

# 3. Fraktografie

## 3.1 Fraktografische Grundlagen

Die Betrachtung der Bruchoberflächen kann visuell, makroskopisch oder mikroskopisch erfolgen. Glas und Keramik bricht mit der Ausprägung ähnlicher Merkmale der Bruchoberflächen. Der Unterschied zwischen einer Keramik und einem Glaswerkstoff ist der strukturelle Aufbau. Während Keramiken einen kristallinen Aufbau haben (Fernordnung), weist Glas einen amorphen Aufbau auf (Nahordnung). In der Regel ist es aufgrund seiner Struktur und Transparenz deutlich einfacher, die Bruchoberflächen von Glas zu beurteilen gegenüber denen von Keramiken, da die Merkmale von Gläsern dadurch auch meist wesentlich deutlicher erkennbar sind.

Die Grundausstattung kann aus mehreren Lupen mit unterschiedlichen Vergrößerungen, günstigerweise auch mit Beleuchtung, bestehen. Zur wesentlich detaillierteren Betrachtung bieten sich Mikroskope an. Einfache, aber schon sehr gute digitale Mikroskope bieten Vergrößerungen von ca. 20- bis 200-fach. Wo dies nicht ausreicht, sind optische Mikroskope mit bis zu 1.500-facher Vergrößerung einsetzbar.

Neben einer guten makroskopischen und mikroskopischen Ausstattung ist auch eine entsprechend starke Beleuchtung wichtig. Zur Erkennung von detaillierten Oberflächenstrukturen ist meist eine streifende Belichtung der Probenoberfläche geeignet.

Auf die im Labormaßstab oft auch mögliche Verwendung von Rasterelektronen-Mikroskopen (REM) wird hier nicht eingegangen. Sehr detaillierte Untersuchungen von Gläsern und Keramiken können bei Quinn (2020) [65] nachgelesen werden.

Charakteristisch für sehr langsames und energiearmes (subkritisches) Risswachstum sind glatte Rissoberflächen. Bei zunehmender Geschwindigkeit des Risswachstums bildet sich die glatte Bruchspiegelfläche, sie kennzeichnet den Bereich, in dem die Geschwindigkeit des Risswachstums auf die volle Endgeschwindigkeit im Glas beschleunigt. Dadurch entsteht diese glatte Bruchfläche. Je schneller und energiereicher sich der Riss nun ausbreitet, um so rauer werden die Rissoberflächen bis hin zur Rissverzweigung. Die maximal erreichbare Rissgeschwindigkeit in Glas beträgt ca. 1.500 m/sec. Dies entspricht etwa 40 % – 50 % der Rayleigh'schen Wellengeschwindigkeit. Eine noch höhere Rissbeschleunigung ist nicht mehr möglich, da eine Energiedissipation durch Entstehen von Aufrauungen der Rissoberfläche und Mikrorissverzweigungen bis hin zur Rissverzweigung stattfindet, welche keine weitere Erhöhung der Rissgeschwindigkeit zulässt.

Anschließend an diesen glatten Bruchspiegel (mirror) bildet sich die Rauzone (mist), die diese glatte Fläche umgibt, wobei der Übergang fließend erfolgt (siehe nachfolgenden Abschnitt

3.3.1 „Bruchspiegel“). Im weiteren Verlauf der Bruchfortschreitung mit dieser immer größer werdenden Rauzone entstehen Lanzettbrüche (hackle), also eine noch deutlich stärkere, langsam zunehmende Rauheit. Die Größe des Bruchspiegelradius  $R_o$ ,  $R_i$  oder  $R_b$  steht im Verhältnis zur bruchauslösenden Spannung  $\sigma_B$ . Die empirische Beziehung wurde, wie bereits in der Einführung erwähnt, von Orr bereits 1953 [55] entdeckt, jedoch erst viel später veröffentlicht und lautet:

$$\sigma_B \times R^{1/2} = A \quad [1]$$

Dabei bezeichnet  $\sigma_B$  die bruchauslösende Spannung, A ist die Bruchspiegelkonstante und R der Bruchspiegelradius. Die Bruchspiegelkonstanten A wurden für Kalk-Natron-Silikatglas von Marschall, Mecholsky und vielen anderen im Labor ermittelt. In den Abschnitten 4.3 „Orr’sche Gleichung – Bruchspannungserrechnung“ und 4.4 „Bruchspiegelkonstante“ wird auf diese Gleichung näher eingegangen.

