatisch eingestellt werden kann. So werden für jede Fokusposition – die der z-Achse im 3D-Modell entspricht - Bildstapel erstellt. Eine Software erkennt in jedem Bild scharf abgebildete Höhenzüge und verarbeitet die Information zu 3D-Daten weiterverarbeitet werden.

3.3.4 Berührungsfreie Erfassung durch rastersondenmikroskopische Techniken

Die Rastertunnelmikroskopie [19] rastert eine elektrisch leitende Oberfläche mit einer elektrisch leitenden Spitze ab, wobei kein elektrischer Kontakt besteht. Der Abstand zwischen Spitze und Oberfläche beträgt einige Nanometer. Dadurch überlagern sich die quantenmechanischen Zustände zwischen den Elektronen der Oberfläche und der Spitze. Wird eine geringe Spannung angelegt (z. B. 100 mV bis 1 V) dann fließt der Tunnelstrom. Beim Abtasten der Oberfläche wird der Abstand der Spitze so geregelt, dass der Strom konstant bleibt. Die vertikale Position des Messkopfes ist proportional zur Höhe des Messpunktes. Der Messkopf des Gerätes ist in x-, y- und z-Richtung positionierbar, so dass die Oberfläche abgerastert werden kann. Da das Rastertunnelmikroskop elektrische Ströme misst, kann es durch die Variation der angelegten Spannung die elektrische Oberflächenstruktur einer Probe erfassen.

Das Rasterelektronenmikroskop [20] basiert auf der Abrasterung der Objektoberfläche mit einem fokussierten Elektronenstrahl. Diese werden teilweise rückgestrahlt, andererseits lösen diese Elektronen Sekundärelektronen aus, beide können zur Abbildung verwendet werden. Diese Eigenschaft stellt einen Vorteil gegenüber optischen Abbildungstechniken dar. Dieses Verfahren stellt selbst keine dreidimensionalen Daten von Oberflächen her. Erst durch Kombination mit einer anderen Technik, wie z. B. der Stereoskopie, werden Höheninformationen von der Oberfläche erhalten.

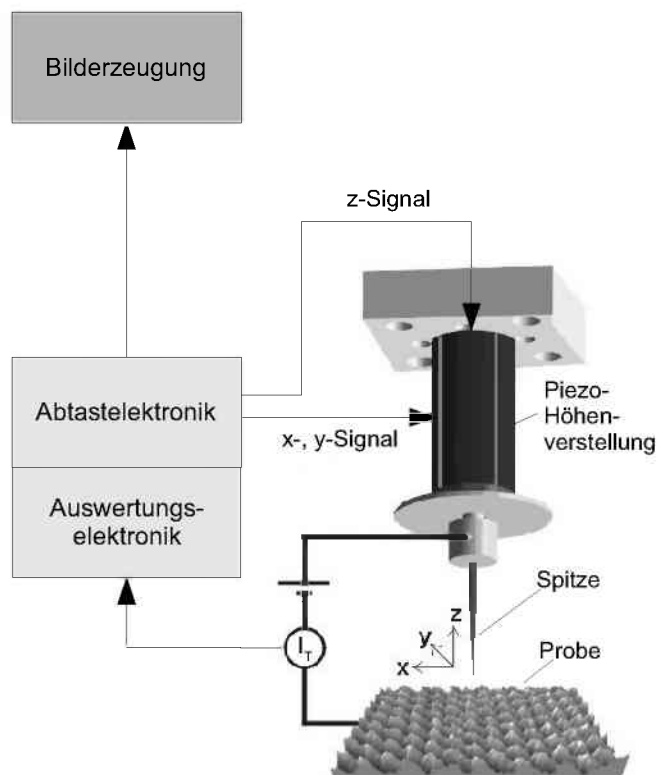


Abb. 13: Prinzipbild des Rastertunnelmikroskops [23].
 I_T bezeichnet den Tunnelstrom

3.3.5 Sonstige Verfahren

Die Funktionsweise des Tauchverfahrens [7] wurde bereits in Kap. 3.2 auf Seite 5 beschrieben. In Abbildung 14 ist die Durchführung dieser Methode ersichtlich, es zeigt eine

Probe die in einem Behälter mit gefärbtem Wasser gestellt und anschließend in der Draufsicht fotografiert wurde. Die Fotografie des Graustufenbildes ist in Abbildung 15 dargestellt.



Abb. 14: Anordnung des Probekörpers im Wasserbad [7]



Abb. 15: Beispiel des Graustufenbildes der Probe aus Abbildung 14 [7]

Ein weiteres Verfahren ist die Stereoskopie [25, 26]. Dabei werden so genannte stereoskopische Halbbilder erstellt, indem ein Objekt aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln fotografiert wird. Legt man die Bilder übereinander, so sind räumliche Unterschiede durch die Deviation erkennbar. Diese Eigenschaft nützt das in [16, 25, 26] erwähnte Anaglyphenverfahren aus. Dabei werden die Bilder mit Komplementärfarben eingefärbt und übereinander gelegt. Bei Betrachtung mit einer Anaglyphenbrille entsteht der räumliche Eindruck.

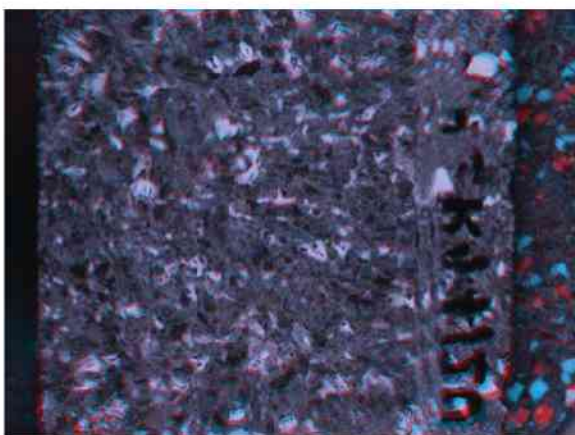


Abb. 16: Beispiel eines Anaglyphenbildes (links) und einer Anaglyphenbrille [25] (rechts)

Die geometrische Methode [28]:

Diese Methode verwendet drei Kippbilder die in verschiedenen Winkeln zueinander aufgenommen wurden. Im Gegensatz zur Stereoskopie wird für die Berechnung der 3D-Daten die Abbildungsgeometrie und der Kippwinkel nicht benötigt. Mit der Positions-Information der x- und y-Koordinaten der Punkte auf den Bildern und Anwendung der analytischen

Geometrie (Winkelgleichung) wird die z-Koordinate berechnet. Der Unterschied zum stereoskopischen Verfahren ist die exakte Berechnung der Höheninformation.

3.3.6 Die Auflösungen und Abbildungsbereiche der Verfahren

Der Einsatzbereich der optischen Techniken wird in der Auflösung durch die Wellenlänge des Lichtes beschränkt. Diese Eigenschaft wurde von Ernst Abbe als Theorie der optischen Auflösung definiert. Demnach hängt die Auflösung s von der Wellenlänge λ des Lichts, der Brechzahl n des Mediums und dem Aperturwinkel α ab [13].

$$s \geq 0,61 \frac{\lambda}{n \sin \alpha} \quad (9)$$

$$A_N = n \sin \alpha \quad (10)$$

A_N bezeichnet die numerische Apertur, die ein Maß für die Lichtstärke beziehungsweise das Auflösungsvermögen eines Objektivs ist. Für moderne Mikroskope ergibt sich dadurch für sichtbares Licht ein Bereich der maximalen Auflösung von 200-300 nm.

Bei der Rastersondenmikroskopie besteht diese Einschränkung nicht, da Elektronen zur Abbildung der Oberfläche verwendet werden. In Abbildung 17 sind die Auflösungen der Verfahren in vertikaler und lateraler Richtung dargestellt.

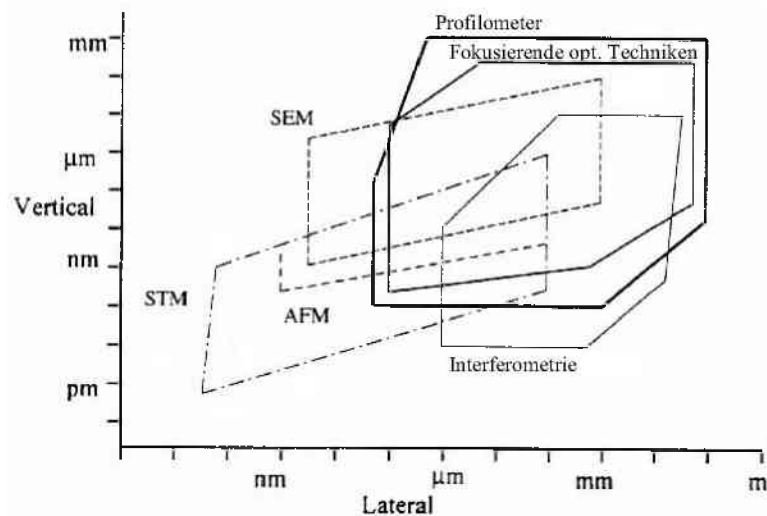


Abb. 17: Vertikale und laterale Auflösungsbereiche der Abbildungsverfahren von Oberflächen [12]

| Zweidimensionale Abtastung | Dimension | Lateral | | Vertikal | |
|-----------------------------------|-----------|--------------------|-----------|------------|-----------|
| | | Meßbereich | Auflösung | Meßbereich | Auflösung |
| Profilometer mit Tastspitze | 2 | 1 mm ¹⁾ | 1 µm | 200 µm | 50 nm |
| Profilometer mit Laserabtastung | 2 | 1 mm ¹⁾ | 1 µm | 100 µm | 10 nm |
| Berührungsfreie Erfassung | | Meßbereich | Auflösung | Meßbereich | Auflösung |
| Rasterelektronenmikroskop | 2 | 500 nm | 20 nm | < 1 mm | 20 nm |
| Rasterkraftmikroskop | 3 | 100 µm | 1 µm | 20 µm | 0,1 nm |
| Extended Focus Mikroskop | 3 | 20 mm | 1 µm | 1 mm | 4 µm |
| Infinite Focus Mikroskop 2,5x | 3 | 4,1 mm | 3 µm | 3 mm | 5 µm |
| Konfokale Laserrastermikroskopie | 3 | 20 mm | 0,3 µm | 5 mm | 0,5 µm |

Tab. 1: Beispiele für Auflösungen und Messbereiche der Abbildungsverfahren [14 – 21].

1) Beim Profilometer kann der laterale Meßbereich gewählt werden.

In Tabelle 1 sind die lateralen und vertikalen Auflösungen und die Messbereiche der zuvor beschriebenen Abbildungsverfahren dargestellt. Die angeführten Beispiele wurden aus [14 – 21] entnommen und dienen nachfolgend zur Abschätzung der Einsatzmöglichkeiten an grobkeramischen Bruchoberflächen.

3.4 Das Stereomatching-Verfahren zur Erfassung der Topografie von Bruchoberflächen

3.4.1 Die Photogrammetrie

Die Photogrammetrie ist ein teilweise manuelles und semiautomatisches Verfahren, das heute zur Erfassung der Topografie von Bruchoberflächen nicht mehr eingesetzt wird. Darauf basiert jedoch das nachfolgend beschriebene stereoskopische Verfahren.

In der Photogrammetrie werden 3D-Informationen von Objekten berechnet, die aus einem, zwei oder mehreren Blickwinkeln fotografiert wurden. Diese Technik wird schon seit geraumer Zeit bei der Luftbildvermessung angewandt. Die Auswertung erfolgt mit einem Komperator [27], womit direkt die Bildkoordinaten vermessen werden. Die Berechnung der 3D-Daten basiert auf der Zentralprojektion und wird ebenso wie die Vermessung computergestützt durchgeführt.

Die semiautomatische Photogrammetrie wird in der Arbeit von D. Bryant [29] in Verbindung mit der Hilger-Watts-Methode angewendet. Damit werden zwei Bilder mit Lichtpunkten synchron abgerastert (siehe Abb. 18). Dies erfolgt indem die Bilder, die auf einem in x- und y-Richtung verschiebbaren Tisch angebracht sind, an die jeweilige Messposition verschoben werden. Durch ein Optik-Spiegelsystem werden die beiden Bilder beobachtet und zugleich die Messpositionen in beiden Bildern markiert. Der Lichtpunkt im Bild 1 ist fixiert und der Lichtpunkt im Bild 2 ist verschiebbar. Die Position dieses Lichtpunktes wird so lange verstellt, bis der zweite Lichtpunkt sich mit dem ersten Lichtpunkt deckt. Der Positionswert wird durch das Betätigen eines Tasters an einen Computer weitergeleitet. Dort erfolgt die Berechnung und Speicherung des Höhenwertes. Sowie die Erstellung des 3D-Datenmodells.

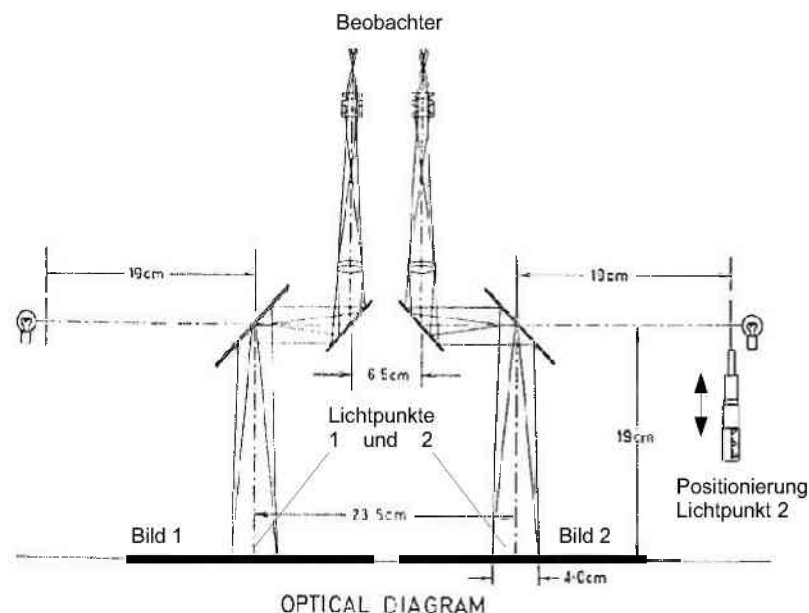


Abb. 18: Die Hilger-Watts Methode [29]

Die stereoskopische Auswertung von stereoskopischen Bildern basiert auf dem Piazzesi Algorithmus und stellt eine Näherungsform der photogrammetrischen Methode dar [30]. Die Anwendung der Piazzesi-Methode wurde von O. Kolednik [31] vorgestellt. Dabei wird die Probenoberfläche auf der ein Punkt $P(z, \eta, \xi)$ liegt um den Winkel $\Delta\phi$ gekippt (siehe

Abb. 19). Die Berechnung der Koordinaten z , η und ξ erfolgt nach den Gleichungen (11) bis (13).

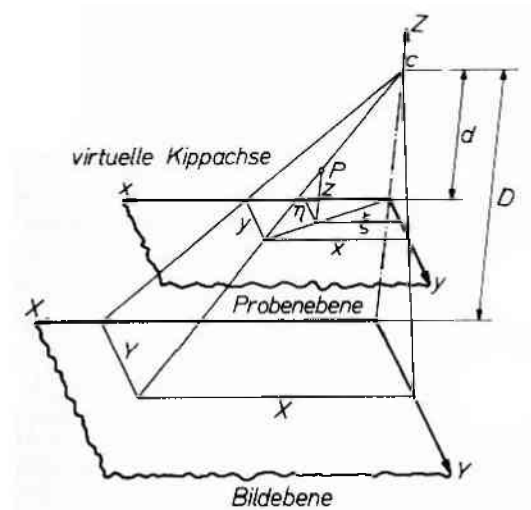


Abb. 19: Projektion des Punktes P auf die Bildebene [31] nach der Piazzesi Methode

Es gibt ein lokales Koordinatensystem x, y in dem die Probenebene liegt und ein lokales Koordinatensystem X, Y in dem die Bildebene liegt.

$$z = \frac{(y_1 - y_2) \cdot \cos \Delta \phi + \frac{2y_1 y_2}{d} \cdot \sin \Delta \phi}{\frac{1 + y_1 y_2}{d^2} \cdot \sin 2 \Delta \phi + \frac{y_1 - y_2}{d} \cdot \cos 2 \Delta \phi} \quad (11)$$

$$\xi = \frac{2d - 2z \cdot \cos \Delta \phi}{\frac{d}{x_1} + \frac{d}{x_2}} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{(y_1 + y_2) \cdot (z \cdot \cos \Delta \phi - d)}{(y_1 - y_2) \cdot \sin \Delta \phi - 2d \cos \Delta \phi} \quad (13)$$

x_1, y_1 Koordinaten des Punktes P im ungekippten Zustand
 x_2, y_2 Koordinaten des Punktes P im gekippten Zustand
 d Objektabstand
 D Brennweite

Da nur die Bildkoordinaten X, Y gemessen werden können, müssen die in den Gleichungen (11) bis (13) eingesetzten Koordinaten erst in die Probenebene umgerechnet werden. Dies erfolgt mit den Gleichungen (14) und (15), M stellt die Vergrößerung dar.

$$x_1 = \frac{X_1}{M} \quad (14)$$

$$y_1 = \frac{Y_1}{M} \quad (15)$$

Die Berechnung der Koordinaten $P(z, \xi, \eta)$ kann vereinfacht werden, wenn die Verschiebung Y_1-Y_2 , die Parallaxe genannt wird und klein gegenüber dem Arbeitsabstand d ist. In dem Fall spricht man von Parallelprojektion, für welche die Näherungsgleichungen (16) und (17) anwendbar sind.

$$z \approx \frac{(Y_1 - Y_2) \cdot \cos \Delta \phi}{M \cdot \sin 2 \Delta \phi} \quad (16)$$

$$\xi \approx \frac{X_1}{M} \approx \frac{X_2}{M} \quad (17)$$

Der relative Fehler der Näherungsgleichung (16) ist bei der Anwendung eines Rasterelektronenmikroskops kleiner ein Prozent und hebt sich bei mittleren Parallaxen auf [31].

3.4.2 Die Anwendung des stereoskopischen Verfahrens an Kippbildern

Die Erstellung von 3D-Daten mit dem stereoskopischen Verfahren wurde von E. Ervin für Stereobilder beschrieben, die von einem Rasterelektronenmikroskop stammen [28]. Dafür kam die vereinfachte Form des Piazzesi Algorithmuses nach Gleichung (16) zum Einsatz. Die Vermessung der Parallaxe Δx erfolgte an homologen Punkten (identische Punkte) in den Kippbildern. Die Parallaxe des Punktes B wird aus der Differenz der Strecken $A'B' - A''B''$ ermittelt. Der Kippwinkel der Stereobilder ist 2α (siehe Abb. 20). Die Berechnung der relativen Höhe Δz erfolgt nach Gleichung (18) die sich aus Gleichung (16) ergibt.

$$\Delta z = \frac{1}{2 \cdot M \cdot \sin \alpha} \cdot \Delta x \quad (18)$$

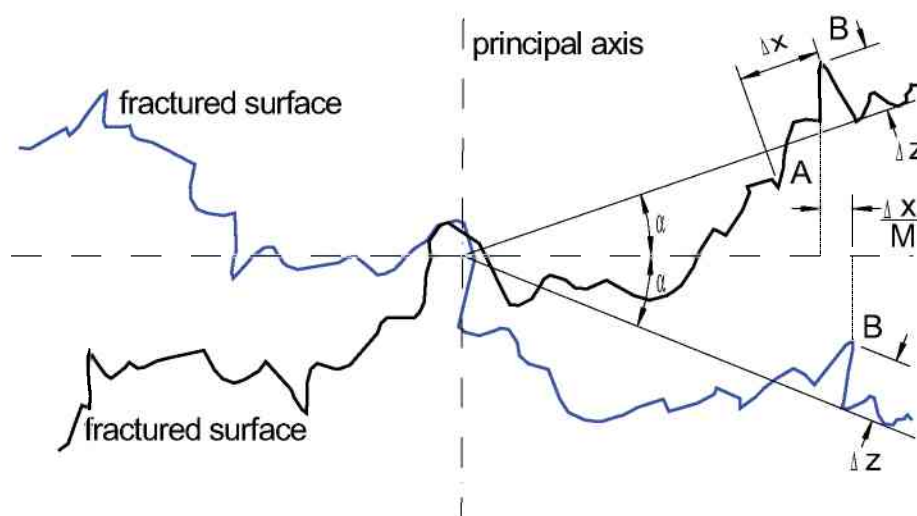


Abb. 20: Bestimmung der Parallaxe Δx aus Stereobildpaaren [28]

Zu Abbildung 20 wird bemerkt, dass Δx die am Bild bestimmte Parallaxe ist. In Abbildung 20 ist jedoch die Bruchoberfläche gezeigt, dort tritt die Parallaxe $\Delta x/M$ auf.

Aufgrund der Flexibilität dieser Methode kann die Erstellung der Kippbilder zum Beispiel mit einem Rasterelektronenmikroskop, einem optischen Mikroskop oder einen Fotoapparat durchgeführt werden. Je nach vorhandenem Gerätetyp ist bei der Berechnung von Δh die Berücksichtigung der geometrischen Abbildungsverhältnisse notwendig.

3.4.3 Die Entwicklung der Stereomatching-Technik

Das zuvor beschriebene stereoskopische Verfahren benötigt die Vermessung von Parallaxen von homologen Punkten. Zur Suche dieser Punkte wird ein Matchingalgorithmus eingesetzt.

Eine semiautomatische Lösung zur Auswertung von stereoskopischen Aufnahmen wurde von O. Kolednik [31] vorgestellt. Die Erstellung der Kippbilder erfolgte mit einem Rasterelektronenmikroskop. Die Vermessung der Parallaxen der homologen Punkte wurde mit einem Stereokomparator manuell durchgeführt. Eine Computersoftware berechnete automatisch die 3D-Daten der Oberfläche, wobei die Rohdaten händisch eingegeben werden mussten.

Ein vollautomatisches System stellten S. Scherer und J. Stampfl in [32, 33] und [34] vor. Als Basis dienten mit einem Rasterelektronenmikroskop erstellte stereoskopischen Aufnahmen einer Bruchoberfläche. Die 3D-Rekonstruktionssoftware wendet einen flächenbasierenden Matching-Algorithmus [35] an, der automatisch homologe Punkte in den Stereobildern sucht. Mit der Software kann an den 3D-Daten die Rauigkeitsanalyse nach EN ISO 4287 [36] durchgeführt und die fraktale Dimension bestimmt werden.

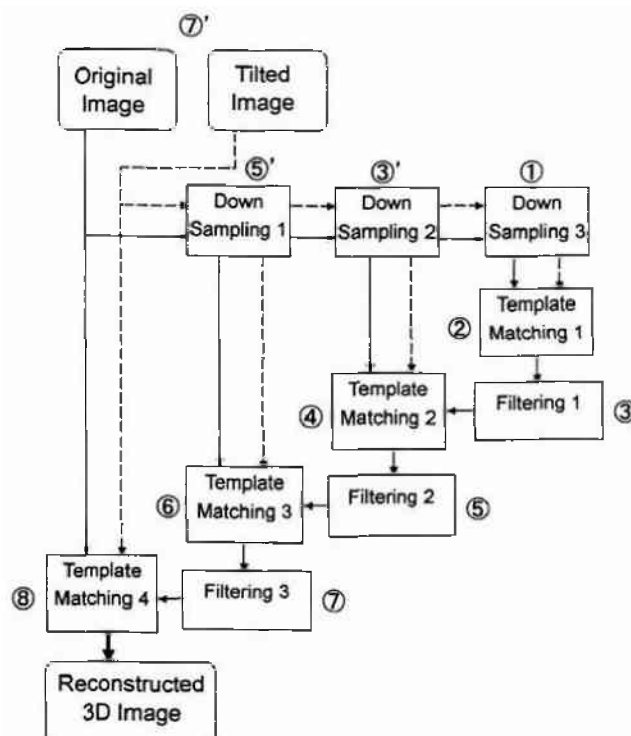


Abb. 21: Schema des Vorganges der Down-Sampling Methode, das von ① bis ⑧ durchlaufen wird [37]

In der Arbeit von M. Tanaka und Y. Kimura [37] wird ebenfalls die Stereomatching-Methode angewandt. Der Unterschied im Vergleich zu [32, 33] und [34] liegt in der Verwendung der „Coarse to Fine“ Methode. Dafür wird das „Down Sampling“ Prinzip angewandt, das

die Auflösung der Kippbilder in drei Stufen verringert (siehe Abb. 21). Das Bild mit der geringsten Auflösung wird zuerst mit dem Matchingverfahren ausgewertet. Die dort gefundenen homologen Punkte werden auf die Stereobilder mit der nächst höheren Auflösung übertragen, um dort das Matchingverfahren in den überdeckten Suchflächen erneut anzuwenden. Dieselbe Prozedur wird nochmals an den Bildern mit der originalen Auflösung durchgeführt. Damit konnte eine erhebliche Zeitersparnis bei der Berechnung der 3D-Daten erreicht werden.

3.4.4 Der computergestützte Stereomatchingvorgang

In der Arbeit von J. Stampfl [33] wurde das Stereomatching-Verfahren nach R. Frankot und S. Shafer [35] eingesetzt. Es basiert auf dem Prinzip, dass eine Teilfläche $I_1(x, y)$ des Ausgangsbildes auch im gekippten Bild als Teilfläche $I_2(x, y)$ innerhalb eines Suchfeldes wiedergefunden werden kann (siehe Abb. 22). Der Algorithmus berücksichtigt die Verzerrung des zweiten Bildes infolge der Kippung. Dies wird durch die Transformation mit dem Faktor τ der Ausgangsfläche $I_1(x, y)$ kompensiert.

$$I_{1,trans}(x, y) = \tau(I_1(x, y)) \quad (19)$$

Die Suche erfolgt durch Korrelation der transformierten Ausgangsfläche $I_{1,trans}(x, y)$ mit $I_2(x, y)$ im Suchfeld, indem die Fläche $I_2(x, y)$ mit der größten Übereinstimmung ermittelt wird. Der Algorithmus ist hierarchisch aufgebaut. Das Ausgangsbild wird in eine Matrix mit einer geringen Anzahl von Feldern unterteilt, in welcher die Suche nach homologen Punkten zuerst stattfindet. In weiterer Folge wird die Matrix verfeinert und die Prozedur wiederholt. Dieser Vorgang ist der „Coarse to Fine Methode“ ähnlich (siehe Kap. 3.4.3).

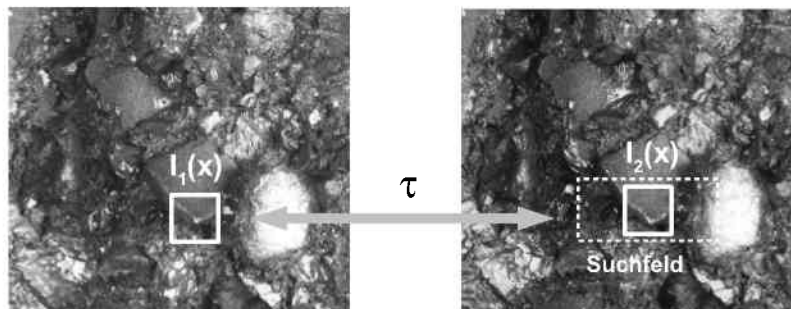


Abb. 22: Beispielhafte Darstellung des Matchingverfahrens, das idente Punkte (homologe Punkte) im Ausgangsbild (links) und im gekippten Bild (rechts) findet

3.4.5 Der Begriff Rekonstruktion von Oberflächen

Der Begriff Rekonstruktion wird in den Literaturstellen [31-34], welche die computergestützte Stereoskopie beschreibt, oft erwähnt. Weil die Berechnung der dreidimensionalen Information einer Oberfläche indirekt über einen zweidimensionalen Informationsträger (den Kippbildern) mit einem Algorithmus erfolgt.

3.5 Anwendungsrelevante Eigenschaften der digitalenameratechnik

3.5.1 Die Technik von Bildsensoren

Die Bilderfassung erfolgt bei Präzisionsdigitalkameras mit einem CCD-Chip [38]. Die Abkürzung CCD bedeutet „Charge-coupled Device“. Ein CCD-Chip besteht aus einer Matrix von Fotodioden, welche auftreffende Photonen in elektrische Ladungen umwandeln. Diese werden innerhalb einer gewissen Zeitspanne (Belichtungszeit) in einer Ladungssenke (Potential Well) gesammelt. Anschließend wird das Ladungspaket über ein Schieberegister zum CCD-Gate (Transfer-Gate) weiterverschoben und in ein analoges Signal umgewandelt (siehe Abb. 23). Die Speicherkapazität der Ladungssenke für Elektronen bedingt die Dynamik des CCD-Chips und in Folge die Qualität des erstellten Bildes.

Das Auslesen der Fotodioden erfolgt zeilenweise über die Dioden selbst, weshalb während des Auslesevorganges die Belichtung der Fotodioden mechanisch oder elektronisch verhindert werden muss. Faktoren, welche die Bildqualität eines CCD-Chips beeinflussen, sind die Speicherkapazität für Elektronen in der Ladungssenke, die Geschwindigkeit beim Auslesen, die Transportzeit von den Fotodioden zu den Schieberegistern, die digital/analog Wandlung und das Zusammensetzen des Bildes durch den Videoprozessor. Um den Einfluss diese Effekte zu minimieren wurde die „Interline-Transfer Architektur“ entwickelt (siehe Abb. 24). CCD-Chips die auf dieser Architektur basieren werden für qualitativ anspruchsvolle Aufgaben eingesetzt. Dazu gehören zum Beispiel die Mikroskopie oder die Vermessung von Objekten in Bildern.

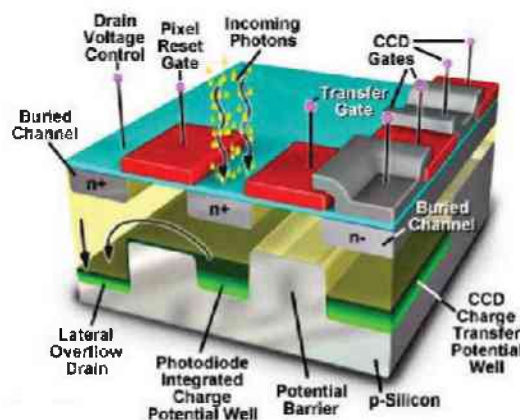


Abb. 23: Schematisches Schnittbild des Schichtaufbaues eines CCD-Chips [39]

Im Gegensatz zu den beiden anderen Architekturen besitzt die Interline-Transfer Architektur ein paralleles Speicherregister, das zwischen den Photodiodenzeilen angeordnet ist. In dem Register erfolgt beim Auslesen der Fotodioden die Zwischenspeicherung der Ladungspakete. Aufgrund der hohen Schreibgeschwindigkeit dieses Registers entsteht keine Beeinflussung der Fotodioden durch die kontinuierliche Belichtung. Der Vorteil dieser Architektur ist, dass weder ein mechanischer Verschluss noch eine elektronische Synchronisation für das Auslesen des Bildes benötigt wird. Nachteilig sind die hohen Produktionskosten und die geringe Pixelapertur. Bei der Interline-Transfer Architektur beträgt die Packungsdichte der Fotodioden 25 %, eine Steigerung auf über 75 % wurde durch den Einsatz von Mikrolinsen ermöglicht [39].

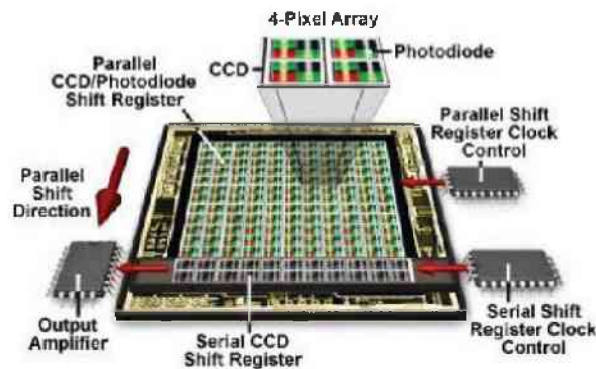


Abb. 24: Interline Frame Architektur [39]

3.5.2 Der Bloomingeffekt

Durch eine punktuelle Überbelichtung entsteht in CCD-Chips der so genannte Bloomingeffekt. Dabei wird der Ladungspool der betroffenen Fotodioden mit Elektronen überfüllt. In Folge gelangen überschüssige Elektronen in den Ladungspool der benachbarten Fotodioden. Bei lang anhaltender Belichtung können auch die Ausgangsknoten der betroffenen Diodenzeilen überladen werden. Dieser Effekt kann im Bild folgendermaßen beobachtet werden:

- Bildung von weißen Streifen, welche die Umgebung ausbleichen,
- der überbelichtete Bereich um ein überladenes Pixel wird dadurch stark vergrößert.

Gegenmaßnahmen sind die Verkürzung der Ladezeiten der Pixel oder der Einbau von waagrecht und senkrecht „Overflow Drains“ (Abflussleitungen), siehe Abbildung 25.