## 3.2 Bruchausgang

Der Bruchausgang, die Stelle mit dem bruchauslösenden Initialriss, ist für jeden Fraktografen diejenige Stelle, die er als Erstes sucht. Sie zu lokalisieren, ist die fraktografische Grundlage einer jeden Begutachtung.

Grundsätzlich liegt jedem Glasbruch eine Überbeanspruchung des Materials zugrunde. Dies kann eine kurzzeitige lokale Überbeanspruchung durch hohe Spannungsspitzen oder inhomogene Lastverteilung sein. Einwirkende Spannungskonzentrationen werden durch vorhandene Materialfehler wie z. B. Einschlüsse, Lunken, Mikrorisse, Inhomogenitäten, Versetzungen etc. noch verstärkt. Solche kleinsten Diskontinuitäten sind spannungsverstärkend und führen an diesen Stellen bei übermäßiger Belastung zum Bruch. In der Praxis muss also immer eine entsprechende Einwirkung vorhanden sein, denn kein Glasbruch entsteht ohne jegliche Einwirkungen. Zweitens muss auch eine Diskontinuität vorhanden sein, an der die Bruchauslösung erfolgen kann. Die Bruchentstehung ist somit eine Kombination aus der Überlagerung ungünstiger Einwirkungen.

Glas als realer Werkstoff kann auf der gesamten Oberfläche zahlreiche und unvermeidbare Diskontinuitäten aufweisen. Strukturelle Fehler sind Entmischungen, Mikroheterogenitäten, Versetzungen und Einschlüsse. Weitere Diskontinuitäten an der Oberfläche, an der Kante oder auch im Material können Kratzer, Risse, Kerben und Einschlüsse sein.

## 3.3 Der Bruchbeginn

Bereits 1937 schreibt Professor Dr. Adolf Smekal in den Glastechnischen Berichten [86]

„Der Bruch geht von

**einer dem Glasstück eigentümlichen Stelle**

*aus und schreitet im Allgemeinen senkrecht zur größten Hauptspannung der augenblicklichen elastischen Spannungsverteilung im Glase fort. Wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Bruches verhältnismäßig gering ist, werden spiegelnd-glatte Bruchflächen gebildet. Bei großen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten dagegen entstehen raue Bruchflächenteile; hierbei treten die größten Spannungen auf und nur hier werden auch Verzweigungen der Bruchflächen beobachtet.“*

Diese von Dr. Smekal beschriebene „eigentümliche Stelle“ ist der Bruchausgang. Um diesen bildet sich der Bruchspiegel aus, eine für spröde, keramische Materialien charakteristische Stelle (siehe Abbildungen 3.1 ff.). Für den Fraktografen ist dies das Hauptziel seiner Untersuchung, also die Bestimmung des Bruchursprungs, da an diesem einige wesentliche Fragestellungen beantwortet werden können:

- Warum ist das Glas gebrochen?
- Von wo aus ist das Glas gebrochen?
- Wie groß war die bruchauslösende Spannung?

Am Bruchbeginn befindet sich immer ein Bruchspiegel. Er entsteht im Zentrum der zum Bruch führenden Belastung, er ist also meist genau im Mittelpunkt des Bruchausgangs. Der Bruch (Initialriss) beginnt an einer vorhandenen Unregelmäßigkeit, einer Kerbstelle oder Ähnlichem. Das Besondere an diesem Bruchspiegel ist, dass er bei langsamer Rissausbreitung und geringer Spannung entsprechend deutlicher erkennbar ist. Bei entsprechend großer Schädigung und kleiner Energie entsteht ein extrem großer Bruchspiegel, der die genaue Lokalisierung dadurch erschwert. Je höher die einwirkende Energie, desto schneller ist die Bruchausbreitung. Damit wird der Bruchspiegel mit zunehmender Bruchenergie immer kleiner.