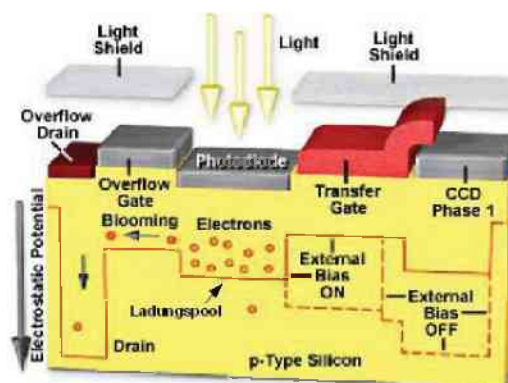


Abb. 25: Eine Photodiode mit einem Overflow-Drain [39]

3.6 Die Berechnung der Schärfentiefe

Zur Berechnung der Schärfentiefe wird zunächst die Brennweite f mit der Abbildungsgleichung (20) anhand der Gegenstandsweite g und der Bildweite b berechnet [13, 38 - 40]. Zur Vereinfachung wird nur ein Objektiv, mit einer Linse angenommen. Die in den Gleichungen (20) bis (22) und in Abbildung 26 angeführten Entfernungsangaben werden vom optischen Mittelpunkt der Optik aus gemessen.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad (20)$$

Danach kann hyperfokale Distanz d_h bestimmt, wofür die Blendenzahl κ und der Zerstreuungskreisdurchmesser Z benötigt werden. Wird auf die Gegenstandsweite g scharfgestellt die der hyperfokale Distanz entspricht, so erhält man eine scharfe Abbildung für alle Objektabstände dessen Werte größer als die halbe hyperfokale Distanz sind.

$$d_h = \frac{f^2}{\kappa \cdot Z} \quad (21)$$

Die Berechnung des Nahpunktes d_n erfolgt nach Gleichung (22). Dies ist die geringste Gegenstandsweite, bei der noch eine scharfe Abbildung erfolgt.

$$d_n = \frac{g \cdot d_h}{d_h + (g - f)} \quad (22)$$

Erfolgt die Fokussierung auf einen Punkt innerhalb der hyperfokalen Entfernung, so wird der Fernpunkt d_f nach Gleichung (23) berechnet.

$$d_f = \begin{cases} \frac{g \cdot d_h}{d_h - (g - f)} & , \text{ wenn } d_h > (g - f) \\ \infty & , \text{ wenn } d_h \leq (g - f) \end{cases} \quad (23)$$

Für diesen Fall erstreckt sich der Bereich der Schärfentiefe Δd vom Nahpunkt bis zum Fernpunkt.

$$\Delta d = d_f - d_n \quad (24)$$

Der Bereich der Schärfentiefe kann auch mit den Zerstreuungskreisdurchmesser beschrieben werden. Dieser Wert gibt den maximal zulässigen Durchmesser (0,03 mm) der Projektion eines Punktes auf einem 35 mm Film an. Dieser muss bei Vergrößerung auf ein Bild mit einer Abmessung von 30-20 cm², vom Beobachter aus einem Abstand von 20 bis 30 cm noch als scharf empfunden werden. Bei einem CCD-Chip ist aufgrund seiner geringeren Abmessung der Bereich der Schärfentiefe größer als bei einem 35 mm Film.

Eine Faustformel besagt, dass die Zerstreuungskreise der fotografierten Punkte die innerhalb des Nah- und des Fernpunktes liegen, kleiner als der Zerstreuungskreisdurchmesser des CCD-Chips sein müssen. Ist diese Bedingung erfüllt, so wird der Bereich zwischen diesen Punkten scharf abgebildet (siehe Abb. 27) [40].

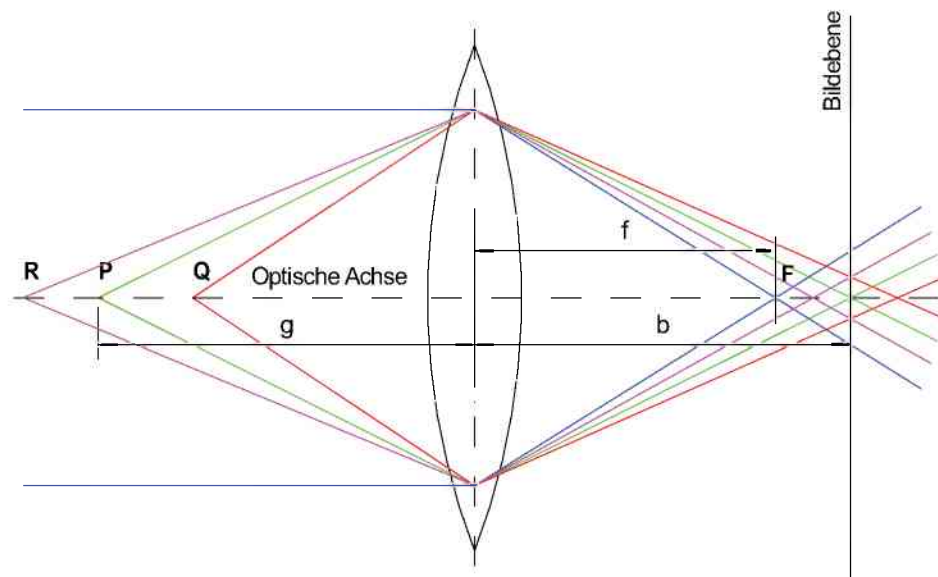


Abb. 26: Schematische Darstellung der Strahlengänge, R ist der Fernpunkt, P der fokussierte Punkt, Q der Nahpunkt und F der Brennpunkt

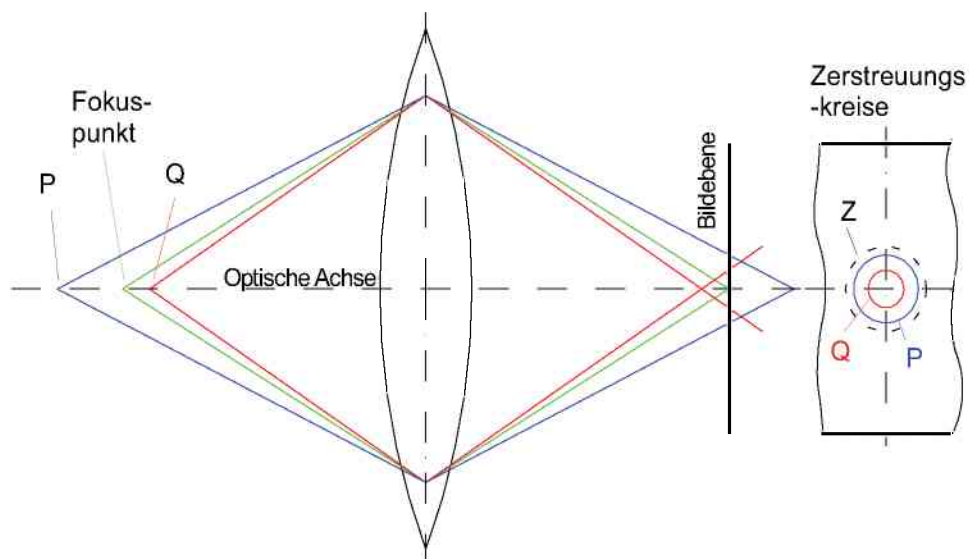


Abb. 27: Schematische Darstellung von Strahlengängen innerhalb des Bereiches der Schärfentiefe. Auf der rechten Seite ist der maximal zulässige Zerstreuungskreisdurchmesser Z und die Zerstreuungskreise des Nah- und des Fernpunktes dargestellt [40]

4 Verfahren, Geräte, Analysemethoden und Durchführung

4.1 Untersuchte Materialien

4.1.1 Feuerfestbaustoffe

Die Untersuchungen umfassten geformte basische Feuerfestbaustoffe (Tab. 2). Bei der Probe A handelt es sich um einen relativ sprödes Produkt, das durch einen Anteil von 4 M.% Fe_2O_3 gekennzeichnet ist. B ist ein eisenarmer Magnesiastein mit einem hohen MgO-Gehalt. Die Probe C weist sprödigkeitsverminderte Eigenschaften auf, was durch den Zusatz von vorreagiertem Spinell (MgAl_2O_4) erreicht wird.

| Probe | MgO | Cr_2O_3 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | CaO | SiO_2 | Rest-C | RD |
|-------|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----|----------------|--------|----------------------|
| | Masseprozent [M.%] | | | | | | | [g/cm ³] |
| A | 92,5 | – | 0,4 | 4 | 2,2 | 0,6 | – | 3,06 |
| B | 97 | – | 0,1 | 0,2 | 1,9 | 0,6 | – | 3,02 |
| C | 87,5 | – | 10,5 | 0,4 | 0,8 | 0,2 | – | 2,94 |
| D | 59,5 | 19,0 | 6,0 | 13,5 | 1,3 | 0,5 | – | 3,22 |
| E | 76,7 | 8,0 | 2,8 | 9,9 | 1,8 | 0,8 | – | 3,04 |
| F | 97,5 | – | 0,1 | 0,4 | 1,6 | 0,4 | 14,0 | 3,0 |
| G | 97,5 | – | 0,1 | 0,4 | 1,6 | 0,4 | 14,0 | 2,95 |

Tab. 2: Chemische Analyse der Feuerfestbaustoffe. RD ist die Rohdichte nach EN ISO 933-1 [77]. Rest-C bezeichnet den Gehalt an Kohlenstoff nach reduzierender Glühung bei 1000°C.

Die Proben D und E sind Magnesiachromitsteine. F und G sind pechgebundene Magnesiacharbonsteine, die sich in der Nachbehandlung unterscheiden. F befindet sich im Originalzustand und G wurde bei 1000 °C in reduzierender Atmosphäre geblüht.

Die Korngrößenverteilung der untersuchten Feuerfeststeine enthält üblicherweise einen Masseanteil von 25 bis 30 % der Fraktion < 0,125 mm. Der restliche Anteil weist einen Korngrößenbereich von 0,125 mm bis 5 mm auf. Um den Beitrag des Feinanteiles (< 0,125 mm) am Rissverlauf berücksichtigen zu können, wurde die Auflösung der 3D-Erfassung der Bruchoberflächen auf $\leq 100\mu\text{m}$ festgelegt.

4.1.2 Zementmörtel

Es wurden verschiedene Zementmörtelsorten (siehe Tab. 3, S. 27) hergestellt, die einen Körnungsbereich von null bis vier Millimeter aufweisen. Die Auswahl der Maximalkorngröße des Zuschlags erfolgte entsprechend der Maximalkorngröße der untersuchten basischen Feuerfestprodukte. Es wurde Estrichsand ausgewählt, die Sieblinie ist in Abbildung 28 dargestellt.

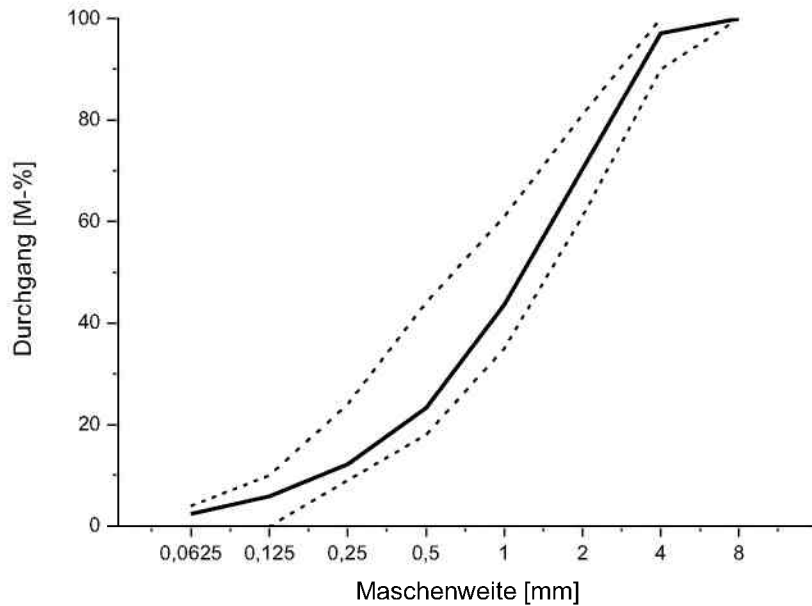


Abb. 28: Sieblinie der verwendeten Gesteinskörnung (schwarz, durchgehend), die Grenzsieblinien (strichlierte Linien) für ein Größtkorn von 4 mm (GK4) stammen aus [78]

Die Zusammensetzung der Zementmörtel und das Prüfalfer wurden so gewählt, dass die Proben eine hohe Bandbreite an Sprödigkeit aufwiesen. Zur Berechnung der Mörtelzusammensetzung wurde die Tabelle 3 herangezogen. Für das Mischungsverhältnis MV gilt die Definition (25) [79, 80], b ist die Masse an Bindemittel, k die Gesteinskörnung und w die Wassermenge.

$$MV = b : k : w \quad (25)$$

$$b = m_Z + m_{MS} \quad (26)$$

m_Z Masse Zement

m_{MS} Masse Mikrosilica

| Sorte | Zement | MV | | | Zusätze [M.%] | | | Alter [d] |
|-------|-----------------|----|------|------|---------------|------|-------|-----------|
| | | b | k | w | MS | FM | VZ | |
| I | CEM II 42,5 R | 1 | 2,17 | 0,34 | 5,0% | 1,5% | 0,8% | 191 |
| J | CEM II 42,5 R | 1 | 2,17 | 0,34 | 5,0% | 1,5% | - | 7 |
| K | CEM II 42,5 R | 1 | 2,17 | 0,34 | 5,0% | 1,5% | 0,8% | 110 |
| L | CEM II 42,5 R | 1 | 2,17 | 0,34 | 5,0% | 1,5% | - | 1 |
| M | CEM II 42,5 R | 1 | 3,05 | 0,4 | - | 1,5% | 0,20% | 1 |
| N | CEM I 32,5 R HS | 1 | 4,58 | 0,55 | - | - | - | 28 |
| O | CEM I 32,5 R HS | 1 | 2,65 | 0,35 | 10,0% | 0,7% | - | 28 |

Tab. 3: Zusammensetzung der Mörtelsorten mit dem Alter der Prüfung in Tagen. MS bezeichnet die Masse an Mikrosilica, FM das Fließmittel und VZ den Verzögerer

Die Herstellung und Lagerung der verschiedenen Mörtelsorten erfolgte nach EN 196-1 [81]. Die verwendeten Zusätze sind in Tabelle 4 angeführt.

| Bezeichnung | Beschreibung |
|-------------|---|
| MS | Duriment® Microsilica |
| FM | Duriment® Fließmittel auf Basis Polycarboxylatether |
| VZ | Duriment® Verzögerer |

Tab. 4: Zusätze des Herstellers [82]

4.2 Probenherstellung

Es wurden Keilspaltprobekörper für bruchmechanische Untersuchungen (siehe Kap. 4.5.1, 36) und Prismen zur Bestimmung des E-Moduls mit dem Resonanzfrequenzverfahren (siehe Kap. 4.5.2, S. 37) hergestellt. Durch den Pressvorgang der Feuerfeststeine kann eine Anisotropie der elastischen und bruchmechanischen Eigenschaften auftreten [83]. Aus diesem Grund wurde die Ligamentfläche so geschnitten, dass die Bruchkraft in der Ligamentfläche liegt (siehe Abb. 29) Die Geometrie der Proben für den Keilspalttest nach Tschegg sind in Abbildung 30 dargestellt. Für die Bestimmung des E-Moduls mit dem Resonanzfrequenzverfahren wurden Prismen mit einer Abmessung von $25 \cdot 25 \cdot 150 \text{ mm}^3$ verwendet.

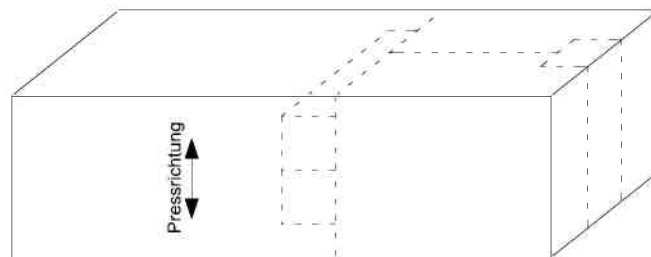


Abb. 29: Symbolische Darstellung der Anordnung von Probekörpern für den Keilspalttest und der Prismen für die Resonanzfrequenzmethode aus einem Feuerfeststein im Rechteckformat

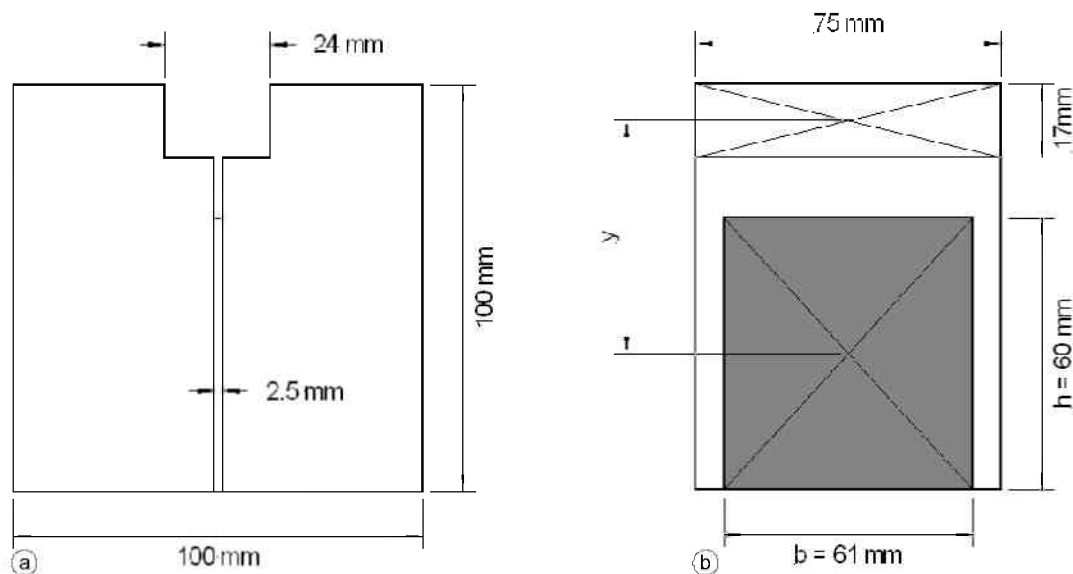


Abb. 30: Darstellung der Abmessungen der Probekörper a) sowie der Bruchfläche b), die Ligamentfläche ist grau markiert

4.3 Geräte

4.3.1 Mechanische Prüfung

Für die bruchmechanischen Untersuchungen wurde die Universalprüfmaschine „Shimadzu Computer Controlled Precision Universal Tester Autograph AG-G“ eingesetzt. Das Gerät verfügt über eine spindelgetriebene Traverse. Als Antrieb dient ein Servomotor in Verbindung mit einer im Jahre 2004 erneuerten Steuer- und Regeleinheit der Firma Messphysik Materials Testing GmbH [57]. Die Universalprüfmaschine weist eine Messgenauigkeit der Klasse 1 nach EN 10002-4 [58] auf.

Für die berührungsfreie Verschiebungsmessung wurde ein Videoextensometer mit der Bezeichnung ME 46 NG eingesetzt [57]. Die Anwendung erfolgt in diametraler Anordnung der Messvorrichtungen.

Das Elastometer ELM 324 der Firma Labek GmbH [59] wurde zur zerstörungsfreien Bestimmung des Elastizitätsmoduls verwendet. Es bietet die Möglichkeit Laufzeitmessungen oder Resonanzfrequenzmessungen im Ultraschallbereich durchzuführen. In dieser Arbeit wurde das Resonanzfrequenzverfahren angewandt.

4.3.2 Die stereoskopische Vorrichtung

Die stereoskopische Vorrichtung zur Erstellung der Kippbilder ist in Abbildung 31 dargestellt. Der Aufbau in Abbildung 31a besteht aus einem stabilen Profilrahmen (1), indem sich eine Kippvorrichtung (3) und eine digitale Kamera mit Optik und Beleuchtung (2) befindet.

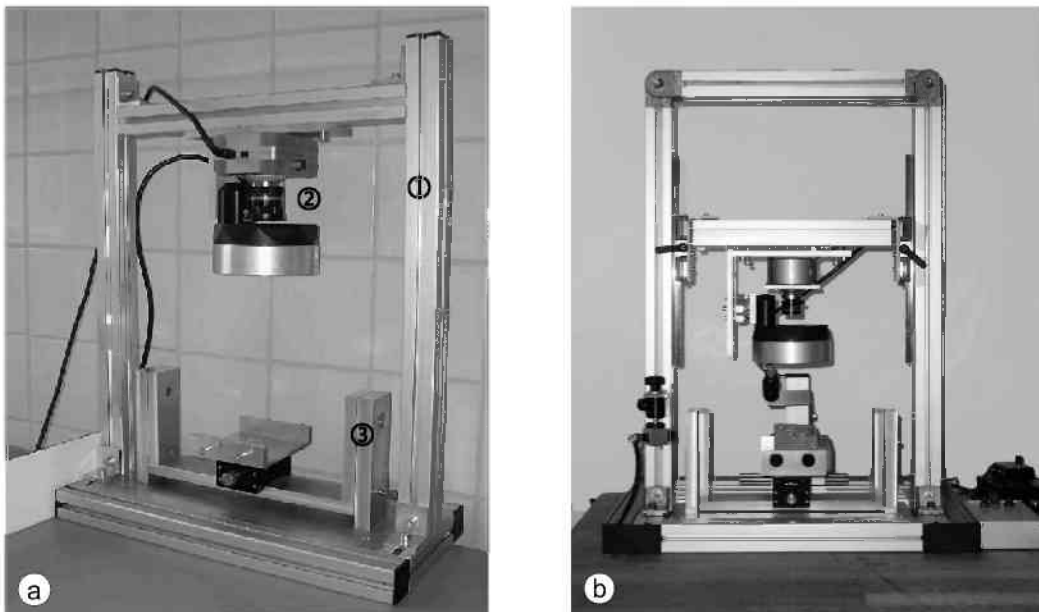


Abb. 31: Vorrichtung zur Erstellung der Kippbilder. Im Jahr 2002 wurde der Prototyp (a) fertiggestellt. Der Stand der Entwicklung des Jahres 2006 ist in (b) dargestellt

Da die Vorrichtung in ihrer Ausgangskonfiguration nur wenige Freiheitsgrade zur Anpassung an unterschiedliche Geometrien der Bruchoberflächen bot, wurde sie während dieser Arbeit weiterentwickelt (siehe Abb. 31b).

4.3.3 Bilderstellung

Die Dimensionierung der Präzisionsdigitalkamera basiert auf der in der Problemstellung gegebenen laterale Auflösung von 100 μm . Als Grundlage für die Berechnung der Auflösung wird die Geometrie der zu analysierenden Bruchfläche herangezogen, welche der Länge einer Keilspaltprobe entspricht und 100 mm beträgt (siehe Abb. 30, S. 28). Mit der lateralen Auflösung von 100 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ ergibt sich eine Mindestpixelanzahl der Längsseite des Digitalisierungschips von 1000 Pixel. Diese Anforderungen werden von handelsüblichen Kameras erfüllt.

Die Kamerahardware:

Beim Prototyp der stereoskopischen Vorrichtung (siehe Abb. 31a) wurde die CMOS-Kamera „Pixel Link A633“ [60] eingesetzt. Der Begriff CMOS ist eine Abkürzung für „Complementary Metal Oxide Semiconductor“. Die technischen Daten sind in Tabelle 6 dargestellt. Im Laufe der Untersuchungen wurde festgestellt, dass diese Kamera einen bedeutenden Nachteil bei der Abbildung von dunklen Bruchoberflächen aufweist. Dieser äußert sich als Effekt einer Überbelichtung (Bloomingeffekt) oder als Bildrauschen. Der Bloomingeffekt (siehe Kap. 3.5.2, S. 23) tritt beim Überschreiten des Grenzwertes der Belichtungszeit auf. Im Gegensatz dazu entsteht das Bildrauschen wenn die Belichtungszeit zu gering ist. Beide Effekte können in Kombination vorkommen, weil diese von den örtlichen optischen Eigenschaften der Bruchoberfläche abhängen. Dadurch erhält man fehlerhafte Kippbilder, die für die stereoskopische Auswertung ungeeignet sind.

| Kamera | PixelLink A633 | Baumer HRC33 |
|--|----------------|------------------------------|
| Bildsensortyp | CMOS | Interline Frame Transfer CCD |
| Farbtyp | Graustufen | Farbe |
| Auflösung [Pixel²] | 1280 x 1024 | 2088 x 1550 |
| Pixelgröße [μm] | 7,5 | 3,45 |
| Sensordiagonale [mm] | 12,3 | 9,0 |
| Datentiefe | – | 12 Bit/Pixel AD-Wandler |
| Belichtungszeit | – | 230 μs – 30 s |
| Dynamik | – | >57 dB |

Tab. 5: Darstellung der Kenndaten der verwendeten digitalen Kameras.

Zur Erhöhung der Bildqualität und Erweiterung des Anwendungsbereiches wurde die „CCD-Präzisionskamera Baumer HRC33“ der Firma Baumer Optronik GmbH [61] (siehe Tab. 5) für die nachfolgenden Untersuchungen eingesetzt. Diese Kamera basiert auf der Interline-Frame-Transfer-Technik (siehe 3.5.1, S. 22) und weist einen höheren Dynamikumfang auf, wodurch das Auftreten des Bloomingeffektes reduziert werden kann.

Die Optik:

Das Objektiv Schneider Xenoplan 1,4/17 der Firma Schneider Optische Werke GmbH [62] kam in Verbindung mit der Kamera Baumer HRC33 zum Einsatz. Es wurde für die Mess- und Prüfanwendung mit CMOS- und CCD-Kameras entwickelt.

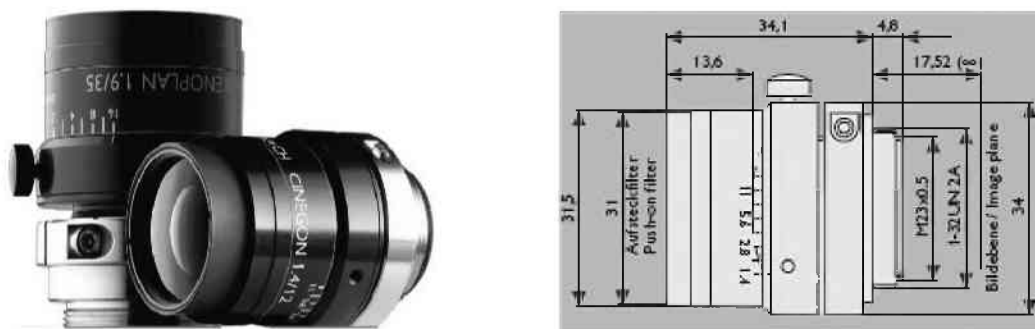


Abb. 32: Das Objektiv Schneider Xenoplan 1,4/17 [62]

Die Schärfentiefe:

Die Anforderung an die benötigte Schärfentiefe ist durch zwei Arten von Höhendifferenzen, die bei der Anwendung des stereoskopischen Verfahrens an Feuerfestbruchoberflächen auftreten, gekennzeichnet:

- Höhenunterschiede die auf der Bruchoberfläche vorhanden sind (siehe Abbildung 1, 3, 4 auf S. 4 bis 6) und
- Höhenunterschiede die infolge des Kippvorganges entstehen (Abbildung 20, S. 19).

Das Kamera-Optik System muss so ausgelegt werden, dass es die Summe der maximalen Höhenunterschiede abbilden kann. Messungen an Bruchoberflächen ergaben eine maximale Höhendifferenz von 25 mm. Für die Auswahl der Optik musste die Schärfentiefe entsprechend der Vorgehensweise die in Kapitel 3.6 (S. 23) berechnet werden. Die benötigten Abmessungen (Tab. 7) wurden an der stereoskopischen Vorrichtung (siehe Abb. 31b) ermittelt.

| | | |
|------------------------------|--------|------|
| Gegenstandsweite | g [mm] | 236 |
| Bildweite | b [mm] | 35,5 |
| Zerstreuungskreisdurchmesser | z [mm] | 0,01 |
| Blende | k | 22 |

Tab. 6: Berechnungsdaten für die Schärfentiefe

Da für den Wert des Zerstreuungskreisdurchmessers keine Herstellerangaben existieren, wurde der Wert entsprechend den Angaben in [38] und [40] ausgewählt.

| | | |
|----------------------|-----------------------------------|-------------|
| Brennweite | f [mm] | 30,87 |
| Hyperfokaldistanz | d_h [mm] | 4333 |
| Nahpunkt | d_n [mm] | 225 |
| Fernpunkt | d_f [mm] | 248 |
| Schärfentiefe | Δd [mm] | 22,4 |

Tab. 7: Teilergebnisse und Ergebnis der Berechnung der Schärfentiefe Δd

Die Zwischenergebnisse und Ergebnisse der Berechnung der Schärfentiefe sind in Tabelle 7 dargestellt, welche einen Wert von 22,4 mm ergab. Dieses Resultat stellt aufgrund des angenommenen Wertes für den Zerstreuungskreisdurchmesser eine Näherung dar. Aus diesem Grund wurde die Schärfentiefe mit einer eigens entwickelten Untersuchungs-vorrichtung (Abb. 33) vermessen. Um möglichst ähnliche Bedingungen wie bei der zuvor angeführten Berechnung vorzufinden, wurde die Gegenstandsweite auf einen Wert von 240 mm und die Blende auf einen Wert von 22 eingestellt.

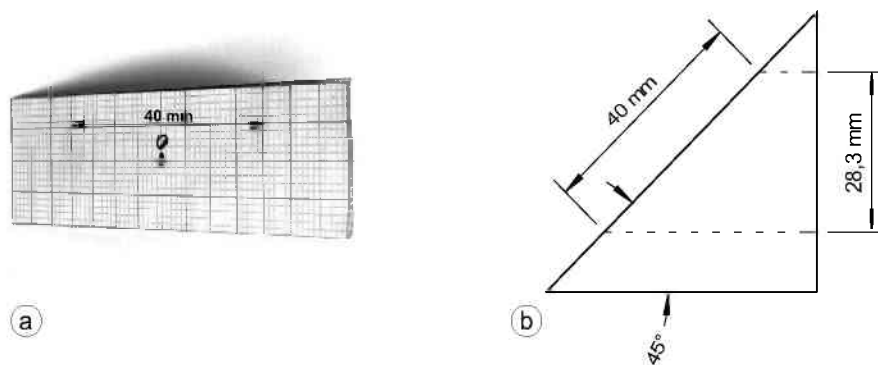


Abb. 33: Vermessung der Schärfentiefe, a) stellt das Digitalbild der Vorrichtung und b) dessen Geometrie dar

Die Fokussierung erfolgte auf die Markierung mit der Bezeichnung „0“ (siehe Abb. 33a). Auf der Hypotenuse der Vorrichtung wurde für den scharf abgebildeten Bereich ein Wert von 40 mm gemessen, die Umrechnung ergab für die verwendete Kamera-Optik Kombination einen Wert der Schärfentiefe von 28,3 mm (Abb. 33b). Somit ist die Eignung der „Baumer HRC 33 Kamera“ in Verbindung mit der Optik „Schneider Xenoplan“ zur Abbildung von stereoskopischen Bildern von Feuerfestbaustoffbruchflächen gegeben.

4.4 Software

4.4.1 Kamerasoftware

Die Software SDKViewer V5.0 [62] wird verwendet um die Digitalkamera „Baumer HR33c“ zu steuern sowie die Bilder auf einem digitalen Datenträger zu speichern. Damit (siehe Abbildung 81, S 85) können folgende Kameraparameter variiert werden:

- Gammakorrektur (Gamma) zur Veränderung der Farbintensität der Pixel durch Überlagerung mit einem Intensitätsprofil
- Belichtungszeit (Exposure Time)
- Verstärkungsfaktor des analogen Bildsignals im CCD-Sensor (Grain)

Weiters können die Bildparameter wie das Bildformat, die Auflösung, die Farbart (z.B. Graustufen, Farbe) und die Farbtiefe (z.B. 12 Bit) eingestellt werden.

Aufgrund der unterschiedlichen optischen Eigenschaften der Bruchoberflächen ist es notwendig diese Parameter zu variieren, damit die Bildqualität optimiert und konstant gehalten werden kann.

4.4.2 Die Software MeX 4.1 zur Durchführung der 3D-Rekonstruktion

Die Stereomatching-Software MeX der Firma Alicona Imaging GmbH [63] wurde zur Durchführung der Berechnung der 3D-Daten aus Kippbildern angekauft. Diese Software wurde ursprünglich vom Hersteller für die Anwendung an rasterelektronenmikroskopisch erstellten Kippbildern entwickelt [32 - 34]. Für die stereoskopische Vorrichtung wurde der Berechnungsalgorithmus vom Hersteller weiterentwickelt. Die Auslieferung des Protoyps MakroMex 1.0 erfolgte im Jahr 2002. Die Entwicklungsphase dauerte bis ins Jahr 2005 und endete in der Version MeX 4.1, welche für die fraktografischen Untersuchungen eingesetzt wurde.

Die Software MeX 4.1 bietet folgende Möglichkeiten:

- stereoskopische 3D-Rekonstruktion von Oberflächen
- Profil,- Oberflächen- und Voluminaanalyse
- Berechnung der fraktalen Dimension D nach dem TPSA Algorithmus [47]
- Rauigkeitsanalysen nach EN 4287 [36]
- Export der 3D-Daten als Textfile

4.4.3 Selbst entwickelte Software

Für Aufgabenstellungen, die über die Möglichkeiten der Software MeX 4.1 hinausgehen, wurden verschiedene Programme selbst entwickelt. Als Entwicklungsumgebung kam Borland Delphi 7 [64] zum Einsatz, welche auf der Programmiersprache Object Pascal basiert. Aus dem Programmcode erzeugt der Compiler der Entwicklungsumgebung eine 32 Bit-Windows-Anwendung.

4.4.3.1 Fracture Analyzer

Zur Durchführung der fraktografischen Analyse an den aus MeX 4.1 exportierten 3D-Daten wurde die Software „Fracture Analyzer“ [65] entwickelt und programmiert. Die Programmierung des Prototyps des Fracture Analyzers erfolgte mit der Programmiersprache Visual Basic for Applications (VBA) [66]. Dieser Prototyp wurde für die Analyse von einzelnen Profilen ausgelegt, da aus MakroMeX 1.0 nur der Export von einzelnen Profilen möglich war [48]. In Zuge der Weiterentwicklung von MakroMex 1.0 zu MeX 4.1 wurde der Export der 3D-Daten möglich und es erfolgte die Erhöhung der Auflösung der 3D-Daten. Bei z. B. einer lateralen Auflösung von 98 μm wird aus MeX 4.1 eine Datei mit $7 \cdot 10^5$ Datentripel und einer Größe von 25 Megabyte exportiert. Für diese Anforderungen reichte die Rechengeschwindigkeit und die Speicherkapazität von VBA nicht mehr aus, deshalb erfolgte der Wechsel zur Entwicklungsumgebung Borland Delphi 7. Die finale Version des Fracture Analyzers ermöglicht die Analyse der gesamten 3D-Daten, indem beliebig viele Profile automatisch aus den 3D-Daten gewonnen und analysiert werden.

In Abbildung 34 ist ein vereinfachtes Ablaufschema der Analysesoftware dargestellt. Zuerst erfolgt die Aufbereitung der aus MeX 4.1 exportierten 3D-Daten. Weiters ist das Laden von schon aufbereiteten Daten und die mathematische Erzeugung von 3D-Daten möglich, welche ausschließlich für Testzwecke eingesetzt wird. Im zweiten Schritt erfolgt die Anwendung von Analysemethoden, wie z. B. der Bestimmung der lateralen Korrelationslänge. Zuletzt werden die Analyseergebnisse und alle Programmparameter in Form einer Tabelle gespeichert.

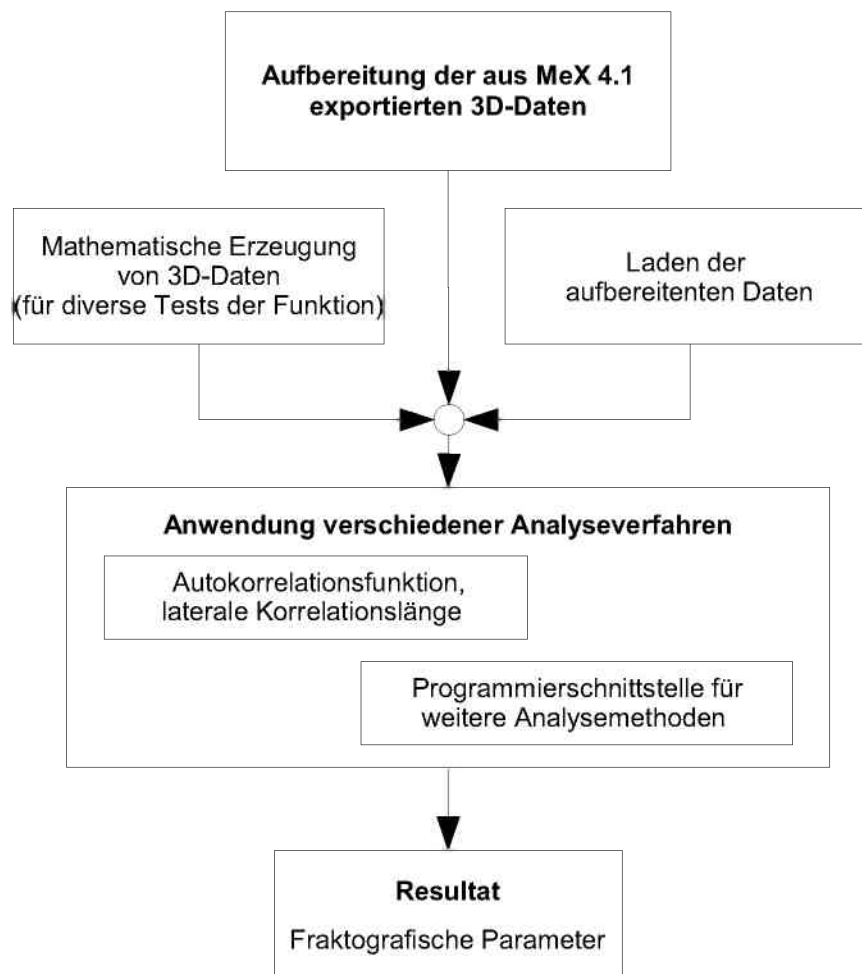


Abb. 34: Interner Ablauf der Software Fracture Analyzer [65]

4.4.3.2 Histogrammanalysesoftware

Mit dem Programm „Histogram from Bitmap“ [67] wird die Bildqualität in Form von eines relativen Grauwert-Histogramms analysiert. Die Definition und Berechnung des Grauwert-Histogramms kann in [69, 70] nachgelesen werden. Mit dieser Software ist die Analyse und Gegenüberstellung von zwei Grauwertbilder gleichzeitig möglich (siehe Abb. 35, S. 35). Die Histogrammanalyse erfolgt dabei innerhalb eines rechteckigen Auswahlbereiches.

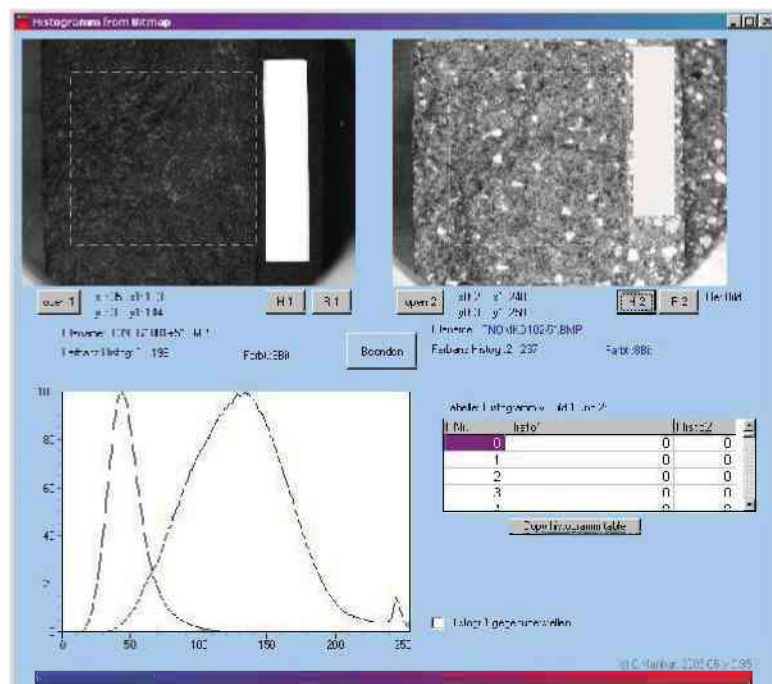


Abb. 35: Software zur Bildqualitätsanalyse per Histogramm [67]. Die Auswahlbereiche sind als strichlierte Rechtecke dargestellt.

4.4.3.3 Software zur Mittelung von Bildern

Die Software zur Mittelung von Bildern [68] wurde programmiert um die Bildqualität zu verbessern. Dabei erfolgt die Überlagerung der Pixel von zwei oder mehr Aufnahmen einer Bruchoberfläche, mit dem Ziel eine Optimierung der Ausleuchtung zu erreichen. Die detaillierte Beschreibung dieser Technik kann in [71-73] nachgelesen werden.

4.5 Die Bestimmung der bruchmechanischen Eigenschaften

4.5.1 Bruchmechanische Parameter

Zur Bestimmung der bruchmechanischen Eigenschaften und Herstellung der Bruchoberflächen für die fraktografischen Untersuchungen, wird der Keilspaltversuch nach Tschegg [50, 51, 52] eingesetzt.

In Abbildung 36 ist die Versuchsdurchführung schematisch dargestellt. Die Probe ist mit einer Ausnehmung versehen, die die Kraftübertragungsleisten mit den Rollen aufnimmt. Weiters verfügt sie über eine Starter- und zwei Seitenkerben. Beim Versuch ruht die Probe auf einem prismatischen Auflager. Aus der Vertikalkraft F entsteht durch die Wirkung des Keils eine Horizontalkraft F_H , die zur Spaltung der Probe führt.

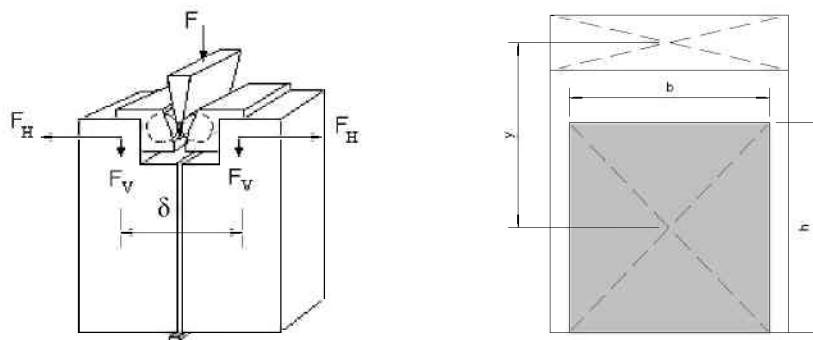


Abb. 36: Schematische Darstellung des Keilspalttests nach Tschegg, links wurde aus [53] entnommen, rechts stellt die Ligamentfläche dar

Mithilfe dieses Verfahrens können mehrere bruchmechanische Kennwerte gewonnen werden. Einer dieser Kennwerte ist die spezifischen Bruchenergie G_f , die nach Gleichung (27) berechnet wird.

$$G_f = \frac{1}{A} \int_0^{\delta_{max}} F_H(\delta) d\delta \quad (27)$$

In Gleichung (27) stellt δ_{max} die maximale horizontale Verschiebung des Keilspaltversuchs und A die Ligamentfläche dar. Weiters wird eine nominelle Kerbzugfestigkeit σ_{NT} gemäß Gleichung (28) bestimmt. Der erste Term der Gleichung stellt den Zugspannungsanteil und der zweite Term die Biegespannungsanteil dar.

$$\sigma_{NT} = \frac{F_{Hmax}}{b \cdot h} + \frac{6 \cdot F_{Hmax} \cdot y}{b \cdot h^2} \quad (28)$$

F_{Hmax} ist die maximale Horizontalkraft im Last-Verschiebungsdiagramm (Abb. 37) und y der Normalabstand der Wirkungslinie der eingebrachten Horizontalkraft vom Schwerpunkt der Ligamentfläche (siehe Abb. 36).

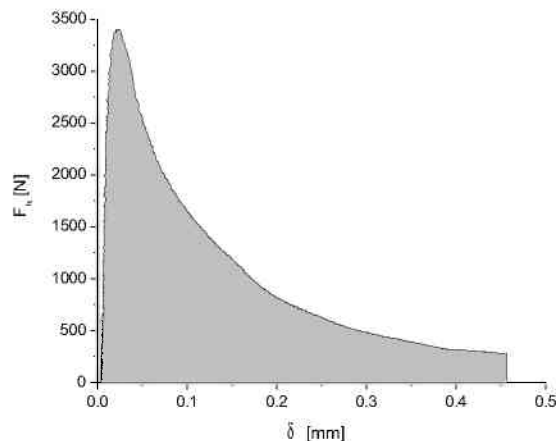


Abb. 37: Beispiel eines Last-Verschiebungsdiagrammes

Die so genannte charakteristische Länge l_{ch} [54], die in Gleichung (29) dargestellt ist, wird zur vergleichenden Beurteilung der Sprödigkeit von Baustoffen eingesetzt. Eine abnehmende Sprödigkeit äußert sich bei unveränderter Probengeometrie in einer Zunahme der charakteristischen Länge.

$$l_{ch} = \frac{G_f \cdot E}{\sigma_{NT}^2} \quad (29)$$

4.5.2 Elastische Konstanten

Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls E erfolgt unter Anwendung des zerstörungsfreien Resonanzfrequenzverfahrens [55]. Weiters bietet dieses Verfahren die Möglichkeit, Hochtemperaturmessungen ohne großen Aufwand durchzuführen [56]. Die Berechnung des E-Moduls der Dehnwelle E_D erfolgt mit Gleichung (30).

$$E_D = \frac{4 \cdot l^2 \cdot \rho}{n_D^2} \cdot f_D^2 \cdot K_D \quad (30)$$

$$K_D = \frac{1}{\left(1 - \frac{\pi^2 \cdot \mu^2}{2 \cdot l^2} \cdot \frac{b^2 + h^2}{12}\right)^2} \quad (31)$$

| | |
|--------|--|
| b, h | Querschnittsabmessungen des prismatischen Probekörpers |
| l | Länge des Probekörpers |
| f_D | Frequenz der Dehnwelle |
| μ | Poisson'sche Konstante |
| n_D | Ordnung der Dehnwelle |
| ρ | Dichte |

Bei den nachfolgend angeführten Untersuchungen wurde eine prismatische Geometrie der Probekörper eingesetzt.

4.6 Die dreidimensionale Abbildung der Bruchoberfläche

Die dreidimensionale Abbildung der Bruchoberfläche erfolgt stereoskopisch (siehe Kap. 3.4.2, S. 19). Zur Erstellung der Kippbilder wird eine Präzisionsdigitalkamera in Verbindung mit einer stereoskopischen Vorrichtung eingesetzt. Die Steuerung der Digitalkamera sowie die Speicherung der Bilder erfolgt mit der Kamerasoftware. Die Berechnung der 3D-Daten der Bruchoberfläche wird mit einer Stereomatchingsoftware (siehe Kap. 4.4.2, S. 33) durchgeführt.

4.7 Fraktografische Analyse

In Kapitel 3.2 wurden fraktografische Parameter von Bruchoberflächen beschrieben. Diese umfasste die fraktale Dimension D , die mit vier verschiedenen Methoden bestimmt wurde sowie die Rauigkeitsparameter R_s und R_L .

4.7.1 Die laterale Korrelationslänge

Die Ermittlung der laterale Korrelationslänge ξ setzt die Berechnung der Autokorrelationsfunktion $A(k)$ an der zu analysierenden Datenreihe voraus.

Die Autokorrelationsfunktion [41 - 43]:

Die Autokorrelationsfunktion $A(k)$ wird hier für eine diskrete Datenreihe bestimmt, in welcher eine Anzahl von N äquidistanten Einzelwerten $\{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ vorhanden sind. Diese Werte sind Realisierungen einer Zufallsvariable, die von der Zeit beziehungsweise vom Ort abhängen kann. Es wird die Korrelation der Werte z_i mit den Werten z_{i+k} untersucht, dabei wird k vielfach als Lag bezeichnet. Die Zufallsvariablen z_i stellen bei der Analyse von Profilen Höhenwerte dar, die in ortsabhängigen äquidistanten Schritten im Profil vorhanden sind. Für den k -ten Lag wird die Autokorrelationsfunktion A_k nach Gleichung (32) berechnet.

$$A_k = \frac{c_k}{c_0} \quad (32)$$

Mit Gleichung (33) wird die Autokovarianz c_k bestimmt, wobei \bar{z} den Mittelwert der Datenreihe darstellt. Die Autokovarianz c_0 dient der Normierung der Autokorrelationsfunktion.

$$c_k = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-k} (z_i - \bar{z})(z_{i+k} - \bar{z}) \quad (33)$$

Die Gleichung (33) gilt für $k = 1, 2, \dots, m$ wenn $m \leq N/4$ ist. Für große Werte von m wird nach $N-1$ durch N ersetzt, in diesem Fall wird die Gleichung (34) angewendet [42].

$$A_{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (z_i - \bar{z})(z_{i+k} - \bar{z})}{\sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2} \quad (34)$$

Chatfield [41] erwähnt, dass manche Autoren für $m > N/4$ die Gleichung (35) zur Berechnung der Autokovarianz c_k anwenden.

$$c_k = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (z_i - \bar{z})(z_{i+k} - \bar{z}) \quad (35)$$

Dies führt bei einer großen Anzahl N der Werte zu einer geringen Differenz im Ergebnis von c_k . Bei dieser Arbeit wird die Gleichung (34) zur Bestimmung der Autokorrelationsfunktion eingesetzt.

In Gleichung (34) ist ersichtlich, dass $A(k)$ stark vom Mittelwert \bar{z} abhängt. Dies führt zur Beeinflussung der Autokorrelationsfunktion, wenn die Datenreihen mit Trends oder niederfrequenten Schwingungen überlagert sind. Deshalb ist es notwendig, dass die zu analysierenden Datenreihen stationär sind.

In Abbildung 38 sind Beispiele für instationäre Zeitreihen dargestellt. In der linken Abbildung wird die Instationarität durch verschiedene lokale Trends und im rechten Bild durch lokal konstante Mittelwerte verursacht. Eine weitere Möglichkeit sind so genannte saisonale Störungen, die durch Überlagerung der Datenreihe mit niederfrequenten Schwingungen entsteht.



Abb. 38: Beispiele für lokale Schwankungen in Datenreihen [43]

Die geforderte schwache Stationarität kann durch die Anwendung von verschiedenen Filtermethoden erreicht werden. Wie zum Beispiel: Die „Kurvenanpassung“, die „Filterung“ und die „Differenzierung“. Die letzte Methode wird aufgrund ihrer einfachen Anwendung und dem geringen Rechenaufwand oft verwendet. Nach [42] und [43] eignet sich der Differenzenfilter, um Trends und schwache saisonale Störungen aus Datenreihen zu entfernen.

Die Anwendung des Differenzenfilters ergibt die gefilterte Datenreihe $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_{N-1}\}$ die aus der ungefilterten Datenreihe $\{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ nach Gleichung (36) berechnet wird.

$$Z_i = z_{i+1} - z_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (36)$$

Die laterale Korrelationslänge:

Die laterale Korrelationslänge ξ [44, 45, 46] entspricht jenem Lag k , bei dem die Autokorrelationsfunktion $A(k)$ auf $1/e$ abgefallen ist. Dieser Zusammenhang wird nach Zhao [46] mit Gleichung (37) beschrieben.

$$A_{(k)} \approx A_{(0)} \cdot e^{-\frac{k}{\xi}} \quad (37)$$

In Abbildung 39 ist ein Beispiel für die Anwendung der Autokorrelationsanalyse an einer Sinusfunktion dargestellt. Der erhaltene Wert der lateralen Korrelationslänge ξ ist direkt proportional zur Wellenlänge der untersuchten Sinusschwingung.

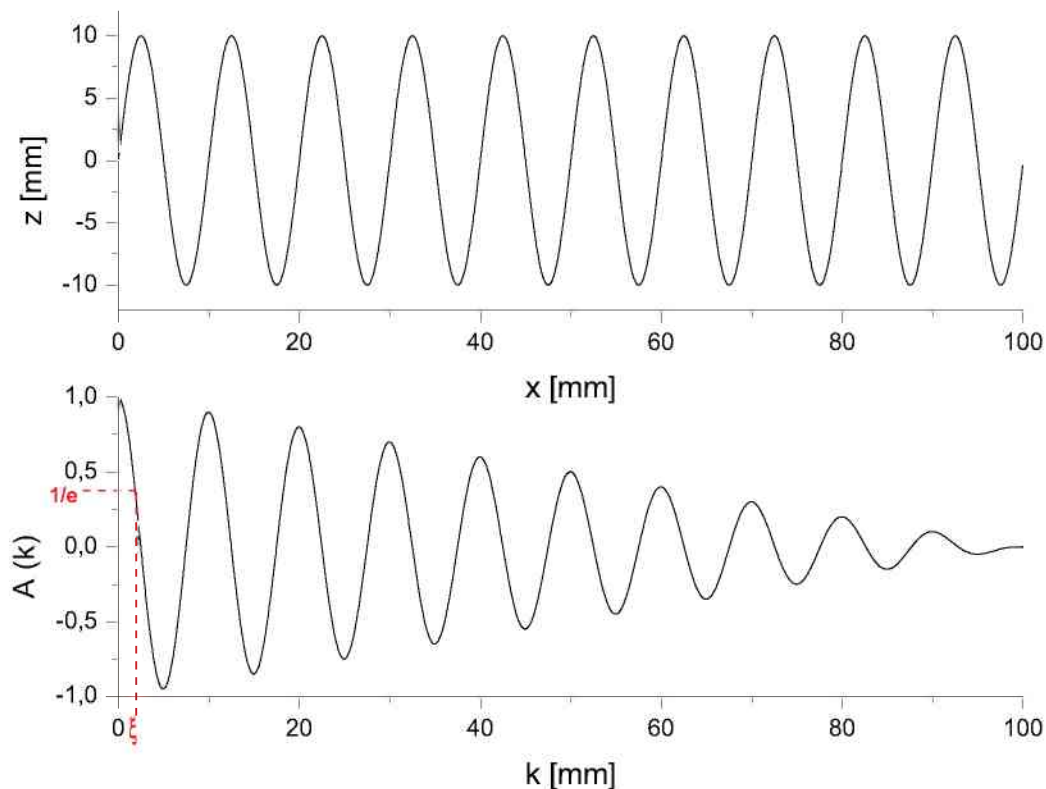


Abb. 39: Beispiel einer Sinusschwingung (oben) mit einer Wellenlänge von 7,5 mm. Die Autokorrelationsfunktion $A(k)$ dieser Schwingung (unten) ergibt eine laterale Korrelationslänge von 1,86 mm

Nach [46] definiert ξ die repräsentative laterale Dimension einer rauen Oberfläche. Ist nun der Abstand zweier Oberflächenpunkte innerhalb von ξ , dann können die Höhen dieser Punkte als korreliert angenommen werden. Ist der Abstand zweier Oberflächenpunkte größer als ξ , so können die Höhen dieser Punkte als unabhängig voneinander bezeichnet werden.

4.7.2 Die quadratische mittlere Profilneigung

Zur Vermessung von grobkeramischen Bruchoberflächen können Hybridparameter nach EN ISO 4287 [36] angewandt werden, weil diese vertikale und horizontale Strukturkomponenten der Oberflächenrauheit berücksichtigen. Diese Eigenschaft ist von Interesse, da bei Bruchflächen von Feuerfestbaustoffen die beteiligte Korngröße sich auf den Rissverlauf in lateraler und vertikaler Richtung auswirkt.

Die quadratische mittlere Profilneigung $P_{\Delta q}$ ist ein Parameter, der unabhängig von den Restwelligkeiten im analysierten Profil ist. Die Größe $P_{\Delta q}$ ist folgendermaßen definiert.

$$P_{\Delta q} = \sqrt{\frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} (\theta(x) - \bar{\theta})^2 dx} \quad (38)$$

$\theta(x)$ ist die Neigung des Profils an der Position x . $\bar{\theta}$ definiert die mittlere Profilneigung aller Positionen innerhalb der Profillänge l_n .

$$\bar{\theta} = \frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} \theta(x) dx \quad (39)$$

4.7.3 Der Rauigkeitsparameter R_s

Der Parameter R_s ist der Quotient aus der wahren und der projizierten Oberfläche einer Bruchfläche. Detaillierte Informationen befinden sich in Kapitel 3.2 auf Seite 3.

4.7.4 Die fraktale Dimension

Zur Bestimmung der fraktalen Dimension wird der Triangular Prism Surface Area Algorithmus (TPSA) [47] angewandt, der auf der Grid-Scaling Methode basiert (siehe Kap. 3.2, S. 5).

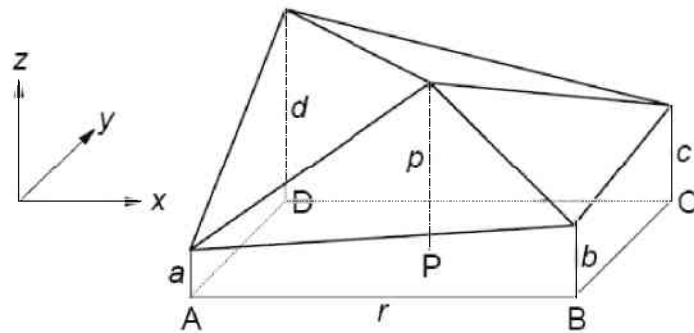


Abb. 40: Darstellung der Triangular Prism Surface Area Methode. A bis D und P stellen die Position im kartesischen Koordinatensystem dar. Die Seitenlängen a bis d enthalten die Höhenangaben [47]

Die Bestimmung der approximierten Oberfläche $A(r)$ erfolgt für den Gitterabstand r (siehe Abb. 40). Auf der Ordinate des Richardson-Plots wird $A(r)$ logarithmisch und auf der Abszisse der Gitterabstand r logarithmisch aufgetragen. Die Berechnung der fraktalen Dimension D erfolgt anhand der Gleichung (1), welche im Kapitel 3.2 auf Seite 5 dargestellt ist.

4.7.5 Ablauf der Erstellung und fraktografischen Analyse der 3D-Daten

In Abbildung 41 ist das Ablaufschema der Erstellung und fraktografischen Analyse der 3D-Daten dargestellt.

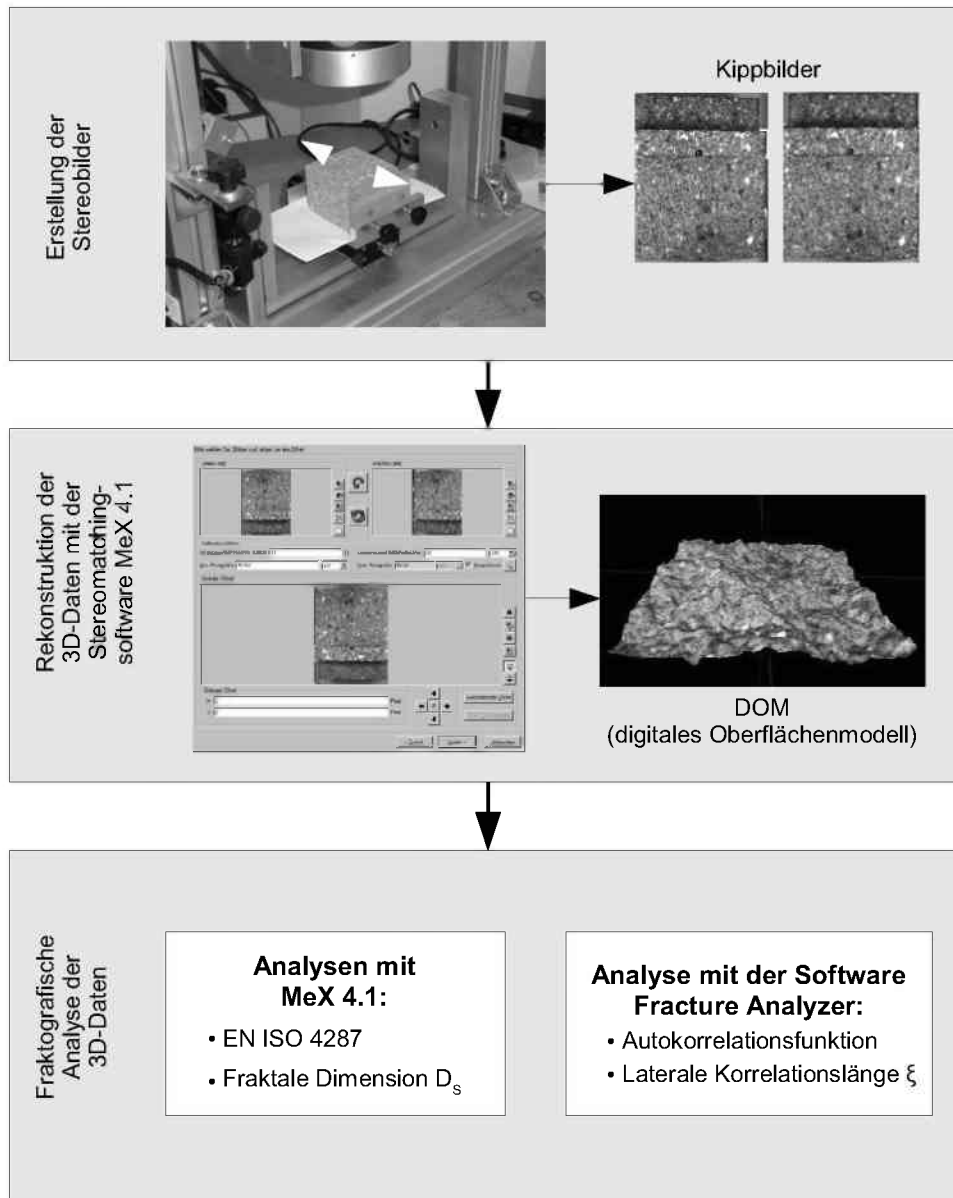


Abb. 41: Ablaufschema der fraktografischen Analyse

Es umfasst drei Schritte. Im Ersten werden die Kippbilder der Bruchoberfläche erstellt. Im zweiten Schritt erfolgt die Rekonstruktion der 3D Daten aus den Stereobildern mit der Software MeX 4.1 [64]. Im letzten Schritt werden die 3D-Daten fraktografisch analysiert. Dies erfolgt einerseits mit der Software MeX 4.1 und andererseits Software Fracture Analyzer [65].

4.7.6 Bestimmung der lateralen Korrelationslänge anhand der 3D-Daten einer Bruchoberfläche

Mit der Software Fracture Analyzer (siehe Kap. 4.4.3.1, S. 33) erfolgt die Bestimmung der lateralen Korrelationslänge ξ an äquidistanten Profilen, welche parallel zur Hauptrichtung der Rissausbreitung ausgerichtet sind (Abb. 42). Die laterale Korrelationslänge ξ ist der arithmetische Mittelwert aller einzelnen lateralen Korrelationslängen ξ_i der Oberfläche [76].

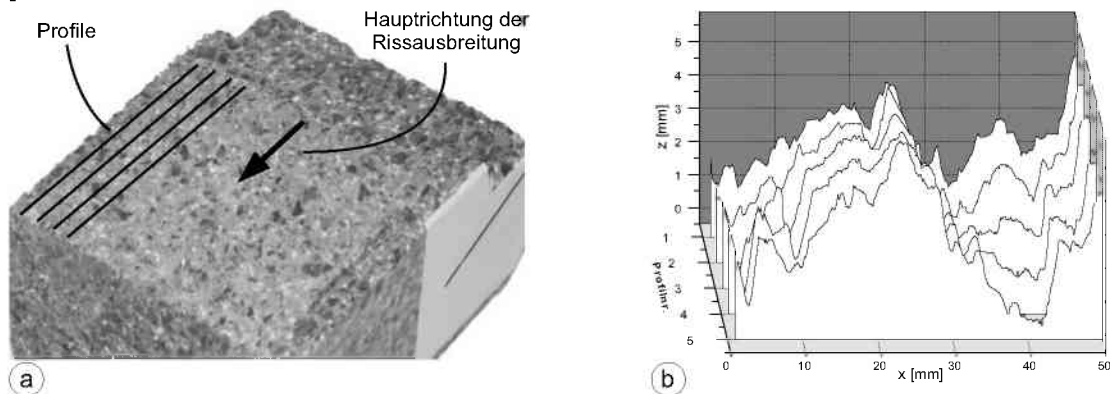


Abb. 42: Symbolische Darstellung der Erstellung der äquidistanten Profillinien parallel zur Hauptrichtung der Rissausbreitung sowie b) einige Beispiele für extrahierte Profile

4.8 Werkzeuge zur Bestimmung der Bildqualität

Eine ausreichende Bildqualität ist die Voraussetzung für die Durchführung des Stereo-matchingverfahrens. Für die Kontrolle der Bildqualität werden zwei Werkzeuge eingesetzt:

- Bildqualitätsanalyse der Software MeX 4.1 [63]
- Histogrammanalysesoftware [67].

Mit MeX 4.1 kann die qualitative Beurteilung der Bildqualitätsparameter Kontrast, Bildrauschen und Texturierung (Abb. 43) durchgeführt werden.

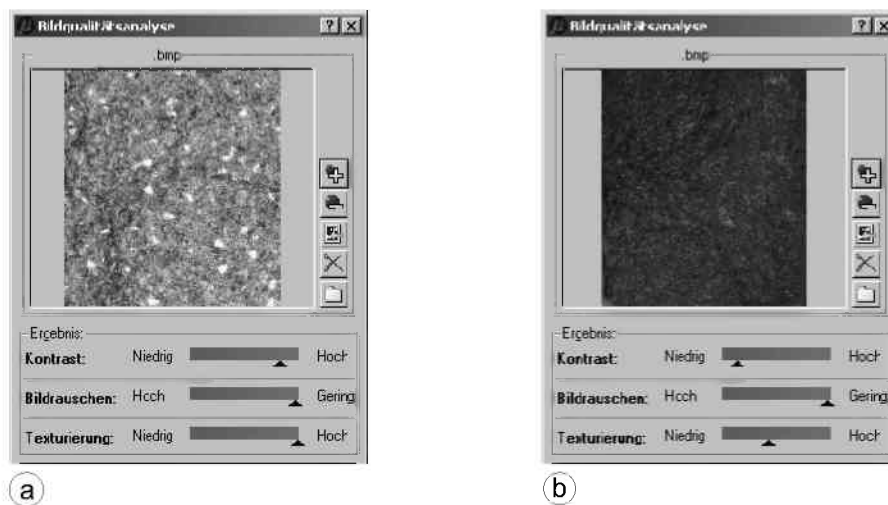


Abb. 43: Bildqualitätsanalyse mit der Software MeX 4.1 [63]. In a) ist ein Bild einer Bruchfläche mit einer ausreichenden Qualität und in b) ein Bild mit einer nicht ausreichenden Bildqualität dargestellt

4.9 Optimierung der Bildqualität

Als Basis für die Optimierung der Bildqualität dient die Kenntnis über mögliche Einflussfaktoren. Diese entstehen einerseits durch die Bedienung der Kamera und resultieren andererseits aus den optischen Eigenschaften der Bruchoberfläche.

4.9.1 Beispiele für Einflussfaktoren auf die Bildqualität

Kameraparameter:

Die Auswahl der geeigneten Werte der Kameraparameter (z. B. Belichtungszeit, usw.) hängt in erster Linie von der Erfahrung der ausführenden Person ab. Eine gute Hilfe stellen die Werkzeuge zur Bestimmung der Bildqualität dar.