Die Ausgangsstelle des Bruchs wird grundsätzlich in zwei Gruppen unterteilt:

- a) Oberflächenfehler
- b) Volumenfehler im Material

Es muss also immer eine kritische Fehlstelle (Diskontinuität) vorhanden sein, an der eine entsprechende mechanische, thermische oder chemische Einwirkung vorhanden ist. Dadurch

kommt es mit zunehmender Spannungsintensität an der Risspitze zu einem entsprechenden Risswachstum. Ohne einwirkende Spannung kann sich der Riss nicht fortpflanzen.

### 3.3.1 Bruchspiegel

Je nachdem, ob der Bruchbeginn innerhalb des Glases oder an dessen Oberfläche oder Kante entsteht, bilden sich auch etwas unterschiedliche Bruchspiegel aus. Diese können kreisförmig, halbkreisförmig, langgezogen oder auch hochgestreckt sein. Das Aussehen des Bruchspiegels hängt dabei von der Lage der Diskontinuität, der Glasdicke, der Art der einwirkenden Spannung und der bereits vorhandenen Eigenspannung (Zug- oder Druckspannung, z. B. bei vorgespannten Gläsern) ab.

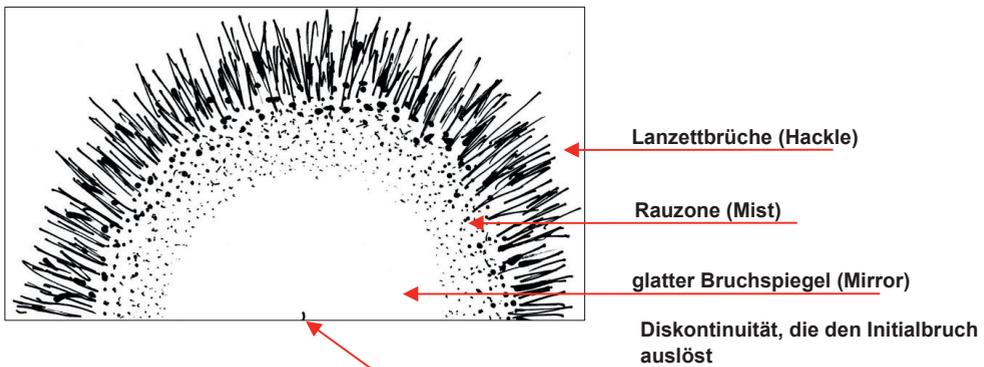


Abb. 3.1: Schematisch dargestellter Bruchbeginn, Halbkreis-Bruchspiegel, wie er beispielsweise an der Oberfläche oder der Kante des Glases entsteht.

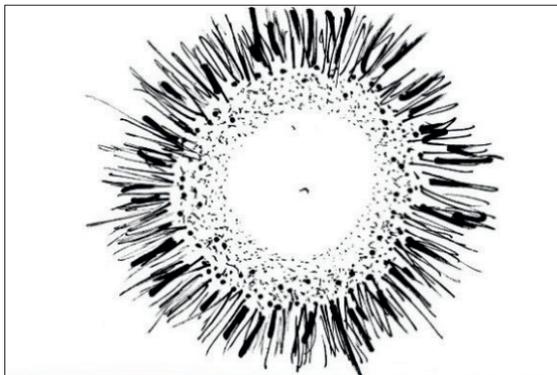


Abb. 3.2: Schematisch dargestellter, kreisförmiger Bruchbeginn innerhalb der Glasmasse (relativ selten) mit Diskontinuität im Zentrum, von der dieser Bruch ausgeht.

Abhängig von der Art der einwirkenden Spannung (mechanisch oder thermisch) und der Position der Diskontinuität, entstehen etwas unterschiedliche Bruchspiegel, wie nachfolgend dargestellt.



Abb. 3.3: Durch mechanische Belastung an der Oberfläche verursachter Bruchspiegel.