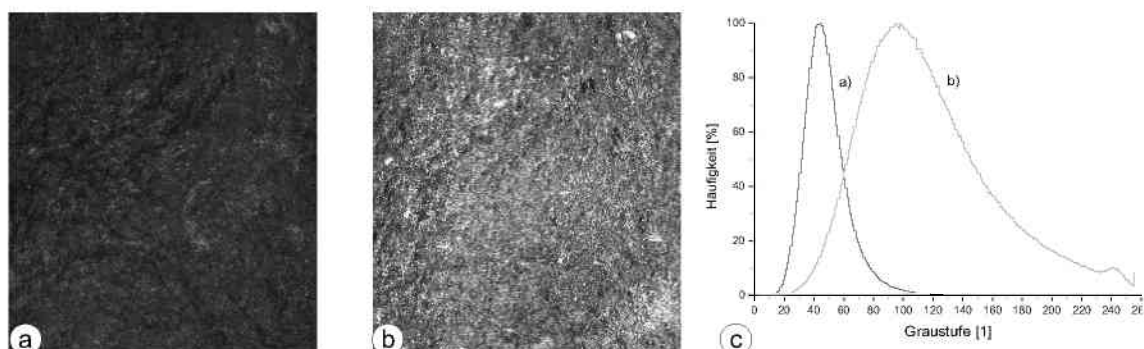


Abb. 44: Aufnahme einer Oberfläche mit unterschiedlichen Belichtungszeiten. In c) sind die Histogramme der Bilder a) und b) dargestellt

In Abbildung 44a und b wurde dieselbe Bruchfläche mit unterschiedlichen Belichtungszeiten aufgenommen. Die Gegenüberstellung der relativen Grauwert-histogramme (siehe Abb. 44c) macht die Unterschiede deutlich.

| Abbildung | a) | b) |
|-------------------------------|----|-----|
| Position des Peaks (Grauwert) | 43 | 97 |
| Anzahl der Farben (Grauwert) | 72 | 222 |

Tab. 8: Auswertung der Histogramme aus Abbildung 44a) und 44b).

Die Verteilung der Grauwerte zeigt durch die Erhöhung der Belichtungszeit eine größere Breite und eine Erhöhung der Anzahl der Grauwerte (siehe Tab. 8).

Reflexionen:

Diese treten häufig an Spaltflächen von Körnern auf und führen zu Abweichungen zwischen beiden Kippbildern (Abb. 45). Wodurch für die Stereomatchingsoftware die Erkennung von homologen Punkten beeinträchtigt wird. Auf die Behebung dieser Qualitätsmängel wird später eingegangen.

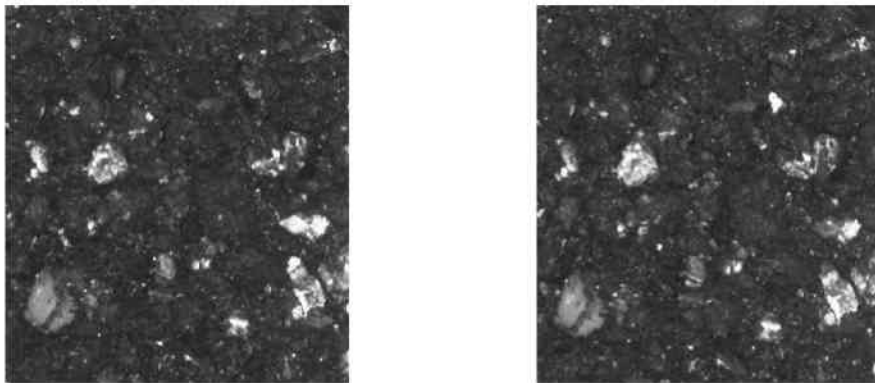


Abb. 45: Kippbilder mit Reflexionen an Spaltflächen

Der Bloomingeffekt:

Der Bloomingeffekt tritt auf, wenn helle Körner in einer dunklen Matrix eingebettet sind (Abb. 46). Bei einer dunklen Oberfläche muss die Belichtungszeit so gewählt werden, dass das erstellte Bild genügend Kontrast aufweist. Infolgedessen kommt es im Bereich der hellen Flächen zu einer örtlichen Übersteuerung der betroffenen Fotodioden des CCD-Chips. Dieser Effekt führt zu einer scheinbaren Vergrößerung der Kornabmessungen. Die Grundlagen dieses Effektes können im Kapitel 3.5.2 auf Seite 23 nachgelesen werden.

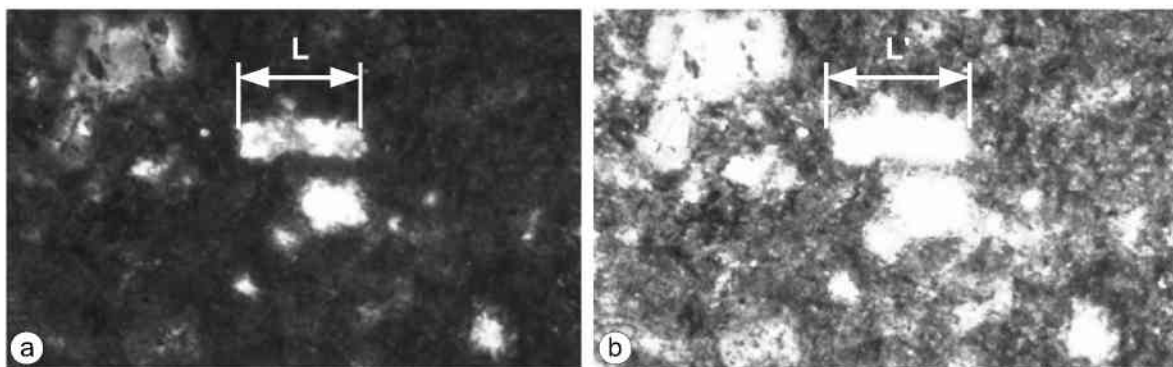


Abb. 46: Veränderung der Kornabmessung infolge der örtlichen Überbelichtung

In der folgenden Tabelle 9 sind die Längen der Körner im normal belichteten Zustand L und im überbelichteten Zustand L' angegeben. Die relative Größenänderung d_{rel} ist die auf L bezogene Größenänderung in Prozent. Die Auswirkung des Bloomingeffektes auf die Abmessung der hellen Flächen ist in Tabelle 9 und in Abbildung 47 dargestellt.

| Nr. | L [Pixel] | L' [Pixel] | d_{rel} [%] |
|-----|-----------|------------|---------------|
| 1 | 18 | 24 | 33,3 |
| 2 | 29 | 42 | 44,8 |
| 3 | 15 | 24 | 60,0 |
| 4 | 33 | 46 | 39,4 |
| 5 | 40 | 52 | 30,0 |
| 6 | 42 | 49 | 16,7 |
| 7 | 55 | 66 | 20,0 |
| 8 | 31 | 42 | 35,5 |
| 9 | 13 | 23 | 76,9 |
| 10 | 71 | 82 | 15,5 |
| 11 | 14 | 22 | 57,1 |
| 12 | 51 | 65 | 27,5 |
| 13 | 10 | 17 | 70,0 |
| 14 | 53 | 66 | 24,5 |

Tab. 9: Abmessungen von Körnern im normal belichteten Zustand L und im überbelichteten Zustand L'

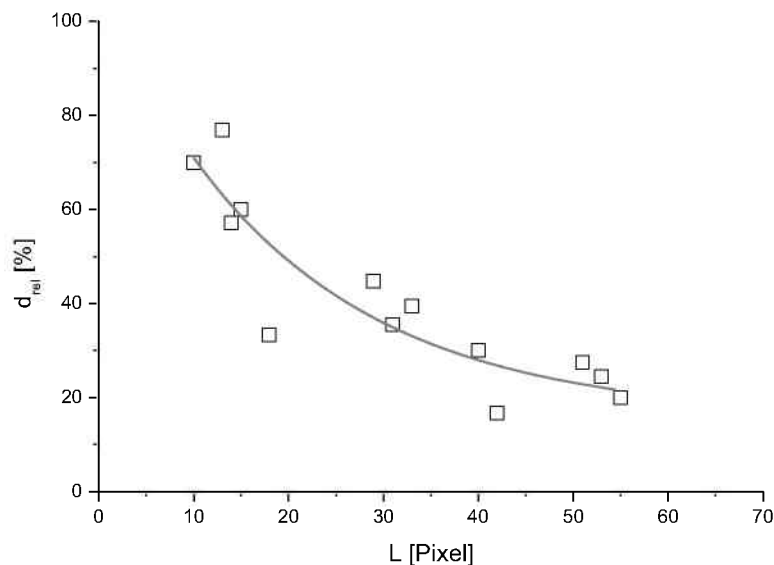


Abb. 47: Änderung der Objektmessungen infolge des Bloomingeffektes

Es ist ersichtlich, dass die relative Änderung der Kornabmessung d_{rel} mit zunehmender Messlänge L abnimmt. Dies kann durch die lokale Wirkung des Bloomingeffektes erklärt werden, welche zur Vergrößerung der Objektabmessung führt, indem der Randbereich breiter wird.

Eine weitere Auswirkung des Bloomingeffektes ist die Überbelichtung der gesamten Fläche von hellen Körnern, weshalb diese weiß erscheinen. Dies führt zu einem Informationsverlust für das Stereomaching-Verfahren, da innerhalb dieser Bereiche keine homologen Punkte vorhanden sind und in weiterer Folge keine Höheninformationen.

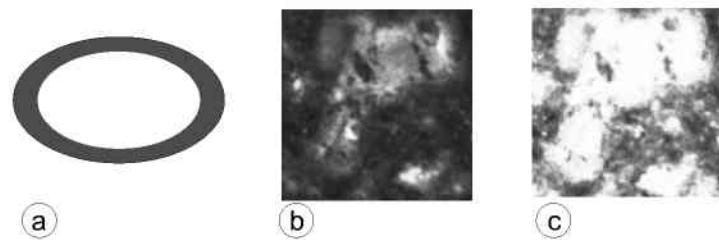


Abb. 48: Verschiedene Auswirkungen des Bloomingeffektes. Der graue Bereich in a) zeigt symbolisch die Vergrößerung des Randbereiches. In b) und c) wird die Auswirkung der Überbelichtung innerhalb einer hellen Fläche gezeigt

Die Wirkung des Bloomingeffektes in Form der absoluten Änderung von $L-L'$ ist eine Eigenschaft der eingesetzten Kamera.

4.9.2 Optimierung der Bildqualität

Zur Bilderstellung und Kontrolle der Bildqualität wird die in Abbildung 49 dargestellte Vorgehensweise eingesetzt. Mit diesem Vorgang wird das Ziel verfolgt, Bilder von Bruchoberflächen zu erstellen, deren Bildqualität unabhängig von deren optischen Eigenschaften ist [74].

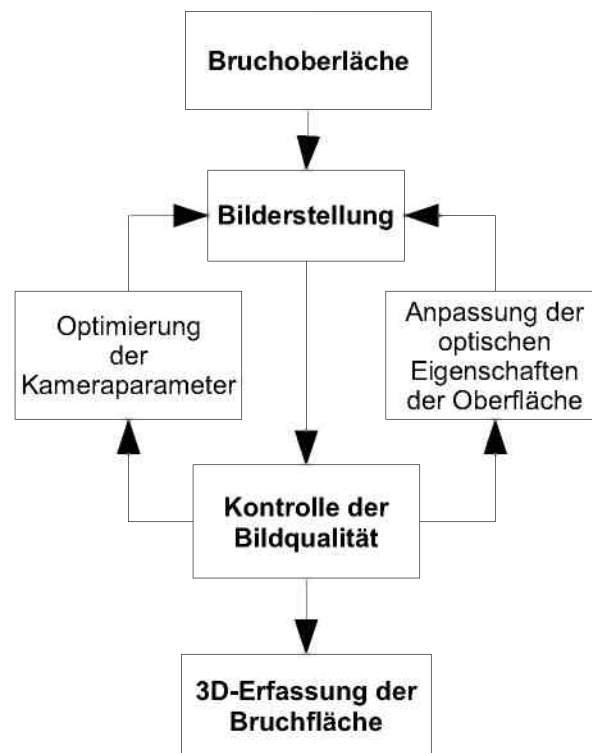


Abb. 49: Ablauf der Bilderstellung und Qualitätskontrolle

Eine Voraussetzung für vergleichbare fraktografische Analyseergebnisse ist eine gleichmäßige Qualität der Kippbilder. Das ist zur Festlegung der homologen Punkte erforderlich, die von der Stereo-Matching Software MeX 4.1 durchgeführt wird (siehe Kap. 3.4.4, S. 21) begründet. Die Kontrolle der Bildqualität besteht einerseits aus der Beurteilung des erstellten Bildes durch die ausführende Person. Andererseits wird die Bildqualitätsanalyse

mit der Software MeX 4.1 und der Software zur relativen Grauerthistogramm-Analyse durchgeführt (siehe Kap. 4.4.3.2, S. 34).

Folgende Maßnahmen werden zur Optimierung der Bildqualität eingesetzt:

- Veränderung der Kameraeinstellungen
- Bildtechnische Maßnahmen
- Anpassung der optischen Eigenschaften der Bruchoberfläche

Die Variation der Kameraeinstellungen ist eine Maßnahme, deren Anwendung den geringsten personellen und zeitlichen Aufwand benötigt.

Eine bildtechnische Maßnahme zur Verbesserung der Bildqualität ist die Überlagerung (Mittelung) von mehreren Bildern derselben Bruchoberfläche, die mit unterschiedlichen Belichtungszeiten erstellt wurden. Dafür wird die in Kapitel 4.4.3.3 (S. 35) beschriebene Software eingesetzt. Dieses Verfahren ist in der Fotografie sehr verbreitet und wird häufig zur Reduzierung des Bildrauschens aber auch zur Kontrasterhöhung angewandt [71 - 73].

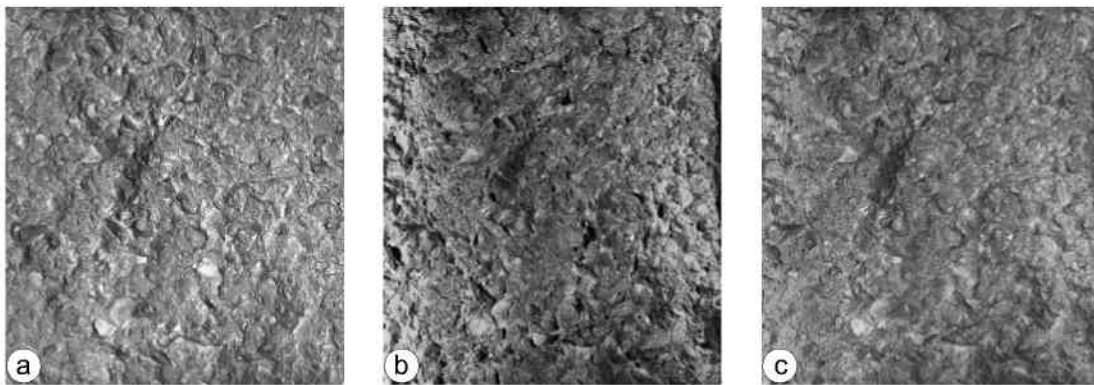


Abb. 50: Das Bild c) wurde aus den Bildern a) und b) gemittelt und zeigt die Verbesserung des Kontrastes durch die Mittelung von zwei Bildern

Die in Abbildung 51 dargestellten Histogramme zeigen die Auswirkung der Bildmittelung auf die Lage und Symmetrie der Kurve c) im Vergleich zu den Kurven a) und b). Weiters werden störende Extremwerte, die als lokale Peaks in den Histogrammen a) und b) erkennbar sind, eliminiert.

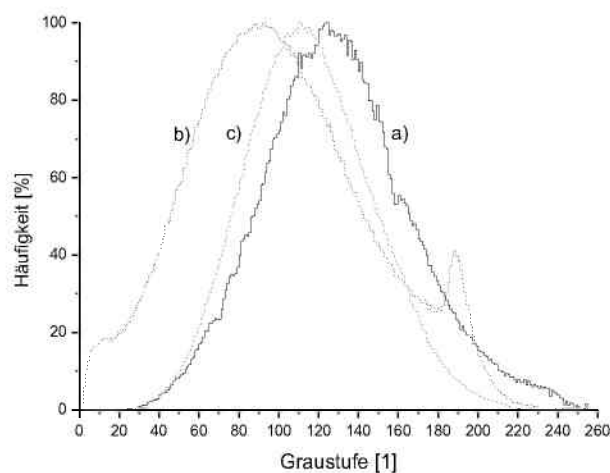


Abb. 51: Histogramme der Bilder a), b) und c) aus Abb. 43

Die Beschichtung von Bruchoberflächen wird angewendet, wenn die optischen Eigenschaften der Oberfläche für das stereoskopische Verfahren ungeeignet ist. Beispiele für ungeeignete optische Eigenschaften der Bruchoberflächen sind:

- monochrome Farben (z. B. Abb. 52a)
- durchsichtige oder reflektierende Körner (z. B. Abb. 45, S. 45)
- starke Helligkeitsunterschiede zwischen der Matrix und den Körnern (z. B. Abb. 56a, S.57 und Abb. 46a, S. 45)

Um bei ungeeigneten optischen Eigenschaften die optische Stereoskopie anwenden zu können, wurden die Bruchoberflächen mit der Airbrushtechnik beschichtet. Das Hauptkriterium bei der Auswahl der Airbrushfarben war die Größe der Farbpigmente, um eine Beeinflussung der Rauigkeit der Bruchoberfläche ausschließen zu können. Deshalb wurden Farben ausgewählt, deren Schichtdicke und Abmessung der Farbpartikel kleiner sind, als die laterale Auflösung des optischen stereoskopischen Verfahrens.

Es wurden Pigmentfarben der Firma Schmincke & Co.-GmbH [84] ausgewählt. Verwendet wurden die Farben „Supra weiß“ mit dem Pigment Titanoxid und „Schwarz“ mit dem Pigment Ruß. Die Korngrößenanalyse der Farben ist in Tabelle 10 angeführt [84].

| Farbe | Korngröße [μm] | |
|-------|-----------------------------|---------|
| | Supra weiß | Schwarz |
| D 10 | 0,41 | 0,01 |
| D 50 | 1,38 | 0,06 |
| D 90 | 3,11 | 0,25 |

Tab. 10: Korngrößenklassen der Partikel der Airbrushfarben entsprechend der Herstellerangaben. D 10, D 50, und D 90 bezeichnen die Korngröße bei 10%, 50% und 90% der Masse kleiner sind [84]. Die Analysen des Herstellers sind in der Abbildungen 82 und 83 auf Seite 85 dargestellt.

Weiters erfolgte eine exemplarische Vermessung der Partikelgröße mit einem Mikroskop. Dabei wurde die Farbe auf den Mikroskopträger in Form einer dünnen Schicht aufgebracht (siehe Abb. 84, S. 86). Es wurden die größte Abmessungen der Partikel vermessen, weil diese die Rauigkeit hauptsächlich beeinflusst. Die Vermessung erfolgte mit der Software des Mikroskopherstellers.

| Farbe | Supra weiß | Schwarz |
|------------------------------|------------|---------|
| Mittelwert [μm] | 1,48 | 1,50 |
| σ [μm] | 0,48 | 0,96 |

Tab. 11: Ergebnisse der Vermessung der mittleren Pigmentquerschnitte der Airbrushfarben mit dem Mikroskop. σ ist die Standardabweichung

Die gemessenen Werte liegen unter der Auflösung der optischen Stereoskopie von 100 μm . Bei Betrachtung des Mikroskopiebildes der Farbe „Schwarz“ (siehe Abb. 84b, S. 86) wird eine Agglomeration der Rußpartikel sichtbar, was die Ursache für die hohe Standardabweichung der Farbe darstellt.

Für diese Arbeit wurde eine spezielle Schichtungstechnik entwickelt, die drei Schritte umfasst. Zuerst wird die Bruchoberfläche mit einem Tiefengrund behandelt, damit die Aufnahme der Farbe gleichmäßig erfolgt. Nach einer Trocknungszeit wird die weiße Farbe als Grundschicht aufgebracht. Dann wird Sprühdüse des Airbrusch-Gerätes so einge-

stellt, dass die Farbe in Form von kleinen Tropfen abgegeben wird. Zuletzt erfolgt das Aufsprühen der schwarzen Farbe rundum auf die Bruchoberfläche.

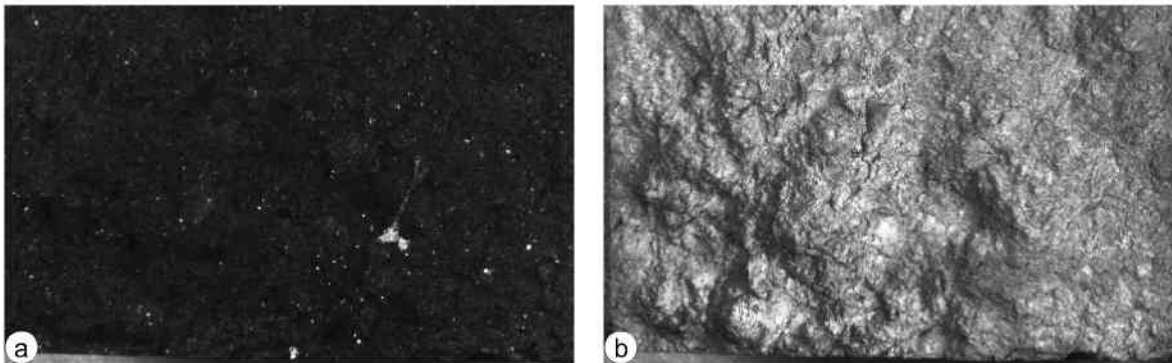


Abb. 52: Gegenüberstellung der originalen a) und der beschichteten Oberfläche b)

In Abbildung 52 ist ein Bild der originalen und der beschichteten Oberfläche dargestellt. Die unbeschichtete Oberfläche (Abb. 52a) ist monoton schwarz und weist reflektierende Stellen auf. Dieses Bild kann für das Stereomaching-Verfahren nicht verwendet werden.

Durch eine Beschichtung (Abb. 52b) können die optischen Eigenschaften optimiert werden. Dies ist durch den Vergleich der Bilder erkennbar und wird durch die Gegenüberstellung der Histogramme beider Bilder bestätigt (Abb. 53).

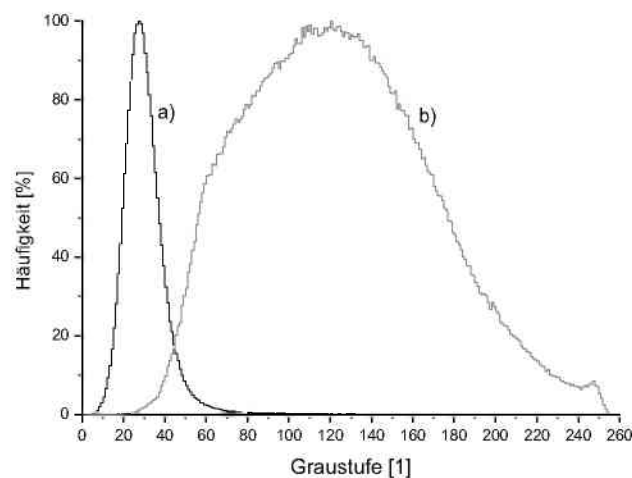


Abb. 53: Histogramme der Oberflächen aus den Abbildungen 52a und b

4.10 ARIMA-Modellanalyse an Profilen

Zur Überprüfung, ob die Anwendung der Autokorrelationsfunktion an Höhenprofilen gerechtfertigt ist, wird eine ARIMA-Modell-Analyse durchgeführt.

ARIMA-Modelle [42, 43] bestehen aus:

- dem autoregressiven Prozess (AR),
- dem integrierenden Prozess (I) und dem
- Moving-Average Prozess (MA).

Die Durchführung der ARIMA-Analyse erfolgt nach den Arbeiten von Box und Jenkins [42]. Die Vorgehensweise ist in die Modellidentifikation, Parameterschätzung und Modellverifikation (siehe Abb. 54) untergliedert.

Die Komponenten des ARIMA-Modells:

Der Parameter p des Autoregressionsmodells $AR(p)$ versucht die Zeitreihe anhand einer Autokorrelationsstruktur durch Autoregression darzustellen. In Gleichung (40) wird der Messwert Y zum Zeitpunkt t anhand von p Abhängigkeiten (Lags) vorhergesagt.

$$Y_t = \phi_0 + \phi_1 \cdot Y_{t-1} + \phi_2 \cdot Y_{t-2} + \dots + \phi_p \cdot Y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (40)$$

Es stellt ϕ_p das Regressionsgewicht oder die Enge des Zusammenhangs für den Lag p dar. ε_t ist das weiße Rauschen zum Zeitpunkt t .

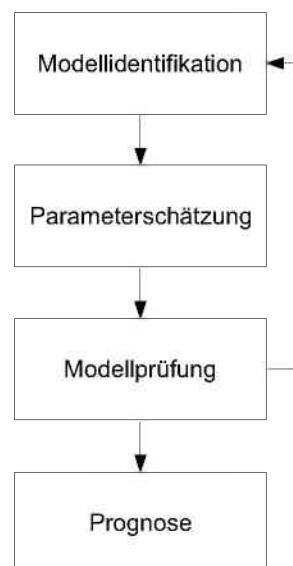


Abb. 54: Die Phasen des Box/Jenkins Ansatzes [42]

Da das $AR(p)$ Modell Abhängigkeiten zwischen den Messwerten nicht berücksichtigt, wird das Gleitmittelmodell $MA(q)$ als zweite Komponente eingesetzt. Es verwendet ein Regressionsmodell mit dem Gewicht θ_q , um den Messwert zum Zeitpunkt t vorherzusagen.

$$Y_t = \theta_0 + \theta_1 \cdot \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \cdot \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \cdot \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t \quad (41)$$

Beim $MA(q)$ -Modell hängt der Messwert Y vom vorangegangenen Fehler ε ab, es beschreibt also die Abhängigkeiten der aufeinander folgenden Fehler.

Da die Zeitreihenanalyse Stationarität voraussetzt und dies bei den meisten Zeit- und Datenreihen nicht der Fall ist, wird die $I(d)$ Komponente eingesetzt. Diese Komponente stellt einen Differenzenfilter dar, welcher nach d Differenzierungen die geforderte Stationarität herstellt. In Gleichung (42) ist ein Differenzenfilter erster Ordnung ($d=1$) dargestellt.

$$\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1} \quad t=1, \dots, N-1 \quad (42)$$

Beispiele für instationäre Zeitreihen sind in den Abbildungen 1, 4 und 38 (siehe S. 4, 6 und 39) dargestellt.

5 Untersuchungsergebnisse

Für die fraktografischen Untersuchungen wurde die optische Stereoskopie mit einer Auflösung von 98 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ und einem Kippwinkel 2α von 10° angewandt. Alle Untersuchungen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt.

5.1 Ergebnisse der ARIMA Modellanalyse

Es wurden Zeitreihen-Analysen mit der Software Statgraphics© [49] an einzelnen ungefilterten Profilen der Probenreihen A, B und C durchgeführt. Bei der Modellanalyse bestimmt Statgraphics© die Abweichungen der verschiedenen Modellreihen von einer realen Datenreihe. Diese Abweichung wird anhand von verschiedenen Typen von Modellfehlern klassifiziert. Das Zeitreihenmodell das im Fehlerranking die geringsten Fehlerwerte aufweist, wird als das am Besten geeignete Modell vorgeschlagen [75]. Die Modellidentifikation ergab bei allen drei Probenreihen ein ARIMA(p,d,q)-Modell. Bei der Probe A ergab dies ein ARIMA(1,0,1)-Modell (siehe Abb. 85, S. 87). Die Analyse an den Profilen der Serien B und C ergab ein ARIMA(2,0,2)-Modell (siehe Abb. 86 und 87, S. 88 und 89). Dadurch konnte gezeigt werden, dass die Anwendung der Autokorrelationsfunktion an Profilen der Bruchoberflächen gerechtfertigt ist.

5.2 Untersuchung der Reproduzierbarkeit des stereoskopischen Verfahrens anhand der lateralen Korrelationslänge

Das Ziel dieser Untersuchung war, systematische Einflüsse auf die fraktografische Analyse, welche die durch die Anwendung des stereoskopischen Verfahrens entstehen, zu bestimmen. Folgende Faktoren beeinflussen das 3D-Modell der Bruchoberfläche:

- Durchführung der optischen Stereoskopie
- Bildqualität der Kippbilder
- Anwendung der Stereomatchingsoftware MeX 4.1

Bei den nachfolgenden Tests wurden die Kameraeinstellungen, die Einstellungen der Optik, die Beleuchtung sowie die untersuchte Bruchfläche nicht verändert. Als Bruchoberfläche diente eine unbeschichtete Bruchoberfläche der Probenreihe B.

Test zur Wiederholbarkeit der Rekonstruktion der Oberfläche:

Mit diesem Test wurde die Wiederholbarkeit des stereoskopischen Verfahrens überprüft. Als Probe wurde ein einzelnes Kippbildpaar verwendet, an dem alle Messungen durchgeführt wurden.

Bei der Durchführung der 3D-Rekonstruktion mit der Software MeX 4.1 muss ein rechteckiger Bereich ausgewählt werden, der den Bereich der Berechnung der 3D-Daten der Oberfläche definiert (siehe Abb. 88, S. 90). Die Festlegung des Auswahlrechteckes erfolgt stets manuell und kann nicht dauerhaft fixiert werden.

Um die Position des Auswahlrechteckes möglichst exakt zu definieren, wurden für diesen Test die diagonalen Eckpunkte des Rechtecks in einem Kippbild digital markiert (Abb. 55). Diese Orientierungspunkte haben einen Durchmesser von 20 Pixel, in dessen Mittelpunkt ein Eckpunkt des Auswahlrechteckes positioniert wird. Dadurch kann die Übereinstimmung beider Punkte maximal um den Wert von ± 10 Pixel um den Mittelpunkt des Orientierungspunktes schwanken. Da die Festlegung des Auswahlrechteckes über die Dia-

gonale erfolgt, kann eine Seitenlänge des Rechtecks eine Fehler von ± 20 Pixel aufweisen.

Es wurden sechs Einzelmessungen durchgeführt, die einen Mittelwert für ξ von 0,4 mm mit einem Variationskoeffizienten von 0,81 % ergaben (Tab. 12). Aufgrund des geringen Wertes des Variationskoeffizienten kann gezeigt werden, dass einerseits der Auswahlfehler gering ist und andererseits die mit der Stereomatchingsoftware MeX 4.1 berechneten 3D-Daten eine geringe Streuung aufweisen.

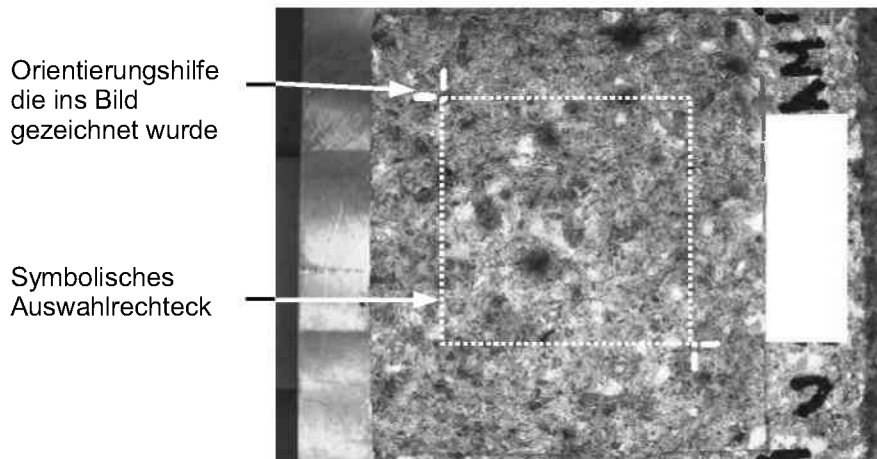


Abb. 55: Markierung der Position des Auswahlrechtecks für die 3D-Rekonstruktion mit MeX 4.1

| Kippbildpaar Nr. | ξ [mm] |
|-------------------|--------------|
| 1 | 0,399 |
| 2 | 0,397 |
| 3 | 0,400 |
| 4 | 0,405 |
| 5 | 0,401 |
| 6 | 0,396 |
| Mittelwert | 0,400 |
| v [%] | 0,81 |

Tab. 12: Einzeldaten des Wiederholbarkeitstests an einem Kippbild, mit Darstellung des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten v

Test zur Überprüfung der stereoskopischen Bilderstellung:

Beim zweiten Test wurden drei Kippbildpaare bei unveränderter Probenposition ohne Probenausbau aufgenommen. Die Auswahl der Position und Abmessung des Auswahlrechtecks wurde mit dem Augenmaß so ident wie möglich gewählt.

Die mittlere laterale Korrelationslänge beträgt 0,423 mm und weist einen Variationskoeffizienten von 1,2 % auf (Tab. 13).

Der Wert des Variationskoeffizienten von 1,2 % ist im Vergleich zum ersten Test (0,81 %) um 0,39 % höher. Die Erhöhung des Variationskoeffizienten um 0,39 % kann großteils auf die nicht exakt definierte Auswahlposition des Auswahlrechteckes in den drei Kippbildpaaren zurückgeführt werden.

| Kippbildpaar Nr. | ξ [mm] |
|-------------------|--------------|
| 1 | 0,417 |
| 2 | 0,427 |
| 3 | 0,424 |
| Mittelwert | 0,423 |
| v [%] | 1,2 |

Tab. 13: Einzeldaten des Wiederholbarkeitstests bei unveränderter Probenposition, mit Darstellung des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten v

Test mit wiederholten Ein- und Ausbau der Probe in der Kippvorrichtung:

Bei diesem Test erfolgte die Bilderstellung nach dem Aus- und Einbau der Probe in die Kippvorrichtung. Dadurch konnte der Einfluss der Probenposition überprüft werden. Das Auswahlrechteck wurde manuell an der selben Stelle positioniert.

Das Ergebnis ist der Mittelwert von sechs Einzeltests. Es ergab sich eine laterale Korrelationslänge von 0,414 mm mit einem Variationskoeffizienten von 2,1 % (Tab. 14).

| Kippbildpaar Nr. | ξ [mm] |
|-------------------|--------------|
| 1 | 0,401 |
| 2 | 0,422 |
| 3 | 0,422 |
| 4 | 0,412 |
| 5 | 0,409 |
| 6 | 0,420 |
| Mittelwert | 0,414 |
| v [%] | 2,1 |

Tab. 14: Einzeldaten des Wiederholbarkeitstests bei veränderter Probenposition, mit Darstellung des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten v

Der Variationskoeffizient weist im Vergleich zum zweiten Test eine Erhöhung um 0,9 % auf. Diese Steigerung des Wertes kann größtenteils auf die Veränderung der Probenposition in der Vorrichtung zurückgeführt werden.

Resümee:

Die Ergebnisse der Tests haben gezeigt, dass für die nachfolgenden Untersuchungen ein Fehler von 2,1 % bei der Bestimmung der lateralen Korrelationslänge angenommen werden kann.

5.3 Ergebnisse der fraktografischen Untersuchungen

5.3.1 Feuerfeststeine

5.3.1.1 Untersuchungen an basischen Steinen mit unterschiedlicher Sprödigkeit

Diese Untersuchungen erfolgten ohne Beschichtung der Oberflächen und umfassten zwei Abschnitte. Im Ersten wurde die Anwendung der optischen Stereoskopie und die Analyse der erhaltenen 3D-Daten erprobt. Im zweiten Teil erfolgte die Überprüfung der Ergebnisse und eine Erweiterung des Probenumfangs.

Untersuchungen zur Erprobung der fraktografischen Analyse:

Das Ziel der ersten Teiluntersuchung war, die Anwendung der optischen stereoskopischen Methode an Bruchoberflächen von basischen Feuerfestbaustoffe zu erproben und einen Kenntnistand zur Anwendung des Verfahrens aufzubauen. Ein weiterer Aspekt war der Vergleich der fraktografischen Analysen beider Bruchoberflächen der Keilspaltprobekörper.

Die Ergebnisse der bruchmechanischen Untersuchungen sind in Tabelle 15 dargestellt. Anhand der Zunahme der charakteristischen Länge l_{ch} wird die Abnahme der Sprödigkeit von A nach C verdeutlicht. Die Daten der einzelnen Probekörper befinden sich im Anhang in den Tabellen 24 bis 26, auf den Seiten 91 bis 92.

| Proben- serie | Proben- anzahl | | E [GPa] | G _f [N·m ⁻¹] | σ _{NT} [MPa] | F _{H max} [N] | l _{ch} [mm] |
|------------------|-------------------|------------|------------|--|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
| A | 14 | Mittelwert | 107,0 | 115,3 | 12,17 | 5928 | 85,6 |
| | | v [%] | - | 9,8 | 9,3 | 7,4 | 22,9 |
| B | 15 | Mittelwert | 73,8 | 129,6 | 7,33 | 3368 | 180,6 |
| | | v [%] | - | 9,0 | 8,1 | 9,5 | 16,2 |
| C | 10 | Mittelwert | 28,2 | 244,5 | 3,41 | 1713 | 608,7 |
| | | v [%] | 6,9 | 8,3 | 10,3 | 9,6 | 22,3 |

Tab. 15: Bruchmechanische Kennwerte der untersuchten Feuerfeststeine

Die fraktografische Analyse der Bruchoberflächen der Keilspaltprobekörper erfolgte anhand der lateralen Korrelationslänge ξ . ξ_1 , ξ_2 stellen die Analyseergebnisse der Bruchhälften eines Keilspaltkörpers dar. Die relative Abweichung $\Delta\xi_{rel}$ wurde folgendermaßen definiert.

$$\Delta\xi_{rel} = \frac{|\xi_1 - \xi_2|}{\xi} \cdot 100\% \quad \text{mit} \quad \xi = \frac{\xi_1 + \xi_2}{2} \quad (43)$$

Die Probenserien A, B und C können anhand der lateralen Korrelationslängen ξ eindeutig voneinander unterschieden werden. Die detaillierten Ergebnisse sind in Tabelle 26 (siehe Anhang S. 92) dargestellt.

| Probenserie | A | B | C |
|-----------------------|-------|------|-------|
| ξ [mm] | 0,12 | 0,37 | 0,54 |
| v_{ξ} [%] | 24,35 | 8,38 | 12,33 |
| $\Delta\xi_{rel}$ [%] | 9,23 | 6,8 | 8,54 |

Tab. 16: Die gemittelten lateralen Korrelationslängen der Probenserien A, B und C

Die Variationskoeffizienten v_{ξ} von ξ weisen bei den Probenserien A und C die höchsten Werte auf. Bei A kann dies auf die optischen Eigenschaften der Bruchoberfläche zurückgeführt werden (siehe Abb. 56a), welche monochrome Farben (Dunkelgrau) und reflektierende Körner aufweist. Aufgrund dessen wurden lange Belichtungszeiten im Vergleich zu den Bruchflächen der Proben B und C benötigt, um eine ausreichende Bildqualität für das Stereomatching-Verfahren zu erhalten. Dies führt zu Schwankungen in den daraus berechneten 3D-Daten und der fraktografischen Analyse.

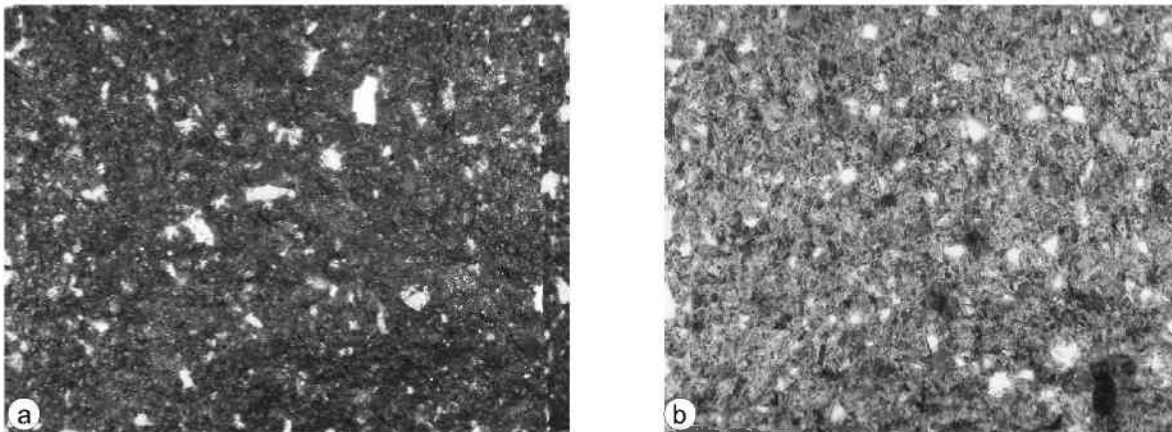


Abb. 56: Bilder von Bruchflächen der Probenserie A (a) und der Probenserie B (b)

Im Gegensatz zu A sind die Oberflächen der Probenserien B und C aufgrund der Texturierung und der Kontrastunterschiede gut zur Anwendung des Stereomatching-Verfahrens geeignet.

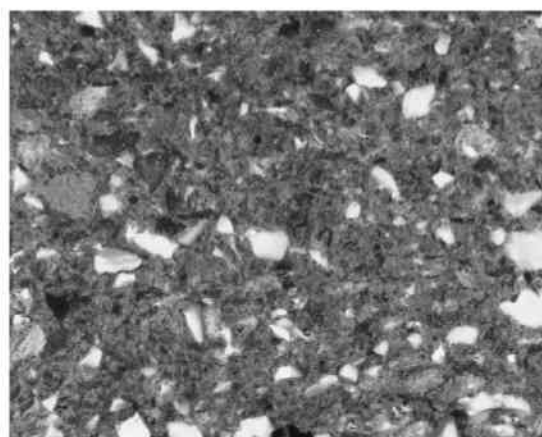


Abb. 57: Bild einer Bruchoberfläche der Probenserie C

Die Unterschiede in der Verteilung der Werte der lateralen Korrelationslängen ξ wird durch die Darstellung mit einem Box-Whiskers-Diagramm verdeutlicht (siehe Abb. 58).

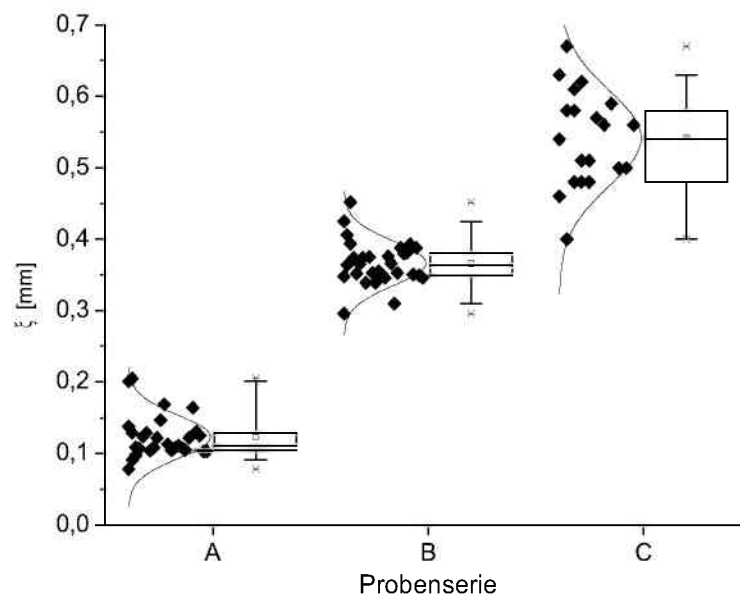


Abb. 58: Box-Whiskers Diagramm der lateralen Korrelationslängen der Bruchhälften

Die mittlere Abweichung $\Delta\xi_{rel}$ der lateralen Korrelationslängen ξ_1 , ξ_2 der Bruchflächen der Keilspaltproben sind in Tabelle 16 (S. 57) dargestellt. Bei der Probenserie A beträgt der Wert 9,23 %, bei B 6,8 % und bei C 8,54 %. Diese Abweichungen werden durch verschiedene Ursachen bedingt:

- ein Anteil ist im Wiederholbarkeitsfehler der Stereoskopie begründet (siehe Kap. 5.2)
- während des Bruchmechanischen Tests brechen Körnern von der Bruchoberfläche weg

Die deutliche Unterscheidung der lateralen Korrelationslängen der Probenserien A, B und C weist auf einen Zusammenhang der fraktografischen Parameter mit den bruchmechanischen Kennwerten hin (siehe Tab. 15 und 16).

Um diesen Zusammenhang näher zu untersuchen wurde eine Korrelationstabelle erstellt (siehe Tab. 17). In dieser werden die bruchmechanischen und die fraktografischen Parameter einander gegenübergestellt (Tab. 17). Die dieser Berechnung zugrunde liegenden Daten befinden sich im Anhang in den Tabellen 24 bis 26 (S. 91 bis 92).

| | G_f [N·m ⁻¹] | E [GPa] | σ_{NT} [MPa] | F_{Hmax} [N] | l_{ch} [mm] | $\rho_{geom.}$ [g/cm ³] | ξ [mm] |
|-------------------------------------|-------------------------------|------------|------------------------|-------------------|------------------|--|---------------|
| G_f [N·m ⁻¹] | 1 | | | | | | |
| E [GPa] | -0,89 | 1 | | | | | |
| σ_{NT} [MPa] | -0,85 | 0,97 | 1 | | | | |
| F_{Hmax} [N] | 0,78 | -0,66 | -0,52 | 1 | | | |
| l_{ch} [mm] | 0,85 | -0,87 | -0,87 | 0,54 | 1 | | |
| $\rho_{geom.}$ [g/cm ³] | -0,91 | 1,00 | 0,97 | -0,7 | -0,89 | 1 | |
| ξ [mm] | 0,87 | -0,96 | -0,94 | 0,63 | 0,84 | -0,96 | 1 |

Tab. 17: Korrelationstabelle der bruchmechanischen und fraktografischen Parameter; die Tabelle enthält den Korrelationskoeffizienten [85]

Um die Zusammenhänge zu zeigen wurden die lateralen Korrelationslängen ξ und die charakteristischen Längen l_{ch} in einem Diagramm gegenübergestellt (Abb. 59), die Parameter weisen einen nichtlinearen Zusammenhang auf.

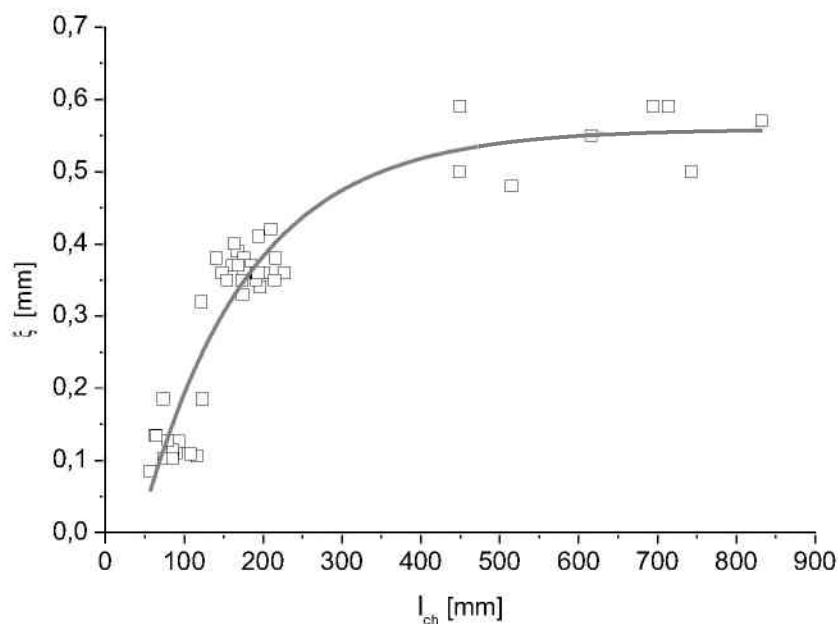


Abb. 59: Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der charakteristische Länge l_{ch}

Die spezifische Bruchenergie G_f wurde zur vollständigen Darstellung der in Kapitel 4.5.1 (S. 36) angeführten bruchmechanischen Parameter der lateralen Korrelationslänge ξ gegenübergestellt (siehe Abb. 60). Die Parameter G_f und ξ weisen einen nichtlinearen Zusammenhang auf. G_f wird in den folgenden Gegenüberstellungen nicht verwendet. Weil die charakteristische Länge l_{ch} entsprechend ihrer Definition [54] in Zusammenhang mit der Sprödigkeit des untersuchten Feuerfeststeins steht.

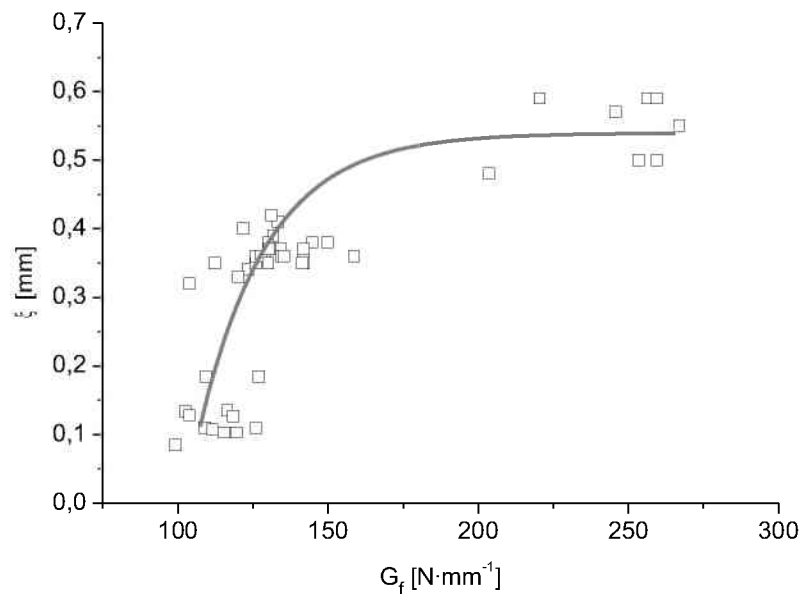


Abb. 60: Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der spezifischen Bruchenergie G_f

Die Gegenüberstellung der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT} und der lateralen Korrelationslänge ξ (siehe Abb. 61) weist einen linearen Zusammenhang auf.

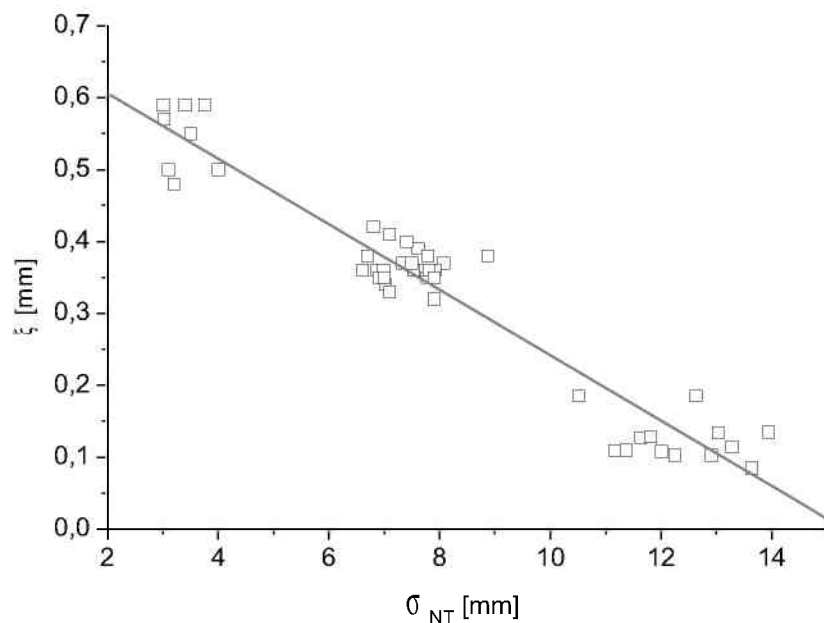


Abb. 61: Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT}

Weitere Untersuchungen an zusätzlichen Proben der Serien A bis C:

Diese Untersuchungen erfolgten an den basischen Feuerfestbaustoffen der Probenserien A, B und C. Es wurde das Ziel verfolgt neue Proben zu untersuchen und die Rauigkeitsparameter R_s , $P_{\Delta q}$ und D_s der Oberflächen zu ermitteln.

| Proben- serie | Proben- anzahl | | E [GPa] | G _f [N·m ⁻¹] | σ _{NT} [MPa] | F _{H max} [N] | l _{ch} [mm] | ξ [mm] |
|------------------|-------------------|------------|------------|--|--------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------|
| A | 13 | Mittelwert | 107,0 | 117,0 | 12,3 | 5967 | 85,5 | 0,13 |
| | | v [%] | - | 9,7 | 9,7 | 8,0 | 23,2 | 30,7 |
| B | 17 | Mittelwert | 75,0 | 135,6 | 7,5 | 3617 | 182,8 | 0,31 |
| | | v [%] | 4,3 | 9,7 | 7,5 | 8,6 | 14,4 | 7,0 |
| C | 18 | Mittelwert | 28,7 | 235,4 | 3,4 | 1692 | 637,0 | 0,50 |
| | | v [%] | 6,8 | 11,1 | 15,4 | 16,2 | 41,5 | 8,1 |

Tab. 18: Bruchmechanische und fraktografische Kennwerte

Die Ergebnisse der fraktografischen Analyse der Bruchoberflächen der Probenreihen A bis C sind in Tabelle 18 dargestellt. Die Details der bruchmechanischen und fraktografischen Kennwerte befinden sich in den Tabellen 27 bis 29 (S. 92 bis 93). Die Mittelwerte der Probenreihen weichen nur gering von den Werten der ersten Teiluntersuchung ab (siehe Tab. 15, S. 56), dies gilt auch für die Variationskoeffizienten der Serien B und C. Der Wert der Probenreihe A liegt im Vergleich zum ersten Teil um 6,35 % höher, dieser Umstand kann auf die optischen Eigenschaften der Bruchoberflächen zurückgeführt werden.

Beim Vergleich der Analyseergebnisse im Box-Whiskers-Diagramm der ersten Untersuchungen (siehe Abb. 58, S. 58) mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen (siehe Abb. 62) wird die Reduktion der Streuung der lateralen Korrelationslänge bei der Probenreihe C sowie die beiden Ausreißer in der Probenreihe A erkennbar.

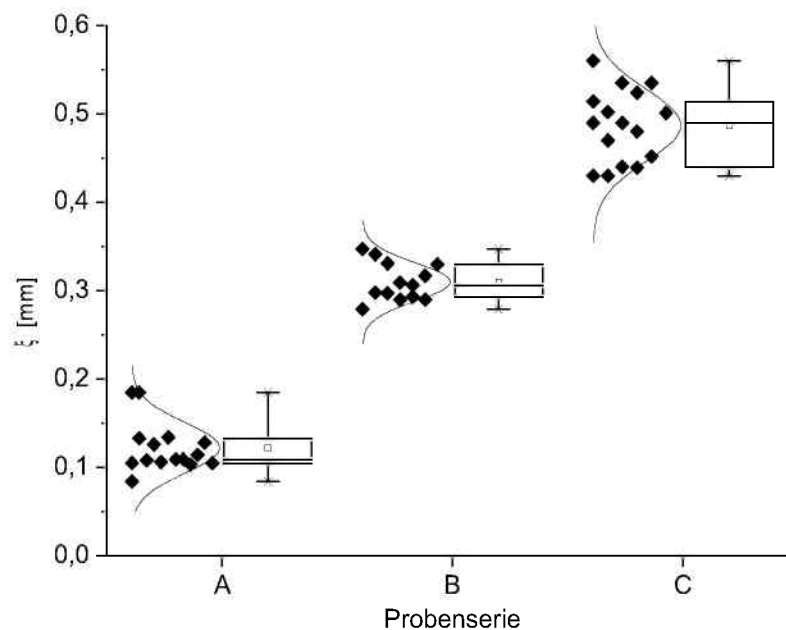


Abb. 62: Box-Whiskers Diagramm der lateralen Korrelationslängen

Die Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der charakteristischen Länge l_{ch} in Form einer grafischen Darstellung (siehe Abb. 63) ergab in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der ersten Teiluntersuchungen (Abb. 59, S. 59) eine nichtlineare Korrelation.

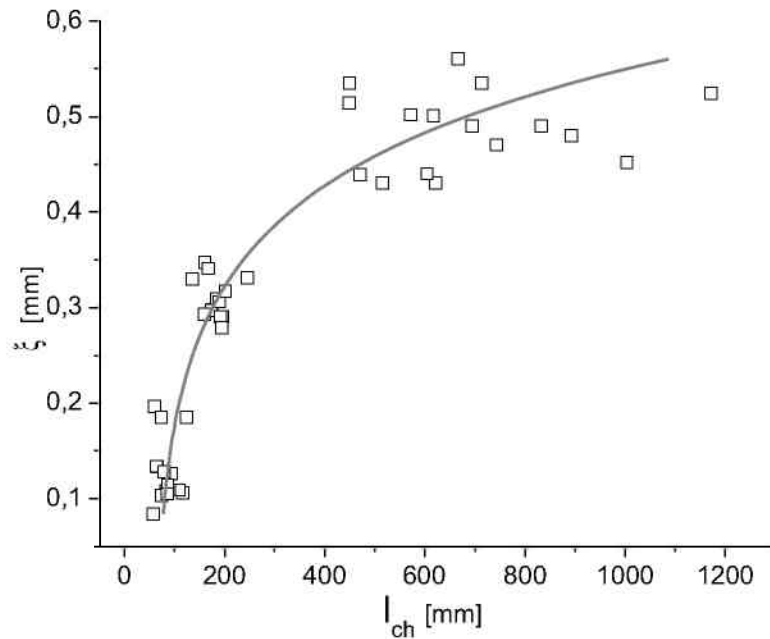


Abb. 63: Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der charakteristischen Länge l_{ch}

Bei der Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ mit der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT} konnte ein linearer Zusammenhang festgestellt werden (Abb. 64).

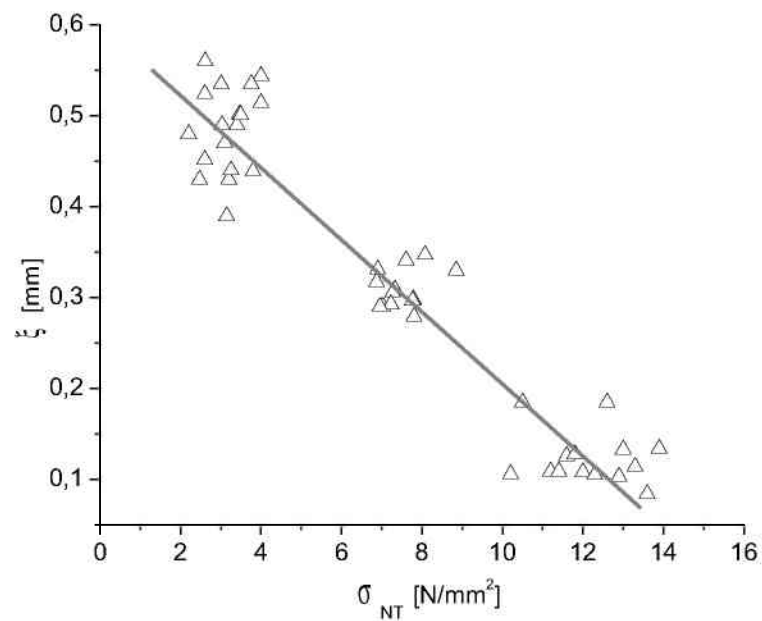


Abb. 64: Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT}

Aufgrund der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zeigt sich, dass die gewählten Verfahren zur fraktografischen Analyse an den basischen Feuerfestprodukten anwendbar sind.

Rauigkeitsanalysen:

Die Rauigkeitsanalysen erfolgten an den 3D-Daten der Bruchoberflächen der basischen Feuerfestprodukte der Proben A, B und C, die bruchmechanischen Daten sind in Tabelle 18 (S. 61) dargestellt. Die Gegenüberstellung der Rauigkeitsparameter R_s , $P_{\Delta q}$ nach EN 4287 und der fraktalen Dimension D_s mit der charakteristischen Länge l_{ch} und der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT} weist keine Korrelation auf (siehe Abb. 65 und 66).

Bei der Probenserie A deutet sich eine Verringerung der Rauigkeitsparameter R_s , $P_{\Delta q}$ und D_s mit Erhöhung der charakteristischen Länge l_{ch} an, bei B ist ein gegenläufiger Trend erkennbar (Abb. 65). Beides wurde jedoch nicht näher untersucht.

Die Unabhängigkeit der Rauigkeitsparameter R_s , $P_{\Delta q}$ und D_s von den bruchmechanischen Parametern l_{ch} und σ_{NT} kann entsprechen den Beobachtungen von A. Carpinteri [6, 8, 9] auf die bei der 3D-Erfassung verwendete optischen Vergrößerung zurückgeführt werden. Er beschreibt dies mit dem „Multi Scaling Law“ (siehe Kap. 3.2, S. 7), welches die Annäherung der fraktalen Dimension D bei Reduktion des Beobachtungsmaßstabes, an einen konstanten Wert zeigt.

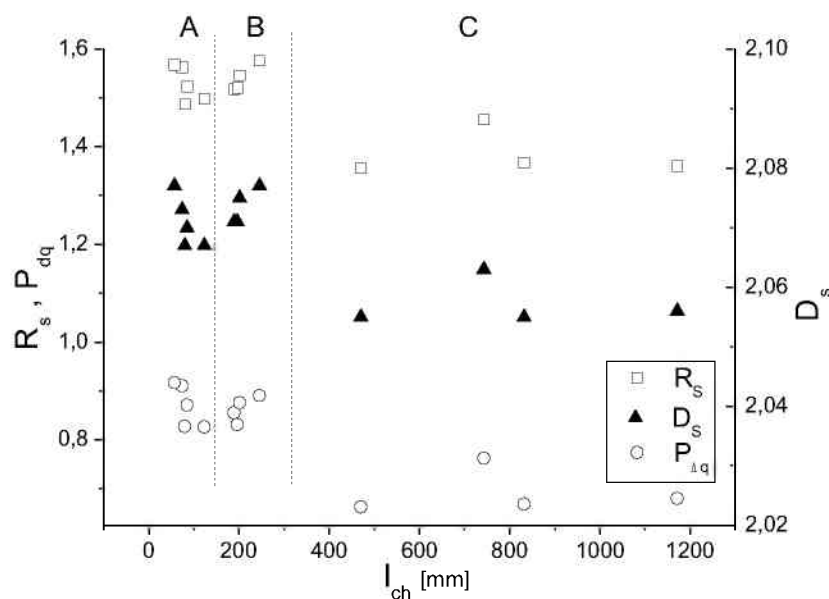


Abb. 65: Gegenüberstellung der fraktalen Dimension D_s , des Rauigkeitsparameters $P_{\Delta q}$ und dem Verhältnis der wahren zur projizierten Fläche R_s und der charakteristischen Länge l_{ch}

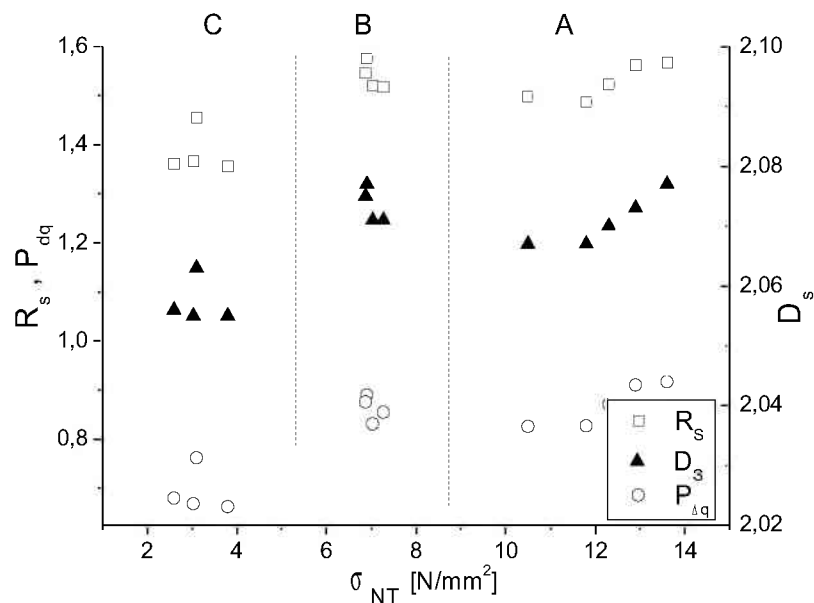


Abb. 66: Gegenüberstellung der fraktalen Dimension D_s , des Rauigkeitsparameters $P_{\Delta q}$ und dem Verhältnis der wahren zur projizierten Fläche R_s und der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT}

Zusammenfassende Auswertung beider Versuchsserien:

In Abbildung 67 ist die Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der charakteristischen Länge l_{ch} dargestellt, die Einzeldaten beider Teiluntersuchungen (Abb. 59 und 63, S. 59 und 62) stimmen sehr gut überein.

Eine Übereinstimmung der Ergebnisse der beiden Untersuchungen kann ebenfalls bei der Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT} beobachtet werden (siehe Abb. 68, S. 65).

Bei der Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge mit $\sigma_{NT}^2 \cdot E^{-1}$ wurde ein nicht-linearer Zusammenhang festgestellt (Abbildung 69, S. 66). $\sigma_{NT}^2 \cdot E^{-1}$ ist proportional zur Energiefreisetzungsrate G_C , die während der Rissinitierung auftritt [54].

Es konnte gezeigt werden, dass die laterale Korrelationslänge ein reproduzierbarer Kennwert der Bruchoberfläche ist, der von den bruchmechanischen Eigenschaften der untersuchten Produkte abhängt.

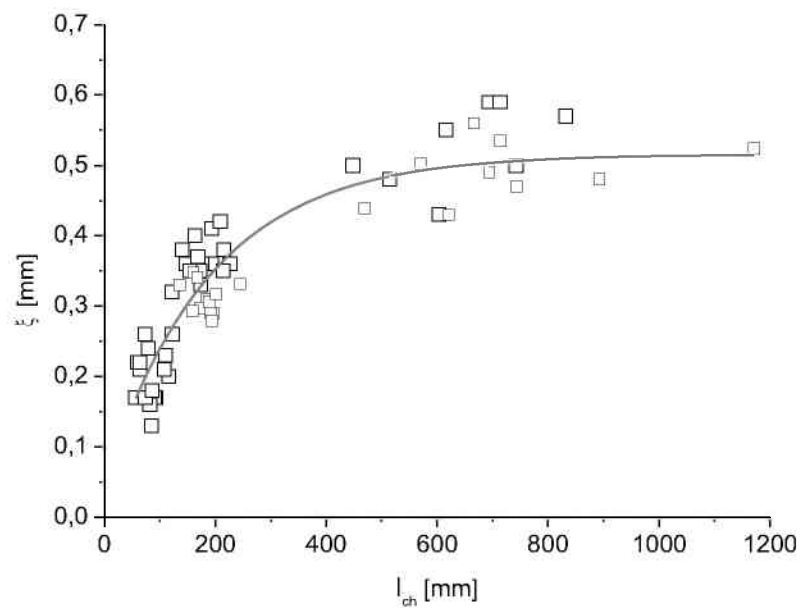


Abb. 67: Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der charakteristische Länge l_{ch}

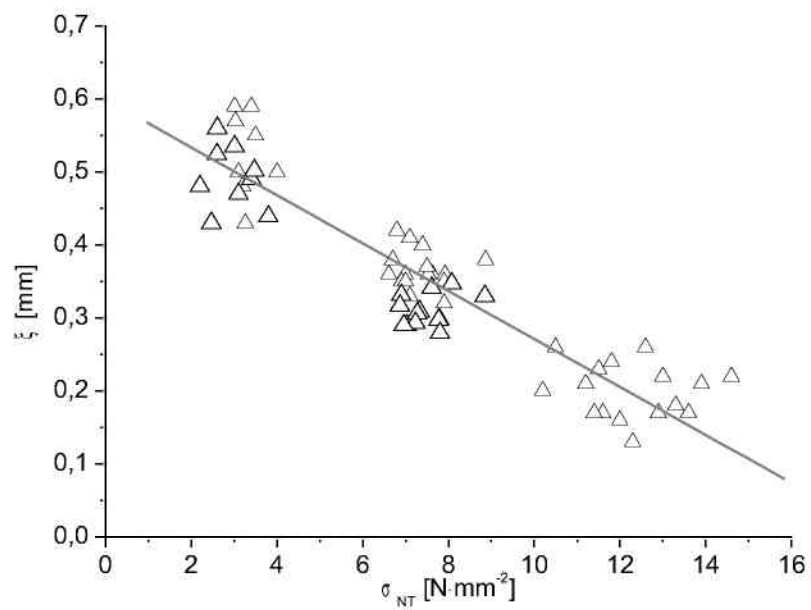


Abb. 68: Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT}

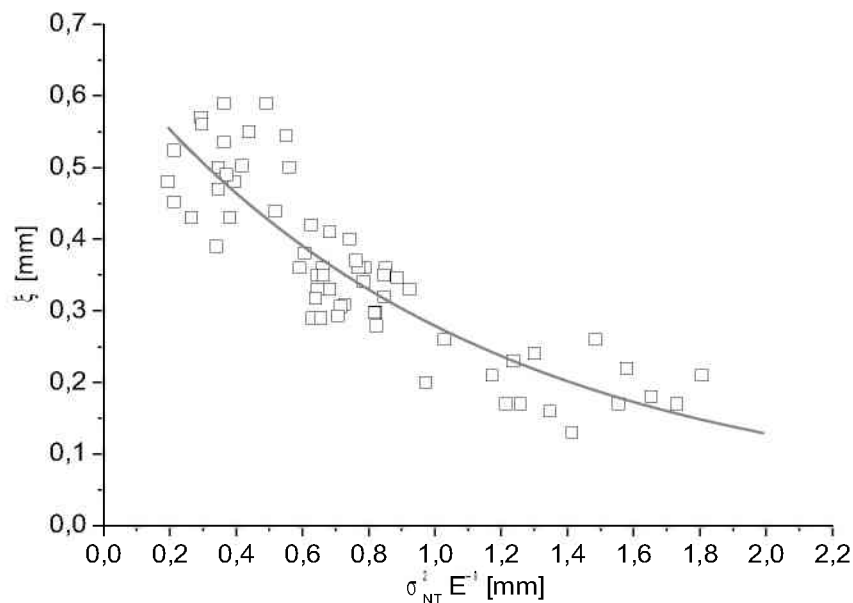


Abb. 69: Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und $\sigma_{NT}^2 \cdot E^{-1}$

5.3.1.2 Untersuchungen an basischen Feuerfestbaustoffen mit unterschiedlichem Bindungstyp

Diese Untersuchungen hatten das Ziel, die bei den Proben A bis C gewonnenen Erkenntnisse zu vertiefen und die Anwendung des fraktografischen Analyseverfahrens an weiteren Typen von basischen Feuerfestprodukten zu erproben.

Aufgrund der großen Unterschiede in den optischen Eigenschaften der Bruchoberflächen der Probenserien A bis G konnte die optische Stereoskopie nicht direkt angewandt werden. Der Grund dafür sind die dunklen Oberflächen der Magnesiachromitprodukte (D und E) und der Magnesiacharbonsteine (F und E). Die Bruchoberflächen der Magnesiacharbonsteine weisen zusätzlich durchsichtige Schmelzmagnesiakörner und reflektierende Spaltflächen der Körner auf (siehe Abb. 45, S.45). Dies führt zu einer zusätzlichen Beeinträchtigung der Bildqualität. Deshalb wurden alle Bruchoberflächen mit der in Kap. 4.9.2 (S. 49) beschriebenen Airbrushtechik beschichtet. Dies hat das Ziel die optischen Eigenschaften der Proben zu optimieren und zu vergleichmäßigen.

Die Mittelwerte der bruchmechanischen und fraktografischen Daten der Untersuchungen sind in Tabelle 19 dargestellt. Die Einzelwerte befinden sich in Tabelle 30 auf Seite 94.

| Proben- serie | Proben- anzahl | E [GPa] | G_f [N·m ⁻¹] | σ_{nt} [MPa] | $F_{H\ max}$ [N] | σ_{NT}^2/E [kPa] | l_{ch} [mm] | ξ [mm] |
|------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| | | x^* [GPa] v [%] | x^* [N·m ⁻¹] v [%] | x^* [MPa] v [%] | x^* [N] v [%] | x^* [kPa] v [%] | x^* [mm] v [%] | x^* [mm] v [%] |
| A | 3 | 98,8 | 115,0 | 13,4 | 6664 | 1,82 | 63,9 | 0,183 |
| | | 0,7 | 4,5 | 5,9 | 5,8 | 11,2 | 15,8 | 8,3 |
| B | 3 | 76,5 | 143,3 | 7,7 | 3875 | 0,79 | 183,2 | 0,367 |
| | | 11,2 | 7,9 | 8,6 | 8,0 | 7,7 | 13,2 | 6,9 |
| C | 5 | 28,2 | 245,9 | 3,4 | 1704 | 0,41 | 631,0 | 0,500 |
| | | 6,6 | 10,1 | 12,0 | 11,5 | 24,1 | 25,0 | 9,7 |
| D | 3 | 41,8 | 115,3 | 6,1 | 3051 | 0,88 | 132,1 | 0,220 |
| | | 3,5 | 6,2 | 7,1 | 6,1 | 11,7 | 15,9 | 12,0 |
| E | 4 | 13,1 | 190,1 | 3,9 | 1756 | 1,17 | 164,7 | 0,330 |
| | | 5,3 | 22,0 | 5,0 | 5,9 | 6,8 | 27,8 | 8,0 |
| F | 3 | 26,4 | 87,8 | 3,4 | 1686 | 0,43 | 204,4 | 0,353 |
| | | 2,1 | 15,0 | 7,8 | 8,7 | 12,9 | 3,1 | 3,3 |
| G | 3 | 9,1 | 134,8 | 2,1 | 1059 | 1,08 | 270,8 | 0,343 |
| | | 5,7 | 20,7 | 16,0 | 16,2 | 16,9 | 16,7 | 12,1 |

Tab. 19: Bruchmechanische Kennwerte und laterale Korrelationslänge; die Tabelle enthält jeweils den Mittelwert x^* und den Variationskoeffizienten v

Die Ergebnisse wurden in einer Korrelationstabelle (Tab. 20) einander gegenübergestellt.

| | G_f [N·m ⁻¹] | E [GPa] | σ_{NT} [MPa] | $F_{H\ max}$ [N] | l_{ch} [mm] | σ_{NT}^2/E [kPa] | ξ [mm] |
|----------------------------|-------------------------------|---------|------------------------|---------------------|------------------|----------------------------|------------|
| G_f [N·m ⁻¹] | 1 | | | | | | |
| E [GPa] | -0,5 | 1 | | | | | |
| σ_{NT} [MPa] | -0,48 | 0,94 | 1 | | | | |
| $F_{H\ max}$ [N] | -0,42 | 0,92 | 0,99 | 1 | | | |
| l_{ch} [mm] | 0,65 | -0,39 | -0,55 | -0,55 | 1 | | |
| σ_{NT}^2/E [kPa] | -0,28 | 0,55 | 0,8 | 0,81 | -0,71 | 1 | |
| ξ [mm] | 0,66 | -0,54 | -0,71 | -0,7 | 0,83 | -0,78 | 1 |

Tab. 20: Korrelationsmatrix der bruchmechanischen und fraktografischen Parameter

Die Korrelation der lateralen Korrelationslänge ξ mit der charakteristischen Länge l_{ch} ergab einen Wert des Korrelationsfaktors von 0,83, der gut mit dem Wert von 0,84 der basischen Feuerfestprodukte übereinstimmt (siehe Tab. 17, S. 59). Im Gegensatz dazu weist der Korrelationsfaktor zwischen der lateralen Korrelationslänge ξ und der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT} einen Wert von -0,71 auf. Hier ist im Vergleich zu den basischen Steinen keine lineare Korrelation vorhanden. Diese Zusammenhänge sind in den Abbildungen 70 und 71 grafisch dargestellt. Die Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ mit der charakteristischen Länge l_{ch} (Abb. 70) weist eine nichtlineare Korrelation auf.

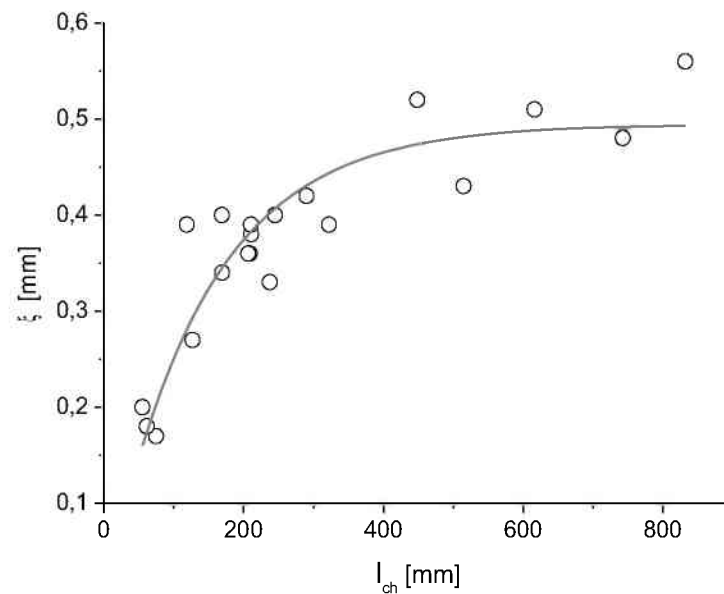


Abb. 70: Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der charakteristischen Länge l_{ch}

Bei den Proben der Serien A bis G ist der Korrelationskoeffizient zwischen der lateralen Korrelationslänge ξ und der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT} geringer als bei der Probenreihe A bis C (Abb. 71). Dies ist ein Gegensatz zur linearen Korrelation die für die basischen Feuerfestbaustoffe der Proben A bis C (siehe Abbildung 68, S. 65) festgestellt wurde.

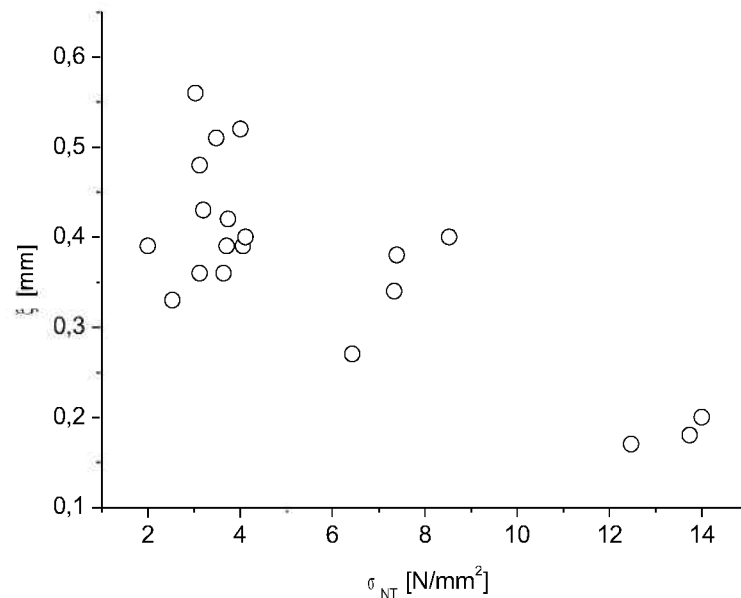


Abb. 71: Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT}

Bei der Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ mit $\sigma_{NT}^2 \cdot E^{-1}$ weist einen linearer Zusammenhang auf (siehe Abb. 72), wobei die Daten im Vergleich zu Abbildung 69 (S. 66) eine große Streuung aufweisen.

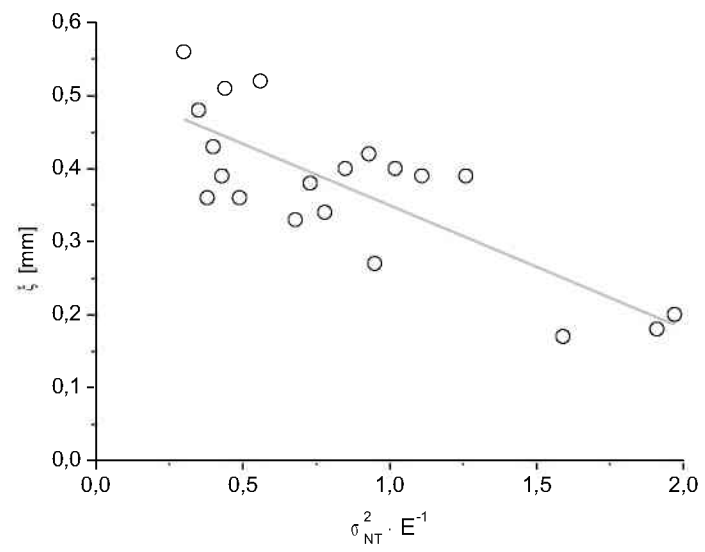


Abb. 72: Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und $\sigma_{NT}^2 \cdot E^{-1}$

5.3.2 Zementmörtel

Die bruchmechanischen und fraktografischen Ergebnisse der Untersuchungen an den Zementmörtelproben sind in Tabelle 21 dargestellt. Die Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der charakteristischen Länge l_{ch} ergab einen nichtlinearen Zusammenhang (Abb. 73).

| Probe | Nr. | E [Gpa] | G_f [N·m ⁻¹] | σ_{NT} [Mpa] | $F_{H\max}$ [N] | l_{ch} [mm] | ξ [mm] |
|-------|-----|------------|-------------------------------|------------------------|--------------------|------------------|---------------|
| I | 1 | 30,3 | 87,9 | 6,53 | 3022 | 62,5 | 0,29 |
| | 2 | 30,3 | 74,5 | 6,04 | 2839 | 61,9 | 0,27 |
| | 3 | 30,3 | 83,1 | 5,66 | 2635 | 78,6 | 0,32 |
| J | 1 | 30,1 | 69,8 | 5,66 | 3288 | 65,6 | 0,28 |
| | 2 | 30,1 | 67,5 | 5,51 | 3288 | 66,9 | 0,26 |
| | 3 | 30,1 | 66,4 | 5,45 | 3169 | 67,3 | 0,31 |
| | 4 | 30,1 | 64,4 | 5,22 | 3032 | 71,1 | 0,34 |
| K | 1 | 40,3 | 86,9 | 6,24 | 2909 | 89,9 | 0,42 |
| | 2 | 40,3 | 94,2 | 6,06 | 2829 | 103,4 | 0,43 |
| L | 1 | 19,5 | 34,9 | 2,33 | 1355 | 125,2 | 0,45 |
| | 2 | 19,5 | 34,7 | 2,29 | 1332 | 128,9 | 0,47 |
| | 3 | 24,2 | 43,8 | 2,78 | 1617 | 137,0 | 0,44 |
| M | 1 | 22,8 | 26,9 | 2,25 | 1152 | 120,4 | 0,43 |
| | 2 | 22,8 | 30,3 | 2,39 | 1113 | 121,0 | 0,41 |
| | 3 | 24,5 | 36,5 | 2,51 | 1286 | 142,7 | 0,48 |
| | 4 | 24,5 | 41,7 | 2,58 | 1297 | 153,8 | 0,48 |
| N | 1 | 40,6 | 40,5 | 4,59 | 2666 | 132,5 | 0,45 |
| | 2 | 40,6 | 56,8 | 4,53 | 2593 | 154,5 | 0,42 |
| O | 1 | 25,9 | 16,2 | 1,6 | 966 | 163,9 | 0,50 |
| | 2 | 25,4 | 15,4 | 1,51 | 909 | 171,6 | 0,53 |

Tab. 21: Bruchmechanische Kennwerte und laterale Korrelationslänge ξ der Mörtelproben

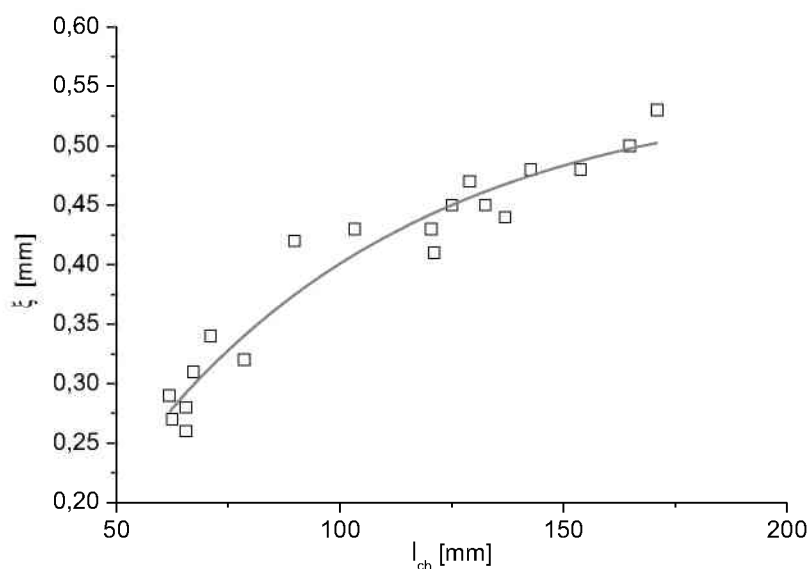


Abb. 73: Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der charakteristischen Länge l_{ch}

Zwischen der lateralen Korrelationslänge ξ und der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT} konnte ein linearer Zusammenhang festgestellt werden (Abbildung 74, S. 71).

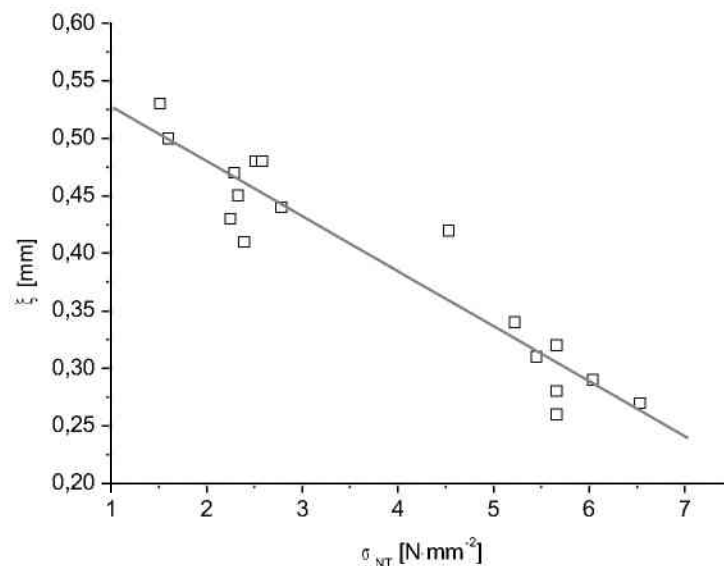


Abb. 74: Gegenüberstellung der lateralen Korrelationslänge ξ und der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT}

Von Interesse ist auch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der fraktografischen Analyse der Mörtelproben mit den basischen Feuerfestprodukten der Probenreihen A bis C (siehe Abb. 75 und 76).

Es zeigt sich, dass keine Deckung der Kurven der Mörtelproben und der basischen Feuerfestprodukte vorhanden ist, wobei aber ähnliche Kurvenverläufe vorhanden sind (siehe Abbildung 75 und 76).

Die lateralen Korrelationslängen der Mörtelproben weisen im Vergleich zu Feuerfestproben, bei gleicher charakteristischer Länge, höhere Werte auf. Dies deutet auf das Vorhandensein von größeren Strukturen (z. B. Körner) auf den Bruchoberflächen der Zementmörtel hin. Dies könnte dadurch bedingt sein, dass bei Proben mit gleicher charakteristischer Länge, im Zuge des Rissvorganges bei den Mörtelproben weniger Körner durchbrochen werden als bei den Feuerfeststeinen. Dieser Umstand wurde durch einen optischen Vergleich von Bruchoberflächen (Rauigkeit) mit gleicher Sprödigkeit bestätigt. Dies entspricht dem optischen Eindruck der bei visueller Beobachtung der Bruchoberfläche erhalten wird.

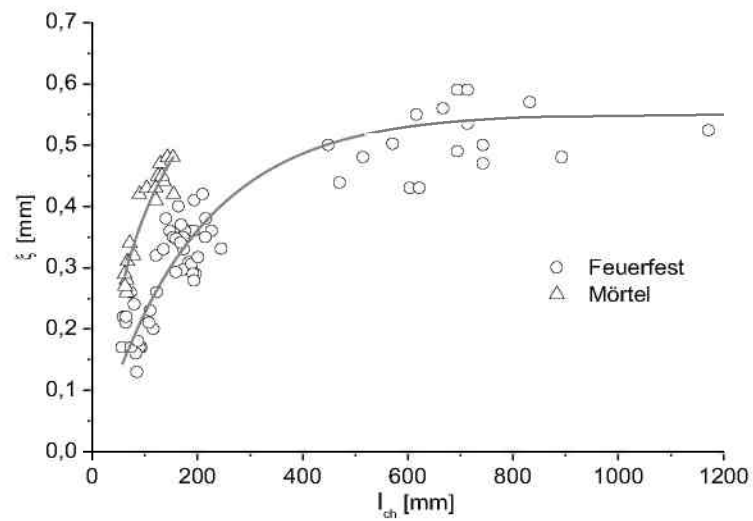


Abb. 75: Vergleich der lateralen Korrelationslänge ξ und der lateralen Korrelationslänge l_{ch} für Feuerfestbaustoffe und Mörtel

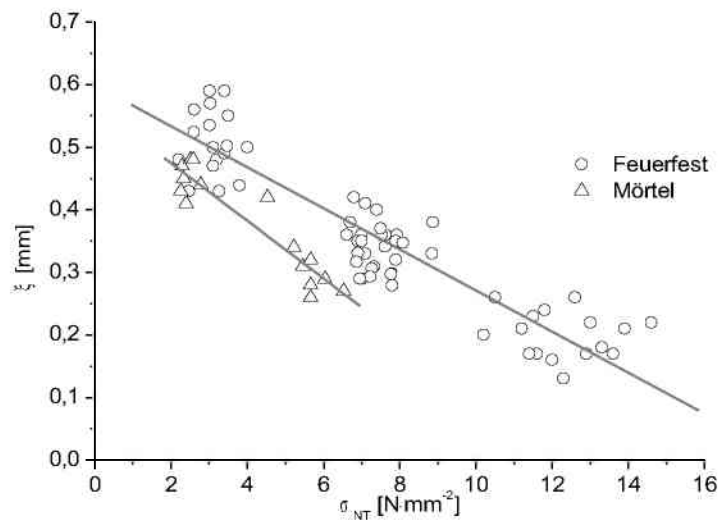


Abb. 76: Vergleich der lateralen Korrelationslänge ξ und der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT} für Feuerfestbaustoffe und Mörtel

Rauigkeitsparameter und fraktale Dimension:

An den Bruchoberflächen der Mörtelproben wurden Rauigkeitsanalysen nach EN 4287 durchgeführt und die fraktalen Dimension D_s bestimmt.

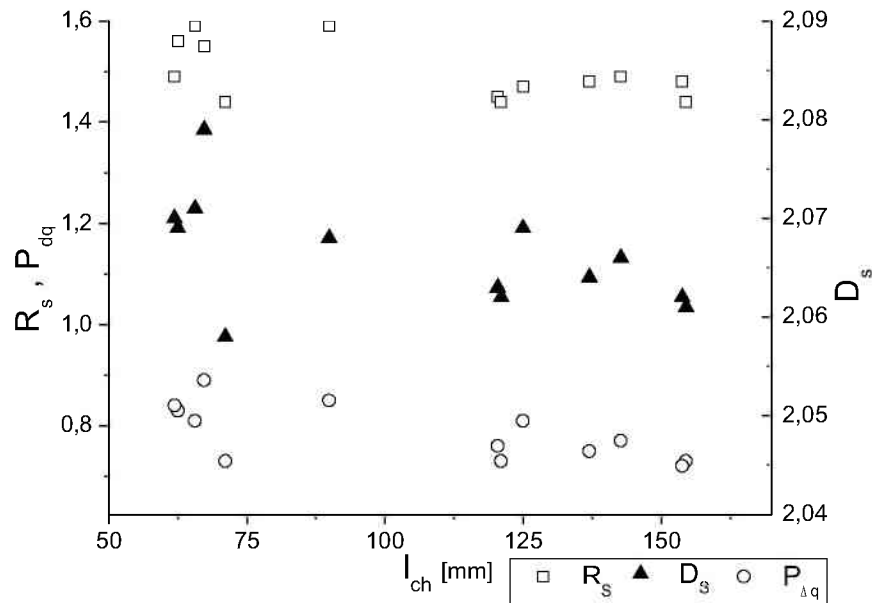


Abb. 77: Gegenüberstellung der Rauigkeitsparameter R_s und $P_{\Delta q}$ (P_{dq}) und fraktalen Dimension D_s mit der charakteristischen Länge l_{ch}

Die Gegenüberstellung der Rauigkeitsparameter R_s , $P_{\Delta q}$ und D_s mit der charakteristischen Länge l_{ch} sowie der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT} ergab keine lineare Korrelation (Abb. 77, 78).

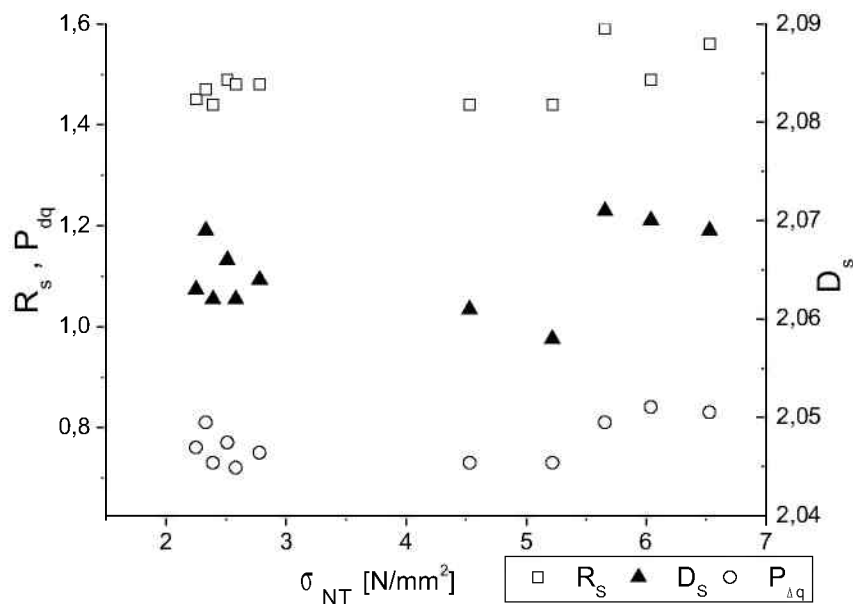


Abb. 78: Gegenüberstellung der Rauigkeitsparameter R_s und $P_{\Delta q}$ (P_{dq}) und Fraktale Dimension D_s mit der nominellen Kerbzugfestigkeit σ_{NT}

Analysen von Mörtelproben mit verschiedenen Auflösungen:

Die Bruchoberflächen der Mörtelproben weisen bei einer ähnlichen charakteristischen Länge eine geringere Rauigkeit als die basischen Feuerfestbaustoffe der Probenserien A bis C auf. Es liegt die Vermutung nahe, dass die verwendete Auflösung von $98 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ zu gering ist. Aus diesem Grund wurden die Bruchoberflächen der Mörtel nochmals mit einer Auflösung von $64 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ untersucht, um einen möglichen Einfluss der Auflösung zu untersuchen.

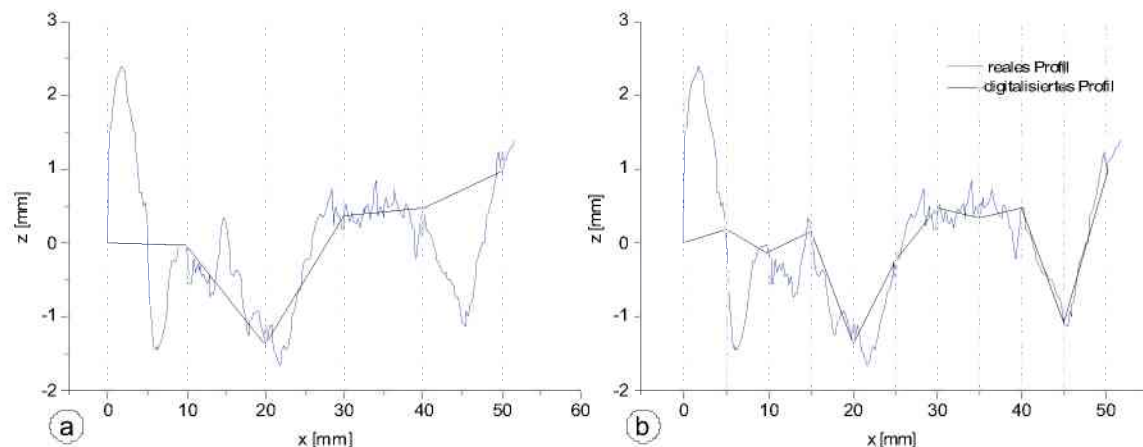


Abb. 79: Schematische Darstellung für die Auswirkung der Erhöhung der Auflösung (Abtastrate). In (b) wurde die Auflösung im Vergleich zu (a) verdoppelt. Das reale Profil ist grau und die Abtastung als schwarze Linie dargestellt.

Die Erhöhung der Auflösung führt zu einer Steigerung der Anzahl der Datenpunkte der 3D-Daten. Folglich nimmt der Grad der Detaillierung der 3D-Daten aufgrund der Steigerung der lateralen Auflösung zu (siehe Abb. 79).

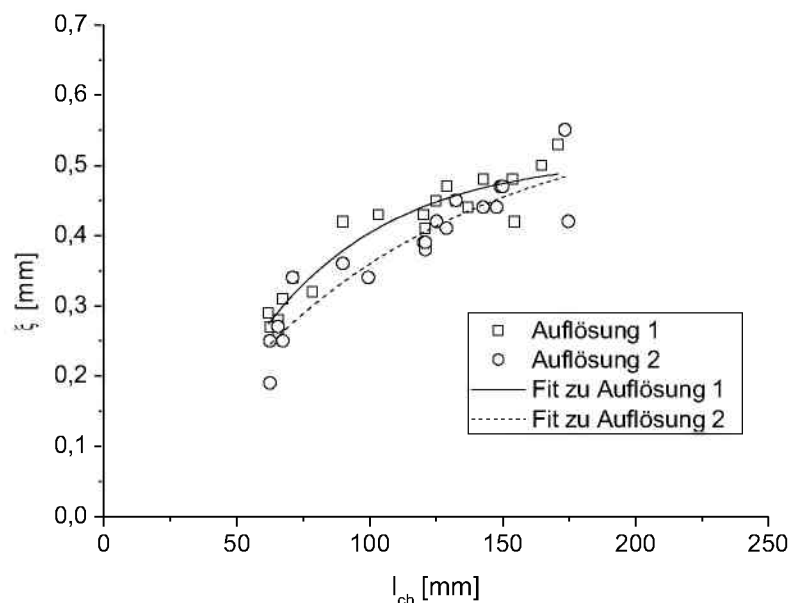


Abb. 80: Gegenüberstellung der Auflösung 1 ($98 \mu\text{m}/\text{Pixel}$) und 2 ($64 \mu\text{m}/\text{Pixel}$)

Das Resultat der Untersuchungen ist, dass die Korrelationskurven beider Auflösungen fast identische Verläufe aufweisen (Abb. 80). Weiters konnte eine leichte Verschiebung der Kurve der höheren Auflösung in Richtung geringerer Werte der lateralen Korrelationslänge festgestellt werden. Dies ist zu erwarten, da der Grad der Detaillierung zugenommen hat.

6 Diskussion und Ausblick

6.1 Diskussion

6.1.1 Zusammenfassung der Bruchflächenanalyse

In dieser Arbeit wurde die Entwicklung eines Verfahrens zur Bruchflächenanalyse vorgestellt, mit dem einerseits dreidimensionale Daten von Feuerfestbruchoberflächen bestimmt und andererseits ein fraktografischer Parameter, die laterale Korrelationslänge ξ , berechnet werden kann. Dieser weist einen Zusammenhang mit bruchmechanischen Parametern der untersuchten Materialien auf.

Die optische Stereoskopie konnte an Bruchoberflächen von basischen Feuerfeststeinen angewandt werden, um 3D-Daten zu bestimmen. Zur fraktografischen Analyse der 3D-Daten wurde die Stereomatching-Software MeX 4.1 und eine selbst entwickelte und programmierte Software eingesetzt.

In Tabelle 22 ist eine Übersicht der Zusammenhänge zwischen den fraktografischen und bruchmechanischen Parametern dargestellt.

| Korrelation zwischen den Parametern | ξ und l_{ch} | ξ und σ_{NT} | $R_S, P_{\Delta q}, D_S$ und l_{ch} | $R_S, P_{\Delta q}, D_{Si}$ und σ_{NT} |
|---|--------------------|-------------------------|--|--|
| Basischen Steinen mit unterschiedlicher Sprödigkeit (Probe A bis C) | nicht linear | linear | — | — |
| Basische Feuerfestbaustoffe mit unterschiedlichen Bindungstyp (A bis G) | nicht linear | — | — | — |
| Zementmörtel (I bis O) | nicht linear | linear | — | — |

Tab. 22: Übersicht der Zusammenhänge zwischen den fraktografischen und den bruchmechanischen Parametern

Anhand der lateralen Korrelationslänge ξ kann die Auswirkung der Sprödigkeit auf die beim Bruchvorgang gebildete Oberfläche gezeigt werden. Ein Beispiel ist die Probe A die im Gegensatz zur Probe C spröde ist. Die laterale Korrelationslänge von A ist um den Faktor 4,5 geringer als jene der Probe C (siehe Tab. 16, S. 57). Dies bedeutet, dass die beim Rissfortschritt gebildeten regelmäßigen Strukturen der Bruchfläche der Probe C um das 4,5-fache weiter auseinander liegen als bei der Probe A. Weiters zeigt dies, dass die Sprödigkeit der untersuchten Feuerfeststeine eine messbare Auswirkung auf die gebildete Bruchoberfläche hat.

6.1.2 Experimentelle Herausforderungen

Im Laufe dieser Arbeit sind experimentelle Herausforderungen aufgetreten, die nachfolgend erläutert werden.

Die Bildqualität als Ausgangspunkt für das optische stereoskopische Verfahren:

Die Qualität der Kippbilder spielt eine ausschlaggebende Rolle für eine realitätsnahe dreidimensionale Abbildung der Bruchoberfläche. Die Beurteilung der Bildqualität hängt von der ausführenden Person und von den verwendeten Messwerkzeugen ab.

Die Erstellung der Kippbilder erfolgt mit einer Präzisionsdigitalkamera in Verbindung mit der dazu gehörenden Kamerasoftware. So steht eine große Anzahl an Parameter zur Manipulation der Bildqualität zur Verfügung. Bei bestimmten optischen Eigenschaften einer Bruchoberfläche (z. B. eine Oberfläche mit geringem Kontrast) kann eine ungeeignete Kombination der Kameraparameter Artefakte in den Kippbildern hervorrufen. In weiterer Folge entstehen Fehlinformationen in den 3D-Daten.

Maßnahmen zur Verbesserung der Bildqualität:

Bei der Untersuchung von Bruchoberflächen mit ungeeigneten optischen Eigenschaften ist die Optimierung der Bildqualität eine notwendige Voraussetzung um mit der optischen Stereoskopie 3D-Daten ermitteln zu können, die der realen Bruchoberfläche gut entsprechen. Folgende Maßnahmen wurden angewandt: Veränderung der Kameraparameter, Überlagerung von Bildern mit unterschiedlicher Belichtungszeit und die Beschichtung der Bruchoberfläche. Die Umsetzung der Maßnahmen ist mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden und setzt die Kontrolle der Bildqualität voraus. Weiters sind einige Iterationsschritte notwendig, bis die optimale Bildqualität erreicht wird.

Die bruchmechanischen Eigenschaften und die Bruchoberfläche:

Als Parameter zur Beurteilung der Sprödigkeit wurde die charakteristische Länge l_{ch} , eingesetzt, die anhand der Ergebnisse aus dem Keilspalttest nach Tschegg berechnet wurde. Aufgrund der Inhomogenitäten in den Feuerfeststeinen waren die Werte der Variationskoeffizienten von l_{ch} größer als die Variationskoeffizienten der lateralen Korrelationslänge ξ der selben Probenserie. Dadurch entstand eine gewisse Unschärfe in den Korrelationsdiagrammen.

Weiters kann als bruchmechanischer Parameter auch die kritische Energiefreisetzungsrate G_c verwendet werden.

Fixierung des Auswahlbereiches in der 3D-Rekonstruktionssoftware:

Bei Anwendung der Software MeX 4.1 muss während der Durchführung der Eingabeprozedur der zu berechnende Bereich der 3D-Daten in Form eines Rechtecks manuell ausgewählt werden. Dieses Rechteck kann in der Position und Abmessung nicht fixiert werden, deshalb liegt nicht immer die selbe Geometrie der 3D-Daten zur fraktografischen Analyse vor. Dies bedeutet, dass die zu analysierenden Profile in der Länge und Anzahl variieren. Diese Unschärfe trägt einen Anteil zur Streuung der lateralen Korrelationslänge bei.

6.2 Ausblick

Quantitative Messung der Bildqualität:

In dieser Arbeit standen Softwarewerkzeuge zur Verfügung, um die Qualität der Kippbilder qualitativ zu messen. Diese Methode reicht aber nicht für alle Aufgabenstellungen aus, da eine subjektive Beurteilung nicht ausgeschlossen werden kann. Aus diesem Grund wird die ergänzende Anwendung der Grauwertübergangsmatrix [86, 87] zur quantitativen Bestimmung der Bildqualität empfohlen.

Die vertikale Auflösung:

Bei Bruchoberflächen mit geringen Rauigkeiten stößt die verwendete Hardware beziehungsweise die gewählte Hardwarekonfiguration an ihre Grenzen. Für die Untersuchungen wurde eine laterale Auflösung von 98 μm und ein Kippwinkel 2α von 10° gewählt. Diese ergibt entsprechend der im Anhang auf S. 95 dargestellten Berechnung eine vertikale Auflösung von 282,2 μm . Um die Auflösung zu erhöhen wird eine Änderung des Kippwinkels auf 15° empfohlen, wodurch die vertikale Auflösung auf 189,3 μm verbessert wird. Die Auswahl des Kippwinkels weist einen Grenzwert auf, der durch die Steilheit der Rissflanken auf der Bruchoberfläche gegeben ist und bei Überschreitung eine Abschattung der Täler verursachen würde.

Weitere Algorithmen zur fraktografischen Analyse:

Die Anwendung der Autokorrelationsfunktion setzt trendfreie Profile voraus. Deshalb musste ein Differenzenfilter an den Profilen angewandt werden. Dies führt zu einem Informationsverlust in den 3D-Daten. Durch die Differenzenbildung gehen in die Autokorrelationsfunktion Steigungswerte ein, welche indirekt mit den Abmessungen der Strukturen (z. B. Körner) auf der Bruchoberfläche zusammenhängen. Deshalb wurde nach alternativen Methoden recherchiert. Ein Beispiel ist die „Structure Function“ [88].

Eine weitere Methode ist die räumliche Autokorrelationsfunktion [89], welche direkt an den 3D-Daten der Bruchfläche durchgeführt wird. Dann wäre es nicht erforderlich Profile auszuwerten.

Weitere Verfahren zur dreidimensionalen Abbildung der Bruchoberflächen:

Folgende Verfahren sind als Alternative zur optischen Stereoskopie interessant:

- tiefenscannende Streifenprojektion (DSFP) [90]
- 3D-Laserscanner [91]
- 3D-Erfassung mit Punktsensoren (z. B.: konfokaler Punktsensor) [92]
- fokussierende Verfahren [16]

Die beiden letztgenannten Verfahren sind Varianten der optischen Mikroskopie und weisen Einschränkungen in der abbildbaren Fläche und der maximalen Höhenunter-

schiede auf. Ein Vorteil aller Verfahren ist die geringe Abhängigkeit von den optischen Eigenschaften der abzubildenden Oberfläche und die hohe vertikale Auflösung.

Untersuchung des Einflusses der lateralen Auflösung der 3D-Erfassung auf die fraktalen Parameter:

Die fraktale Dimension hängt von der Skalierung ab, die bei der 3D-Erfassung angewendet wird. A. Carpinteri beschreibt dies in den Arbeiten [6] und [8].

Bei der durchgeführten Arbeit war die Auflösung zu gering. Es wird empfohlen eine Grundlagenuntersuchung durchzuführen bei welcher die fraktografischen Parameter bei unterschiedlicher Skalierung bestimmt werden.

7 Quellen

- [1] D. A. Lange, H. M. Jennings, S. P. Shah: Relationship between Fracture Surface Roughness and Fracture Behavior of Cement Paste and Mortar. *J.Am.Ceram.Soc.* Vol. 76, no. 3, 589-597, 1993
- [2] V. Mechtcherine, H. Garrecht, H.K. Hilsdorf: Effect of temperature and loading rate on fracture behaviour of concrete subjected to uniaxial tension. *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, F. H. Wittmann (ed.), Aedificatio Publishers, 719-728, 1995
- [3] J. J. Mecholsky, D.E. Passoja, K.S. Feinberg-Ringel: Quantitative Analysis of Brittle Fracture Surfaces Using Fractal Geometry. *J. Am. Ceram. Soc.*, 72 [II], 60-65, 1989
- [4] Mohsen A. Issa, Mahmud A. Issa, Md. S. Islam, A. Chudnovsky: Fractal Dimension - a measure of fracture roughness and toughness of concrete. *Engineering Fracture Mechanics* 70, 125-137, 2003
- [5] K. R. Wu, A. Yan, J. Liu, D. Zhang, W. Yao: Reconstruction and analysis of 3-D profile of fracture surface of concrete. *Cement and Concrete Research*. Volume 30, Number 6, 981-987, June 2000
- [6] A. Carpinteri, B. Chiaia: Multifractal nature of concrete fracture surfaces and size effects on nominal fracture energy. *Materiaux et constructions*, 28 (182), 435-443, 1995
- [7] M. A. Issa, A. M. Hammad: Fractal Characterisation of fracture Surfaces in Mortar. *Cement and Concrete Research*. Vol. 23, 1, 7-12, 1993
- [8] A. Carpinteri, B. Chiaia, B. Giuseppe: Size effects on nominal tensile strength of concrete structures: Multifractality of material ligaments and dimensional transition from order to disorder. *Materiaux et constructions*, 28 (180), 311-317, 1995
- [9] A. Carpinteri, B. Chiaia: Multifractal scaling laws in the breaking behaviour of disordered materials. *Chaos, Solitons and Fractals*, 8 (2 SPEC. ISS.), 135-150, 1997
- [10] D. A. Lange, H. M. Jennings, S. P. Shah: Analysis of surface roughness using confocal microscopy. *Journal of materials science* 28, 3879-3884, 1993
- [11] G. Prokopski, B. Langier: Effect of water/cement ratio and silica fume addition on the fracture toughness and morphology of fractured surfaces of gravel concretes. *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Issue 9, 1427-1433, September 2000
- [12] K. J. Stout: *Development of Methods for the Characterisation of Roughness in three Dimensions*. Penton Press, London, UK, 2000, ISBN 1 8571 8023 2
- [13] H. Stroppe: *Netz - Formeln und Sätze der Physik*. Carl Hanser Verlag München Wien, 1991
- [14] Vergleich der Topografiemessmethoden. EMPA Thun, Feuerwerkerstrasse 39, CH-3602 Thun, http://www.empa.ch/plugin/template/empa*/19126/---/l=1
- [15] G. Judmaier: *Die Untersuchung eines fraktographischen Verfahrens an feuerfesten Baustoffen*. Diplomarbeit am Institut für Gesteinshüttenkunde der Montanuniversität Leoben, November 2004
- [16] E. I Materna-Morris: Einführung und Übersicht der verschiedenen Abbildungsverfahren von rauen Oberflächen und Brüchen. DGM Fortbildungsseminar, Karlsruhe, 23-24. Nov. 2000

- [17] M. Göcken: Rasterkraftmikroskopische Abbildung von Werkstoffoberflächen und Bruchflächen. DGM Fortbildungsseminar, Karlsruhe, 23-24. Nov. 2000
- [18] A. Candel: Charakterisierung von Oberflächen mittels Rasterkraftmikroskopie. Semesterarbeit am Laboratorium für Mikro- und Nanostrukturen Paul Scherrer Institut, Villigen, <http://www.itp.phys.ethz.ch/staff/candel/publications/>, Februar 1999
- [19] R. Wiesendanger: Scanning probe microscopy and spectroscopy, methods and applications. Cambridge Univ. Press, 1, XXII, 1994
- [20] S. Amelinckx: Electron microscopy, principles and fundamentals. VCH-Verl.-Ges., Weinheim, XII, 1997
- [21] E. I. Materna-Morris, N. Lakota, T. Merkel, M. Scherer: Methodenvergleich zur quantitativen Fraktographie. Sonderband zur 11. Internationalen Metallographie-Tagung Leoben, 2002
- [22] Carl Mahr Holding GmbH - Carl-Mahr-Str.1, D-37073 Göttingen, Germany, www.mahr.com
- [23] Wikimedia Commons, Dateiarchiv für Mediendateien, <http://commons.wikimedia.org/>
- [24] K. R. Wu, A. Yan, J. Liu, D. Zhang, W. Yao: Reconstruction and analysis of 3-D profile of fracture surface of concrete. Cement and Concrete Research. Volume 30, Number 6, 981-987, June 2000
- [25] Welt der Stereoskopie. <http://www.stereoskopie.com>
- [26] Stereoskopie.de. <http://www.stereoskopie.de>
- [27] E.-H. Schmitz: Handbuch zur Geschichte der Optik. Ergänzungsband 1: Das Fernrohr. Wayenborgh, Bonn, 1982
- [28] E. Ervin: Fractography. ASM Handbook, Vol. 12, ASM International, 193-210, 1987
- [29] D. Bryant: Semi-automated topographic mapping of fracture surfaces through stereophotogrammetry. Micron and Microscopica Acta, Vol 17, No. 3, 237-242, 1986
- [30] G. Piazzesi: Photogrammetry with the Scanning Electron Microscope. Journal of Physics, E. Sci. Instrum, 6, 392-296, 1973
- [31] O. Kolednik: Ein Beitrag zur Stereophotogrammetrie am Rasterelektronenmikroskop. Praktische Metallographie 18, 562-573, 1981
- [32] S. Scherer, J. Stampfl, M. Gruber, O. Kolednik: Automatische 3D Oberflächenrekonstruktion aus stereoskopischen Rasterelektronenmikroskopaufnahmen. DGM - Micromaterials Proceeding, 671-676, 28-29.11.1995
- [33] J. Stampfl, S. Scherer, M. Gruber: Reconstruction of surface topographies by scanning electron microscopy for application in fracture research. Appl. Phys. A 63, 341-346, 1996
- [34] S. Scherer, O. Kolednik: A New System for Automatic Surface Analysis in SEM. Microscopy and analysis, 15 - 17, march 2001
- [35] R. Frankot, S. Shafer, S. Hensley: Noise resistant estimation technique for SAR image registration and stereo mapping. Proceedings IGARSS'94, Pasadena, CA, 1151-1153, August 1994
- [36] EN ISO 4287, Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method Terms, definitions and surface texture parameters. Deutsches Institut für Normung, 1997

- [37] M. Tanaka, Y. Kimura, L. Chouanine: Quantitative Analysis of Three-dimensional Fatigue Fracture Surface Reconstructed by Stereo Matching Method. *ISIJ Int.*, Vol. 43, No. 9, 1453-1460, ISSN 0915-1559, 2003
- [38] G. C. Holst: *CCD Arrays, Cameras and Displays*. Bellingham: SPIE, 1996
- [39] M. W. Davidson: *Molecular Expressions*. National High Magnetic Field Laboratory (NHMFL), 1800 East Paul Dirac Drive; The Florida State University, Tallahassee, Florida 32306, <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/index.html>
- [40] K. Schröder: Schärfentiefe der Olympus E-1. <http://olypedia.de/Hauptseite>
- [41] C. Chatfield: *The Analysis of Time Series: Theory and Practice*. Chapman and Hall, London, 1975
- [42] G. E. Box, G. M. Jenkins: *Time Series Analysis: Forecasting and control*. Revised Edition, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1976
- [43] L. Fahrmeir, H. L. Kaufmann, F. Ost: *Stochastische Prozesse*. Hanser Verlag München, 1981
- [44] Y. P. Zhao, H.-N. Yang, G.-C. Wang, T.-M. Lu: Extraction of real-space correlation function of a rough surface by light scattering using diode array detectors. American Institute of Physics, 1996
- [45] I. Simonovski, M. Kovač, L. Cizelj: Estimating the correlation length of inhomogeneities in a polycrystalline material. *Materials Science and Engineering A* 381, 273-280, 2004
- [46] Y. P. Zhao: *A Simple Introduction to Rough Surface Characterization*. Department of Physics, Applied Physics, and Astronomy Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180-3590, 2000, www.physast.uga.edu/%7Ezhaoy/publication.html
- [47] R. Kraft, J. Kauer: Estimating the Fractal Dimension from Digitized Images. Munich University of Technology, Weihenstephan, www.wzw.tum.de/ane/algorithms/algorithms.html, 1995
- [48] T. Auer: Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten eines stereoskopischen Aufnahmeverfahrens an Testmaterialien und Bruchflächen. Diplomarbeit am Institut für Gesteinshüttenkunde der Montanuniversität Leoben, Juni 2003
- [49] Statgraphics, StatPoint, Inc., 2325 Dulles Corner Boulevard, Suite 500, Herndon, Virginia 20171, www.statgraphics.com
- [50] E. K. Tschegg: Testing device and appropriate specimen shapes for tests to measure fracture values (in German). Austria Patent Specification AT 390 328, 1986
- [51] E. K. Tschegg: New equipments for fracture tests on concrete. *Materialprüfung* 33, 338-342, 1991
- [52] T. Auer: FE-Simulation der mechanischen Schädigung von Baustoffen - Simulation einer bruchmechanischen Prüfeinrichtung sowie der Rissbildung. Dissertation am Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde der Montanuniversität Leoben, März 2006
- [53] S. Gerer: Entwicklung eines Auswerteverfahrens zur Ermittlung mechanischer Materialparameter durch FEM-Simulation einer bruchmechanischen Prüfung. Diplomarbeit am Institut für Gesteinshüttenkunde, Montanuniversität Leoben 2005
- [54] H. Harmuth, E. K. Tschegg: A fracture mechanics approach for the development of refractory materials with reduced brittleness. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures (UK)*. Vol. 20, no. 11, 1585-1603, 1997
- [55] H. Kottas: Das Resonanzverfahren zur Messung von Schwingungen und Materialeigenschaften. *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 72. Jahrgang, Heft 7, 1964

- [56] C. Manhart, H. Harmuth, G. Buchebner: Elastic moduli of carbon bonded magnesia refractories at elevated temperatures. Unitecr 2003 Congress, ECO Refractory for the Earth, Proc.8th Biennial Worldwide Conf.on Refractories; 2003
- [57] MESSPHYSIK Materials Testing GmbH, Altenmarkt 180, A-8280 Fürstenfeld. [www.-messphysik.com](http://www-messphysik.com)
- [58] DIN EN 10002-4: Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Prüfung von Längenänderungen - Messeinrichtungen für die Prüfung mit einachsiger Beanspruchung, 1995
- [59] LABEK Labor- und Betriebselektronik GmbH, Murstraße 2, A-6063 Rum, <http://www-w.labek.at>
- [60] PixeLINK, 3030 Conroy Road, Ottawa, ON K1G 6C2. www.pixelink.com
- [61] Baumer Optronik GmbH, Badstraße 30, DE-01454 Radeberg, Deutschland. [www.-baumeroptronic.de](http://www-baumeroptronic.de)
- [62] Jos. Schneider Optische Werke GmbH, Ringstraße 132, 55543 Bad Kreuznach, Deutschland. www.schneiderkreuznach.com
- [63] Software: MeX 4.1. Alicona Imaging GmbH. www.alicon.com
- [64] Borland Software Corporation, 20450 Stevens Creek Blvd., Suite 800, Cupertino, CA 95014. www.borland.com
- [65] Software: Fracture Analyzer. Christian Manhart, Montanuniversität Leoben, 2003-2006
- [66] Software: Microsoft Excel, Office 2000. Microsoft Corporation One Microsoft Way Redmond, WA 98052-6399
- [67] Software: Histogram from Bitmap. Christian Manhart, Montanuniversität Leoben, 2006
- [68] Software: Mittelung v. Bitmaps. Christian Manhart, Montanuniversität Leoben, 2006
- [69] R. C.Gonzalez: Digital image processing. Addison-Wesley, 1998
- [70] W. Abmayr: Einführung in die digitale Bildverarbeitung. Teubner Stuttgart, 1994
- [71] R. C. Russ: The image processing handbook. CRC Press, 4. ed., 2002
- [72] Adaptive Verfahren der Bildverarbeitung. Weierstraß Institut für Angewandte Analysis und Stochastik (WIAS). http://www.wias-berlin.de/publications-annual_reports/1998/html/node78.html
- [73] S. McHugh: Noise reduction by image averaging. Cambridge University, [http://www.-cambridgeincolour.com/tutorials/noise-reduction.htm](http://www-cambridgeincolour.com/tutorials/noise-reduction.htm)
- [74] C. Manhart, H. Harmuth: Improvement of digital imaging techniques as a basis for optical fractographic measurements. Optical 3-D Measurement Techniques VIII, Grün/Kahmen (Eds.), Zürich, Volume 2, S.207-212, 9-12 July 2007
- [75] M. Karner: Durchführung einer Literaturlarbeit zur Anwendung der ARMA- und ARIMA- Modelle in der Software Statgraphics© unter Berücksichtigung diverser Filtermethoden. Bakkalaureatsarbeit am Institut für Gesteinshüttenkunde der Montanuniversität Leoben, Juni 2005
- [76] C. Manhart, H. Harmuth: Anwendung eines stereoskopischen Verfahrens zur fraktografischen Charakterisierung von grobkeramischen Baustoffen. © Carl Hanser Verlag, München Prakt. Metallogr. 43, 9, 2006
- [77] ÖNORM EN 993-1: Prüfverfahren für dichte geformte feuerfeste Erzeugnisse; Teil 1: Bestimmung der Rohdichte, offenen Porosität und Gesamtporosität, 1995

- [78] ÖNORM B4710-1: Beton, Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis. Österreichisches Normungsinstitut, 2002
- [79] R. Weidehorst, D. Vollenschaar: Baustoffkunde. Vincentz Verlag Hannover, 25. Aufl., 1998
- [80] H. Siegfried, K. Dietmar: Technologie der Baustoffe. C.F.Müller, Heidelberg, 12.Aufl., 2003
- [81] ÖNORM EN 196-1 Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, 2005
- [82] Betontechnik Gesellschaft m.b.H, Grazer Straße 80, A-8665 Langenwang, www.betontechnik.at
- [83] S. Schrempf: Untersuchung von Verfahren zur Bestimmung der elastischen Eigenschaften und des Bruchverhaltens von grobkeramischen Feuerfestmaterialien. Dissertation am Inst. f. Gesteinshüttenkunde, Montanuniversität Leoben, 2001
- [84] H. Schmincke & Co.-GmbH & Co.KG. Otto-Hahn-Straße 2, D-40699 Erkrath. www.schmincke.de
- [85] H.-J. Bartsch: Taschenbuch mathematischer Formeln. Fachbuchverlag Leipzig, Carl Hanser Verlag, 18. Aufl., 1998
- [86] W. Abmayr: Einführung in die digitale Bildverarbeitung. B.G. Teubner Verlag Stuttgart, 1994
- [87] R. C. Gonzalez: Digital Image Processing. Prentice Hall, 2, 2002
- [88] R. S. Sayles, T. R. Thomas: The spatial representation of surface roughness by means of the structure function: A practical alternative to correlation. *Wear*, 42, 263 – 276, 1977
- [89] C. Mätzler: Relation Between Grain Size and Correlation Length of Snow. AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, Dec. 2002
- [90] J.M. Nivet, K. Körner, U. Droste, H.J.Tiziani, W.Osten: Tiefenscannende Streifenprojektionstechnik (DSFP) mit 3D-Kalibrierung. 3D-NordOst 2003, Tagungsband, 21-30
- [91] B. Breuckmann: State of the art of topometric 3D-metrology. Optical 3-D Measurement Techniques VI, Zurich, Switzerland, Vol. II, S. 152-158, 22-25 Sept. 2003
- [92] P. Lücke, A. Last, J. Mohr: Mikrooptische Sensoren nach dem chromatisch konfokalen Messprinzip. Forschungszentrum Karlsruhe, wissenschaftliche Berichte, FZKA 7234, 2006
- [93] H. Harmuth, E. K. Tschegg, W. Tednicek: Bruchmechanische Charakterisierung heterogener hydraulisch und keramisch gebundener Werkstoffe aus dem Bereich der Gesteinshüttenindustrie. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Springer Verlag Wien New York, 139. Jg., Heft 11, S.391 – 408, 1994

8 Anhang

Abbildungen und Tabellen:

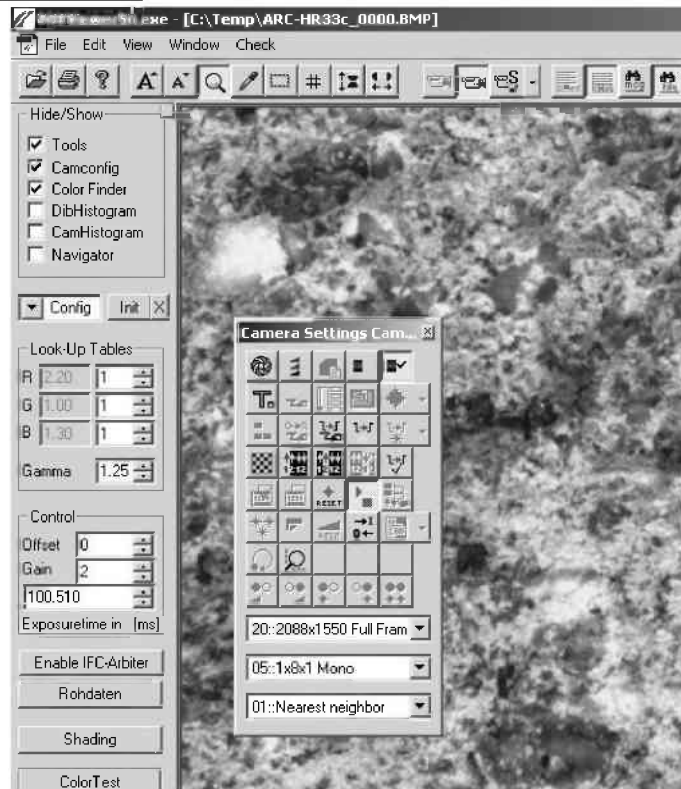


Abb. 81: Screenshot der Kamerasoftware SDK Viewer

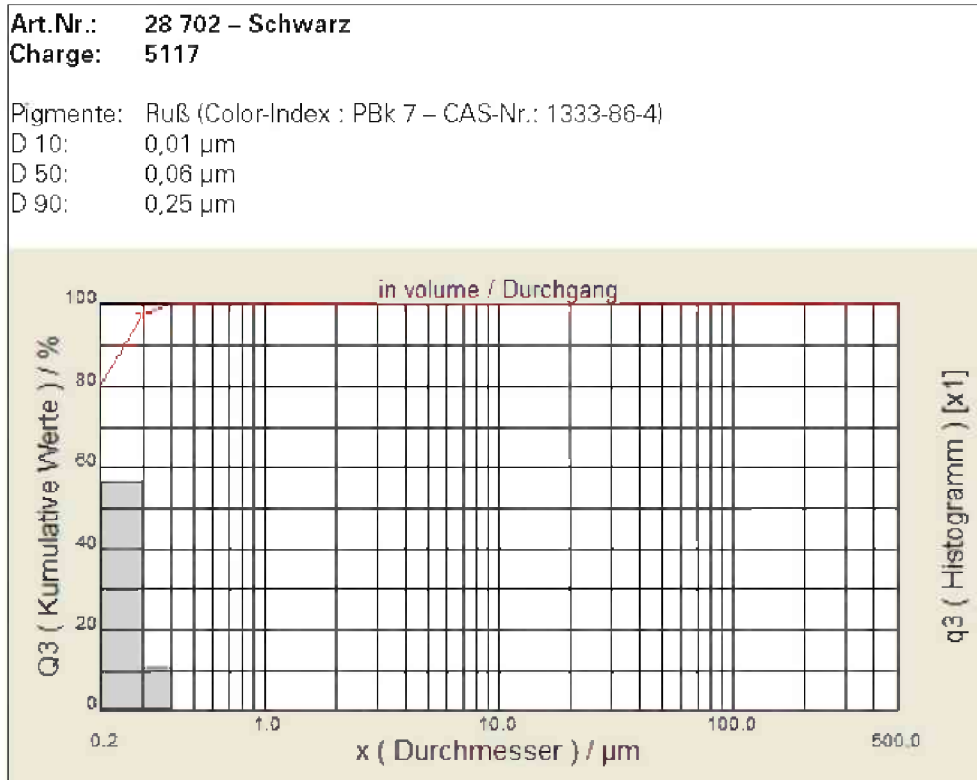


Abb. 82: Korngrößenanalyse der Airbrushfarbe Supra schwarz [84]

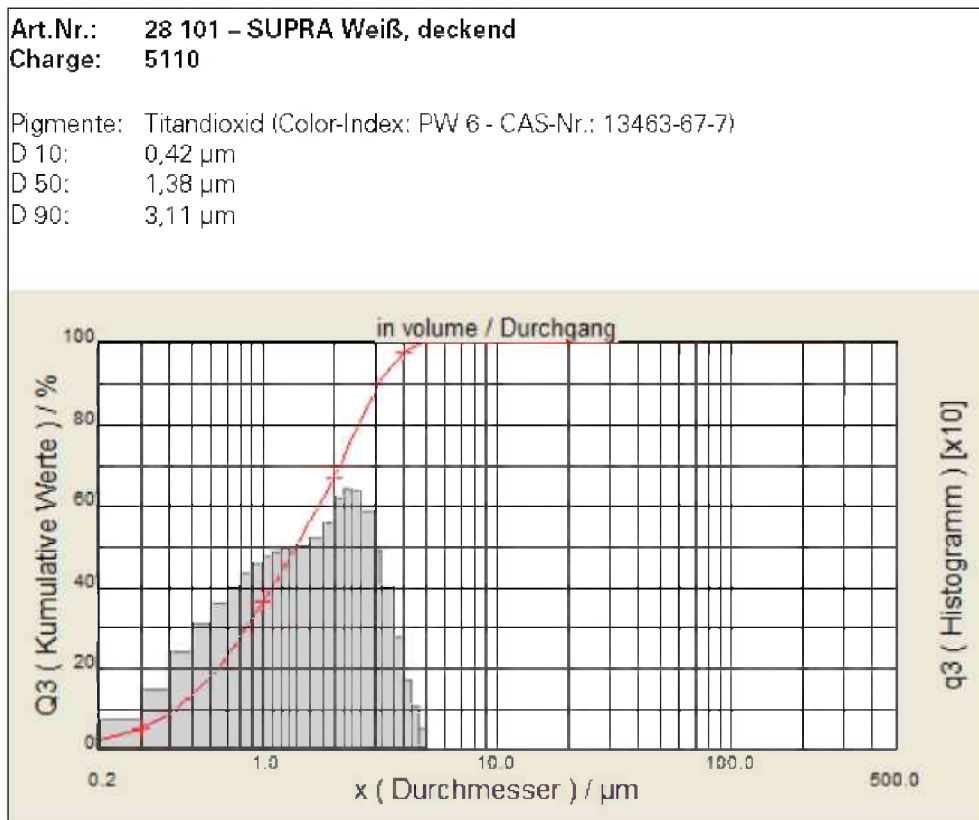


Abb. 83: Korngrößenanalyse der Airbrushfarbe Supra weiß [84]

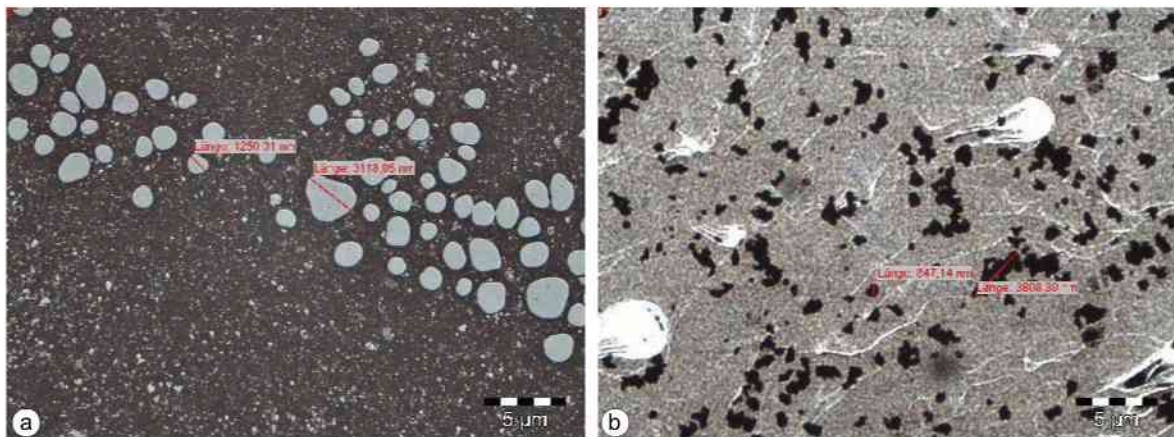


Abb. 84: Lichtmikroskopische Darstellung von Farbpigmenten auf dem Objektträger zur Vermessung der Pigmentgröße der Farbe „Supra weiß“ (a) und der Farbe „schwarz“ (b)

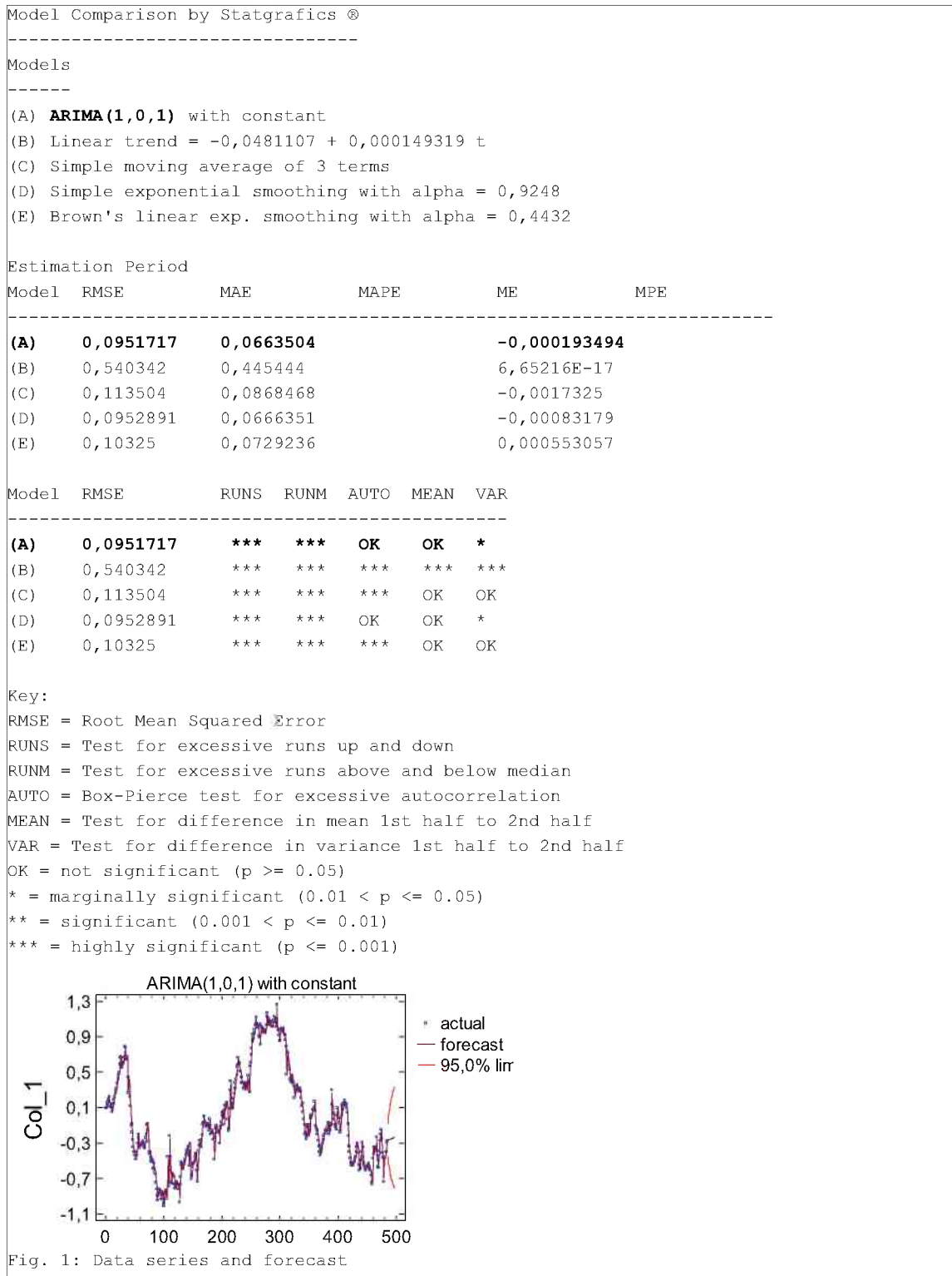


Abb. 85: Modellanalyse an einem Profil der Sorte A

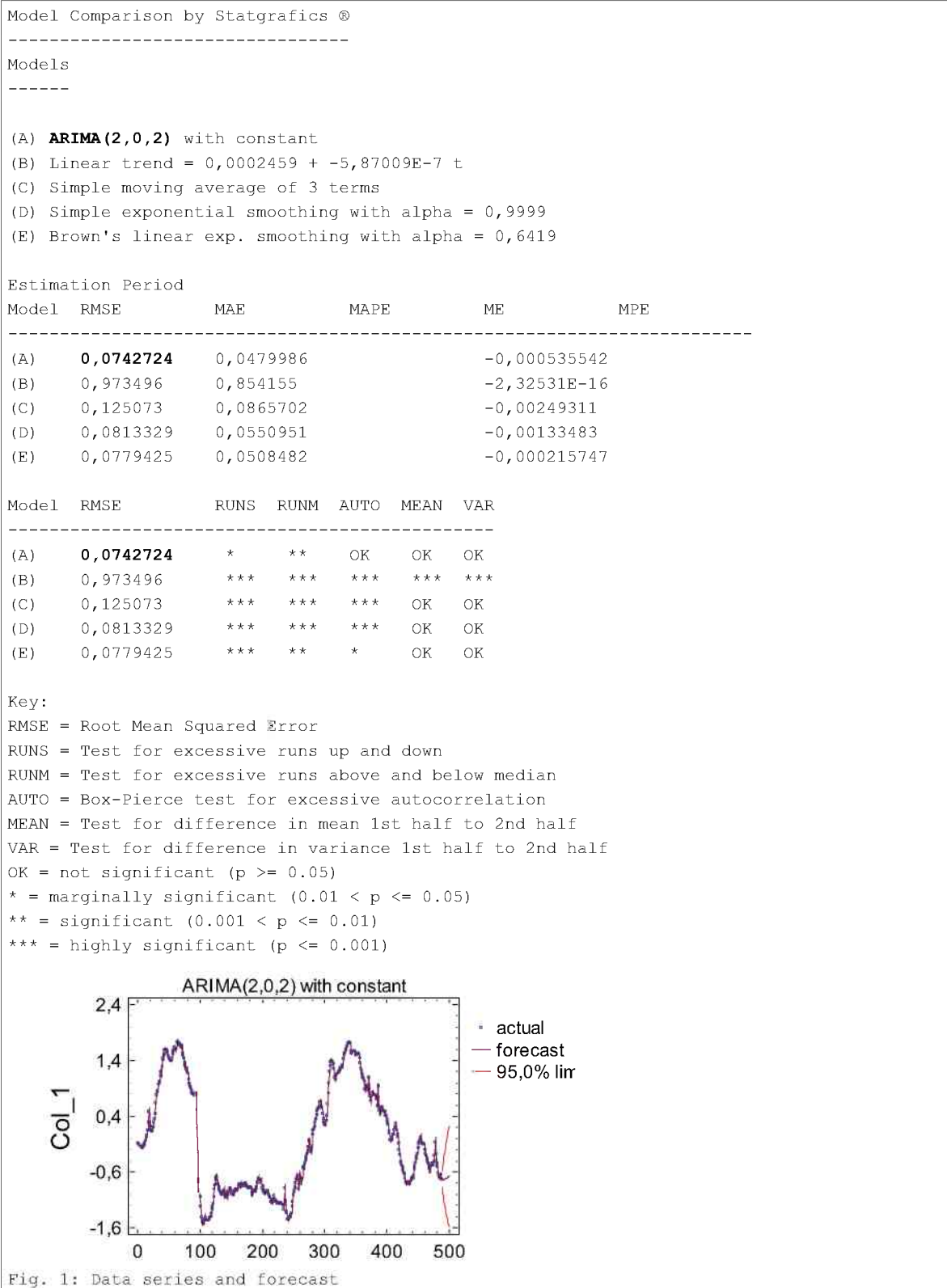


Abb. 86: Modellanalyse an einem Profil der Sorte B

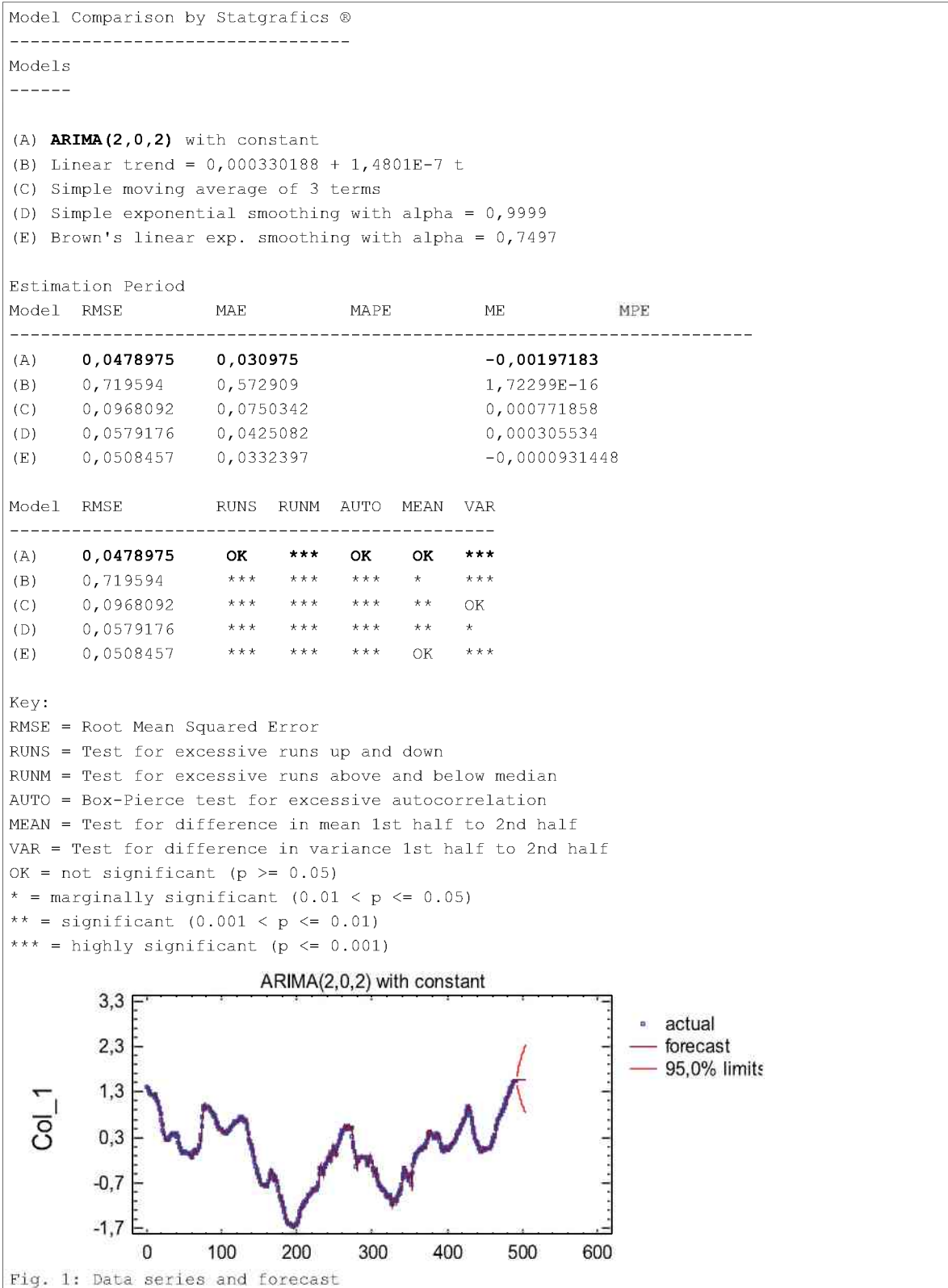


Abb. 87: Modellanalyse an einem Profil der Sorte C

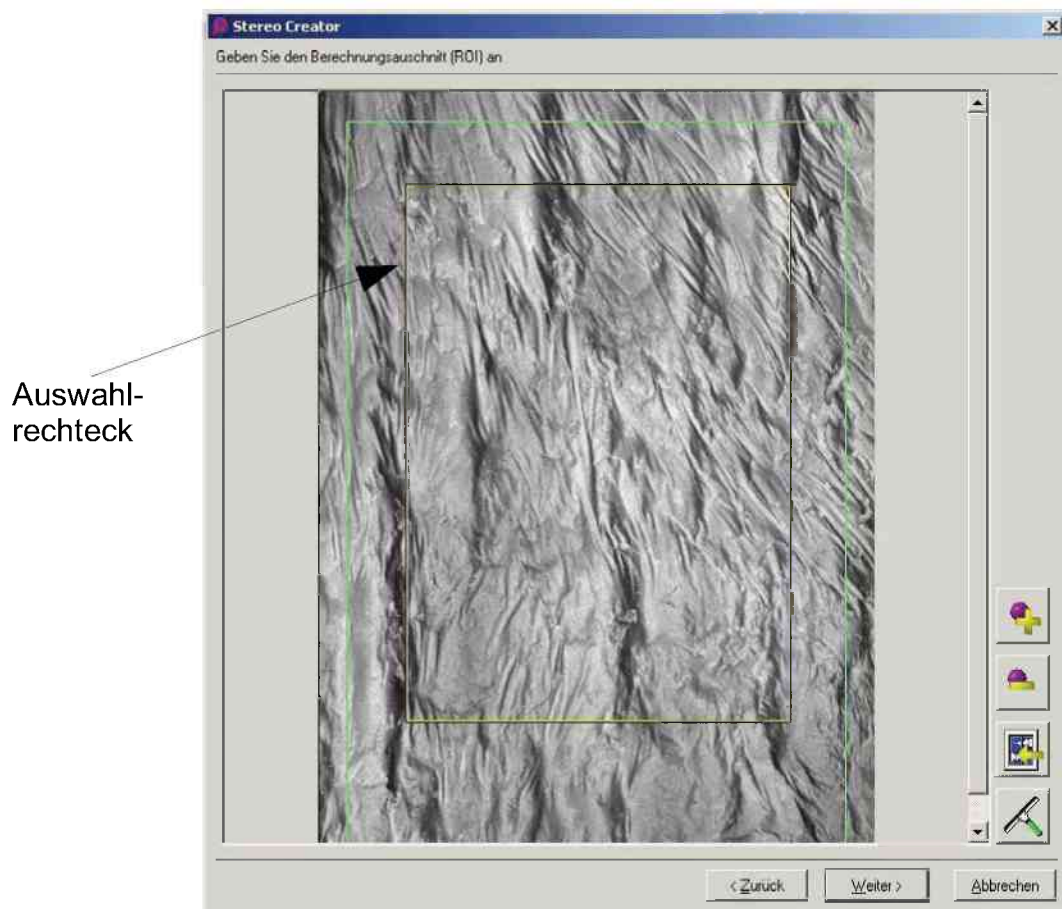


Abb. 88: Screenshot des Programmteiles StereoCreator in MeX 4.1, der Berechnungsausschnittes ist gelb dargestellt

| Probe | E [Gpa] | G_f [N·m ⁻¹] | σ_{NT} [Mpa] | $F_{H \max}$ [N] | l_{ch} [mm] | ξ_{MW} [mm] |
|-------|------------|-------------------------------|------------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| 1 | 107 | 102,5 | 13,0 | 6342 | 64,6 | 0,134 |
| 2 | 107 | 99,3 | 13,6 | 6536 | 57,1 | 0,085 |
| 3 | 107 | 111,6 | 12,0 | 5863 | 82,8 | 0,108 |
| 4 | 107 | 118,4 | 11,6 | 5727 | 93,5 | 0,127 |
| 5 | 107 | 113,7 | 10,2 | 5611 | 116,2 | 0,106 |
| 6 | 107 | 116,5 | 14,0 | 6559 | 64,1 | 0,135 |
| 7 | 107 | 109,4 | 12,6 | 6094 | 73,4 | 0,185 |
| 8 | 107 | 126 | 11,2 | 5512 | 108,3 | 0,109 |
| 9 | 107 | 108,9 | 11,4 | 5402 | 90,2 | 0,110 |
| 10 | 107 | 115,2 | 12,9 | 6260 | 74,0 | 0,103 |
| 11 | 107 | 142,4 | 13,3 | 6275 | 86,4 | 0,114 |
| 12 | 107 | 127 | 10,5 | 5098 | 123,0 | 0,185 |
| 13 | 107 | 103,9 | 11,8 | 5775 | 79,7 | 0,128 |
| 14 | 107 | 119,6 | 12,3 | 5940 | 85,1 | 0,103 |

Tab. 23: Bruchmechanische Kennwerte der Probenserie A; die laterale Korrelationslänge ξ_{MW} ist der Mittelwert beider Bruchoberflächen einer Keilspaltprobe

| Probe | E [Gpa] | G _f [N·m ⁻¹] | σ _{NT} [Mpa] | F _{H max} [N] | I _{ch} [mm] | ξ _{MW} [mm] |
|-------|------------|--|--------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 73,8 | 141,9 | 7,6 | 3684 | 179,9 | 0,36 |
| 2 | 73,8 | 149,9 | 8,9 | 4239 | 140,6 | 0,38 |
| 3 | 73,8 | 134,4 | 6,6 | 3232 | 227,0 | 0,36 |
| 4 | 73,8 | 127,8 | 7,0 | 3358 | 193,0 | 0,36 |
| 5 | 73,8 | 135,3 | 7,5 | 3586 | 176,1 | 0,36 |
| 6 | 73,8 | 112,3 | 6,9 | 3098 | 173,4 | 0,35 |
| 7 | 73,8 | 130,2 | 7,9 | 3532 | 154,6 | 0,35 |
| 8 | 73,8 | 130,5 | 7,5 | 3383 | 168,9 | 0,37 |
| 9 | 73,8 | 120,2 | 7,1 | 3198 | 174,1 | 0,33 |
| 10 | 73,8 | 133,4 | 7,1 | 3191 | 194,2 | 0,41 |
| 11 | 73,8 | 130,2 | 6,7 | 2988 | 216,1 | 0,38 |
| 12 | 73,8 | 121,9 | 7,4 | 3321 | 163,8 | 0,40 |
| 13 | 73,8 | 103,9 | 7,9 | 3549 | 122,2 | 0,32 |
| 14 | 73,8 | 131,1 | 6,8 | 3042 | 209,9 | 0,42 |
| 15 | 73,8 | 141,4 | 7,0 | 3121 | 215,0 | 0,35 |

Tab. 24: Bruchmechanische Kennwerte der Probenserie B; die laterale Korrelationslänge ξ_{MW} ist der Mittelwert beider Bruchoberflächen einer Keilspaltprobe

| Probe | E [Gpa] | G _f [N·m ⁻¹] | σ _{NT} [Mpa] | F _{H max} [N] | I _{ch} [mm] | ξ _{MW} [mm] |
|-------|------------|--|--------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 27,9 | 229,6 | 3,3 | 1619 | 603,9 | 0,43 |
| 2 | 28,8 | 220,5 | 3,8 | 1880 | 449,7 | 0,59 |
| 3 | 27,8 | 249,6 | 3,8 | 1832 | 470,3 | 0,62 |
| 4 | 27,9 | 267 | 3,5 | 1732 | 616,4 | 0,55 |
| 5 | 28,5 | 253,4 | 4,0 | 2032 | 448,7 | 0,50 |
| 6 | 31,1 | 256,5 | 3,4 | 1755 | 694,3 | 0,59 |
| 7 | 25,9 | 203,6 | 3,2 | 1620 | 515,0 | 0,48 |
| 8 | 31,1 | 245,8 | 3,0 | 1559 | 832,2 | 0,57 |
| 9 | 27,8 | 259,5 | 3,1 | 1577 | 742,9 | 0,50 |
| 10 | 24,9 | 259,5 | 3,0 | 1523 | 714,0 | 0,59 |

Tab. 25: Bruchmechanische Kennwerte der Probenserie C; die laterale Korrelationslänge ξ_{MW} ist der Mittelwert beider Bruchoberflächen einer Keilspaltprobe

| Probenserie A | | | | | Probenserie B | | | | | Probenserie C | | | | |
|---------------------------------|--------------|--------------|------------|-----------------------|---------------------------------|--------------|--------------|------------|-----------------------|---------------------------------|--------------|--------------|------------|-----------------------|
| Nr. | Probenhälfte | ξ [mm] | ξ_{MW} | $\Delta\xi_{rel}$ [%] | Nr. | Probenhälfte | ξ [mm] | ξ_{MW} | $\Delta\xi_{rel}$ [%] | Nr. | Probenhälfte | ξ [mm] | ξ_{MW} | $\Delta\xi_{rel}$ [%] |
| 1 | 1 | 0,138 | | | 1 | 1 | 0,348 | | | 1 | 1 | 0,457 | | |
| | 2 | 0,129 | 0,13 | 6,7 | | 2 | 0,364 | 0,356 | 4,6 | | 2 | 0,404 | 0,431 | 12,3 |
| 2 | 1 | 0,078 | | | 2 | 1 | 0,394 | | | 2 | 1 | 0,543 | | |
| | 2 | 0,091 | 0,08 | 15,4 | | 2 | 0,374 | 0,384 | 5,3 | | 2 | 0,634 | 0,588 | 15,4 |
| 3 | 1 | 0,109 | | | 3 | 1 | 0,352 | | | 3 | 1 | 0,580 | | |
| | 2 | 0,107 | 0,11 | 1,9 | | 2 | 0,365 | 0,358 | 3,5 | | 2 | 0,665 | 0,622 | 13,7 |
| 4 | 1 | 0,124 | | | 4 | 1 | 0,374 | | | 4 | 1 | 0,585 | | |
| | 2 | 0,129 | 0,13 | 4,0 | | 2 | 0,339 | 0,356 | 9,8 | | 2 | 0,510 | 0,548 | 13,6 |
| 5 | 1 | 0,104 | | | 5 | 1 | 0,375 | | | 5 | 1 | 0,483 | | |
| | 2 | 0,108 | 0,11 | 3,8 | | 2 | 0,353 | 0,364 | 5,9 | | 2 | 0,508 | 0,495 | 5,0 |
| 6 | 1 | 0,122 | | | 6 | 1 | 0,339 | | | 6 | 1 | 0,566 | | |
| | 2 | 0,147 | 0,13 | 18,6 | | 2 | 0,355 | 0,347 | 4,5 | | 2 | 0,606 | 0,586 | 6,8 |
| 7 | 1 | 0,201 | | | 7 | 1 | 0,351 | | | 7 | 1 | 0,475 | | |
| | 2 | 0,169 | 0,19 | 17,3 | | 2 | 0,346 | 0,349 | 1,4 | | 2 | 0,479 | 0,477 | 0,8 |
| 8 | 1 | 0,113 | | | 8 | 1 | 0,376 | | | 8 | 1 | 0,560 | | |
| | 2 | 0,105 | 0,11 | 7,3 | | 2 | 0,366 | 0,371 | 2,6 | | 2 | 0,586 | 0,573 | 4,6 |
| 9 | 1 | 0,108 | | | 9 | 1 | 0,310 | | | 9 | 1 | 0,504 | | |
| | 2 | 0,111 | 0,11 | 2,7 | | 2 | 0,353 | 0,332 | 12,8 | | 2 | 0,496 | 0,500 | 1,7 |
| 10 | 1 | 0,098 | | | 10 | 1 | 0,388 | | | 10 | 1 | 0,556 | | |
| | 2 | 0,108 | 0,1 | 9,7 | | 2 | 0,425 | 0,406 | 9,1 | | 2 | 0,624 | 0,590 | 11,6 |
| 11 | 1 | 0,105 | | | 11 | 1 | 0,380 | | | 11 | 1 | 0,380 | | |
| | 2 | 0,122 | 0,11 | 15,0 | | 2 | 0,381 | 0,380 | 0,4 | | 2 | 0,393 | | |
| 12 | 1 | 0,164 | | | 12 | 1 | 0,393 | | | 12 | 1 | 0,406 | | |
| | 2 | 0,205 | 0,18 | 22,2 | | 2 | 0,406 | 0,399 | 3,3 | | 2 | 0,296 | | |
| 13 | 1 | 0,131 | | | 13 | 1 | 0,296 | | | 13 | 1 | 0,296 | | |
| | 2 | 0,125 | 0,13 | 4,7 | | 2 | 0,351 | 0,323 | 16,9 | | 2 | 0,351 | 0,323 | 16,9 |
| 14 | 1 | 0,103 | | | 14 | 1 | 0,388 | | | 14 | 1 | 0,388 | | |
| | 2 | 0,103 | 0,1 | 0,0 | | 2 | 0,452 | 0,420 | 15,1 | | 2 | 0,452 | 0,420 | 15,1 |
| 15 | 1 | | | | 15 | 1 | 0,349 | | | 15 | 1 | 0,349 | | |
| | 2 | | | | | 2 | 0,346 | 0,348 | 0,8 | | 2 | 0,346 | 0,348 | 0,8 |
| MW | | 0,123 | -- | 9,2 | MW | | 0,368 | -- | 6,8 | MW | | 0,541 | -- | 8,5 |
| v_{ξ} [%] | | 24,3 | -- | -- | v_{ξ} [%] | | 8,4 | -- | -- | v_{ξ} [%] | | 12,3 | -- | -- |

Tab. 26: Fraktografische Parameter (ξ , ξ_{MW} , Variationskoeffizient v_{ξ}) beider Bruchflächen (1, 2) einer Keilspaltprobe

| Probe | E [Gpa] | G_f [$N \cdot m^{-1}$] | σ_{NT} [Mpa] | $F_{H \max}$ [N] | l_{ch} [mm] | ξ [mm] |
|-------|---------|----------------------------|---------------------|------------------|---------------|------------|
| 1 | 107 | 119,6 | 12,3 | 5937 | 85,1 | 0,105 |
| 2 | 107 | 135,8 | 11,5 | 5577 | 110,4 | 0,230 |
| 3 | 107 | 99,3 | 13,6 | 6538 | 57,1 | 0,084 |
| 4 | 107 | 102,5 | 13,0 | 6343 | 64,6 | 0,133 |
| 5 | 107 | 111,6 | 12,0 | 5863 | 82,8 | 0,108 |
| 6 | 107 | 118,4 | 11,6 | 5726 | 93,5 | 0,126 |
| 7 | 107 | 113,7 | 10,2 | 5611 | 116,2 | 0,106 |
| 8 | 107 | 118,7 | 14,6 | 6933 | 59,5 | 0,196 |
| 9 | 107 | 116,5 | 13,9 | 6561 | 64,1 | 0,134 |
| 10 | 107 | 109,4 | 12,6 | 6092 | 73,4 | 0,185 |
| 11 | 107 | 126 | 11,2 | 5514 | 108,3 | 0,109 |
| 12 | 107 | 108,9 | 11,4 | 5400 | 90,2 | 0,109 |
| 13 | 107 | 115,2 | 12,9 | 6258 | 74,0 | 0,103 |
| 14 | 107 | 142,4 | 13,3 | 6275 | 86,4 | 0,114 |
| 15 | 107 | 127 | 10,5 | 5097 | 123,0 | 0,185 |
| 16 | 107 | 103,9 | 11,8 | 5777 | 79,7 | 0,128 |
| 17 | 107 | 119,6 | 12,3 | 5937 | 85,1 | 0,105 |

Tab. 27: Bruchmechanische Kennwerte und laterale Korrelationslänge ξ der Probenserie A

| Probe | E [Gpa] | G _f [N·m ⁻¹] | σ _{NT} [Mpa] | F _{H max} [N] | I _{ch} [mm] | ξ [mm] |
|-------|------------|--|--------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------|
| 1 | 73,8 | 142 | 8,1 | 3975 | 160,5 | 0,347 |
| 2 | 73,8 | 131,8 | 7,6 | 3672 | 168,0 | 0,341 |
| 3 | 73,8 | 156,9 | 6,9 | 3352 | 245,3 | 0,331 |
| 4 | 73,8 | 144,8 | 7,8 | 3827 | 176,1 | 0,298 |
| 5 | 73,8 | 134,3 | 7,3 | 3541 | 184,5 | 0,309 |
| 6 | 73,8 | 141,9 | 7,8 | 3707 | 173,5 | 0,297 |
| 7 | 78,5 | 123,4 | 7,0 | 3409 | 196,0 | 0,290 |
| 8 | 73,8 | 135,6 | 7,3 | 3529 | 189,3 | 0,306 |
| 9 | 73,8 | 112,9 | 7,2 | 3506 | 159,4 | 0,293 |
| 10 | 73,8 | 128,9 | 6,9 | 3295 | 201,6 | 0,317 |
| 11 | 84,8 | 125,6 | 8,9 | 4404 | 136,0 | 0,330 |
| 12 | 73,8 | 125,9 | 7,0 | 3318 | 191,8 | 0,290 |
| 13 | 73,8 | 158,7 | 7,8 | 3483 | 193,8 | 0,279 |

Tab. 28: Bruchmechanische Kennwerte und laterale Korrelationslänge ξ der Probenserie B

| Probe | E [Gpa] | G _f [N·m ⁻¹] | σ _{NT} [Mpa] | F _{H max} [N] | I _{ch} [mm] | ξ [mm] |
|-------|------------|--|--------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------|
| 1 | 31,1 | 256,5 | 3,4 | 1755 | 694,3 | 0,490 |
| 2 | 25,9 | 203,6 | 3,2 | 1620 | 515 | 0,430 |
| 3 | 27,8 | 259,5 | 3,1 | 1577 | 742,9 | 0,470 |
| 4 | 31,1 | 245,8 | 3,03 | 1559 | 832,2 | 0,490 |
| 5 | 29,1 | 236,7 | 3,15 | 1582 | 692,1 | 0,390 |
| 6 | 22,9 | 165,9 | 2,47 | 1269 | 621,8 | 0,430 |
| 7 | 22,9 | 198,4 | 2,61 | 1198 | 666,9 | 0,560 |
| 8 | 24,9 | 173,7 | 2,2 | 1107 | 893,2 | 0,480 |
| 9 | 28,5 | 253,4 | 4,0 | 2032 | 448,7 | 0,514 |
| 10 | 28,8 | 239,3 | 3,5 | 1760 | 571,2 | 0,502 |
| 11 | 24,9 | 259,5 | 3,0 | 1523 | 714,0 | 0,535 |
| 12 | 27,9 | 229,6 | 3,3 | 1619 | 603,9 | 0,440 |
| 13 | 29,1 | 180,3 | 4,0 | 2009 | 320,7 | 0,544 |
| 14 | 31,7 | 210,2 | 2,6 | 1267 | 1003,8 | 0,452 |
| 15 | 31,7 | 244,1 | 2,6 | 1263 | 1171,6 | 0,524 |
| 16 | 28,8 | 220,5 | 3,8 | 1880 | 449,7 | 0,535 |
| 17 | 27,8 | 249,6 | 3,8 | 1832 | 470,3 | 0,439 |
| 18 | 27,9 | 267 | 3,5 | 1732 | 616,4 | 0,501 |

Tab. 29: Bruchmechanische Kennwerte und laterale Korrelationslänge ξ der Probenserie C

| Probe | Nr. | E [Gpa] | G _f [N·m ⁻¹] | σ _{NT} [MPa] | F _{H max} [N] | l _{ch} [mm] | ξ [mm] |
|-------|-----|------------|--|--------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------|
| A | 1 | 98 | 118,99 | 12,5 | 6215 | 75,0 | 0,17 |
| | 2 | 99,1 | 116,83 | 13,7 | 6902 | 61,4 | 0,18 |
| | 3 | 99,3 | 109,23 | 14,0 | 6876 | 55,3 | 0,20 |
| B | 1 | 69,2 | 132,2 | 7,3 | 3686 | 169,6 | 0,34 |
| | 2 | 74,4 | 154,9 | 7,4 | 3705 | 211,1 | 0,37 |
| | 3 | 86 | 142,79 | 8,5 | 4233 | 168,9 | 0,39 |
| C | 1 | 28,5 | 253,4 | 4,0 | 2032 | 448,7 | 0,52 |
| | 2 | 25,9 | 203,6 | 3,2 | 1619 | 515,0 | 0,43 |
| | 3 | 27,8 | 259,5 | 3,1 | 1577 | 742,9 | 0,48 |
| | 4 | 27,9 | 267 | 3,5 | 1732 | 616,4 | 0,51 |
| | 5 | 31,1 | 245,8 | 3,0 | 1559 | 832,2 | 0,56 |
| D | 1 | 43,5 | 120,83 | 6,4 | 3181 | 127,1 | 0,25 |
| | 2 | 41 | 107,29 | 6,2 | 3136 | 114,0 | 0,20 |
| | 3 | 41 | 117,88 | 5,6 | 2837 | 155,1 | 0,21 |
| E | 1 | 13,1 | 149,6 | 4,1 | 1870 | 118,8 | 0,30 |
| | 2 | 13,8 | 187,42 | 4,0 | 1730 | 164,9 | 0,35 |
| | 3 | 12,4 | 233,25 | 3,7 | 1669 | 210,4 | 0,34 |
| F | 1 | 26,5 | 82,4 | 3,3 | 1664 | 197,1 | 0,34 |
| | 2 | 26,9 | 102,76 | 3,6 | 1842 | 209,2 | 0,36 |
| | 3 | 25,8 | 78,13 | 3,1 | 1552 | 206,8 | 0,36 |
| G | 1 | 9,4 | 137,64 | 2,0 | 991 | 322,2 | 0,39 |
| | 2 | 9,4 | 161,28 | 2,5 | 1254 | 237,8 | 0,33 |
| | 3 | 8,5 | 105,57 | 1,9 | 931 | 252,3 | 0,31 |

Tab. 30: Detailergebnisse der Untersuchungen an basischen Feuerfeststeinen mit unterschiedlichem Bindungstyp

| Probe | Nr. | R _s | D _s | P _{dq} |
|-------|-----|----------------|----------------|-----------------|
| I | 1 | 1,56 | 2,069 | 0,83 |
| | 2 | 1,49 | 2,070 | 0,84 |
| J | 1 | 1,59 | 2,071 | 0,81 |
| | 2 | 1,55 | 2,079 | 0,89 |
| | 3 | 1,44 | 2,058 | 0,73 |
| K | 1 | 1,59 | 2,068 | 0,85 |
| | 2 | 1,32 | 2,044 | 0,61 |
| L | 1 | 1,47 | 2,069 | 0,81 |
| | 2 | 1,57 | 2,083 | 0,89 |
| | 3 | 1,48 | 2,064 | 0,75 |
| M | 1 | 1,45 | 2,063 | 0,76 |
| | 2 | 1,44 | 2,062 | 0,73 |
| | 3 | 1,49 | 2,066 | 0,77 |
| | 4 | 1,48 | 2,062 | 0,72 |
| N | 1 | 1,44 | 2,061 | 0,73 |

Tab. 31: Rauigkeitsanalysen und fraktale Dimension der Mörtelproben

Berechnung der vertikalen Auflösung in Abhängigkeit vom Kippwinkel:

Gemäß Gleichung (18) ergibt sich die vertikale Auflösung durch Multiplikation der lateralen Auflösung mit $(2 \cdot \sin \alpha)^{-1}$. In Tabelle 32 ist diese Abhängigkeit für eine laterale Auflösung von 98 μm dargestellt.

| Kippwinkel 2α [°] | Vertikale Auflösung [μm] |
|--|---|
| 5 | 574 |
| 10 | 288 |
| 15 | 193 |
| 20 | 146 |

Tab. 32: Abhängigkeit der vertikalen Auflösung vom Kippwinkel