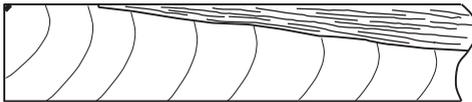


Abb. 3.4: Durch Biegespannung und Fehlstelle im Eckbereich verursachter Biegebruch mit sich stark öffnendem Bruchspiegel im Eckbereich, Rauzone und Wallner-Linien (siehe Abb. 3.26).

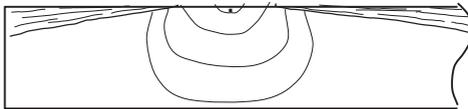


Abb. 3.5: Durch Biegespannung und Fehlstelle an der Oberfläche verursachter, sich öffnender Bruchspiegel (siehe Abb. 3.25).

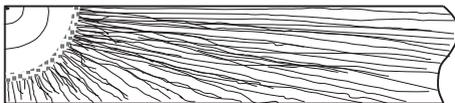


Abb. 3.6: Durch thermische Spannung im Eckbereich verursachter Bruchspiegel (siehe Abb. 3.11).

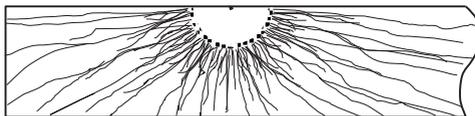


Abb. 3.7: Durch thermische Spannung an der Oberfläche verursachter Bruchspiegel (siehe Abb. 3.12).



Abb. 3.8: Mechanischer Bruch an 19-mm-Floatglas mit deutlich erkennbarem, großem Bruchspiegel und großer Diskontinuität direkt im Eckbereich, von der dieser Bruch ausging.



Abb. 3.9: 3-mm-ESG, Biegebruch, flacher ovalisierter Oberflächen-Bruchspiegel, da die Oberfläche unter Druckspannung steht (nachfolgend beschrieben), 20-fache Vergrößerung.



Abb. 3.10: Flacher, nur noch teilweise vorhandener Bruchspiegel an 6-mm-ESG durch mechanische Zerstörung (spitzer Schlag) verursacht. Anschlagstelle durch leichte Krümelbildung oben mittig am Bruchstück erkennbar, 20-fache Vergrößerung.

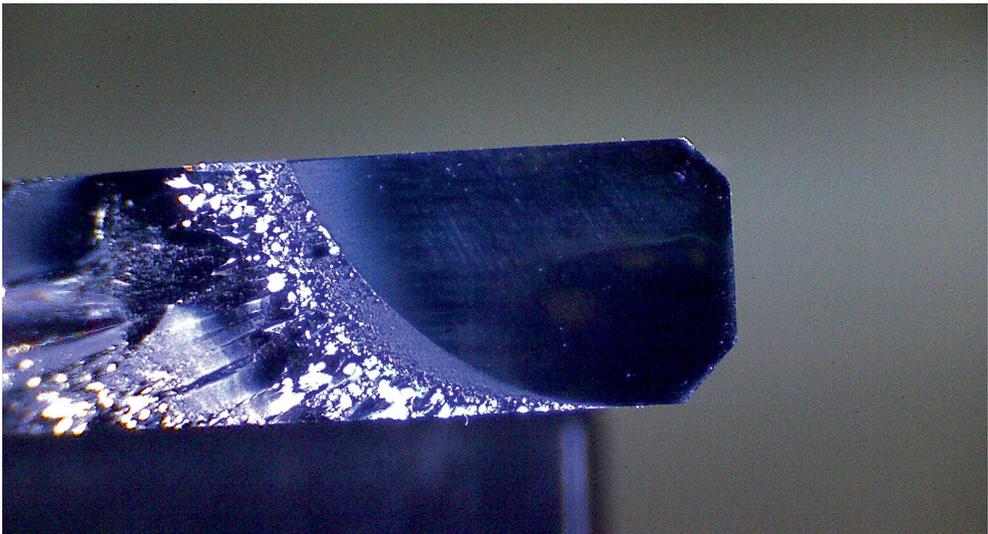


Abb. 3.11: Thermischer Bruch an Stopsol bronze 6 mm, aus der Ecke herauslaufend mit stark geöffnetem Bruchspiegel, was auf relativ geringe Bruchenergie (bei größerer Fehlstelle) hinweist.

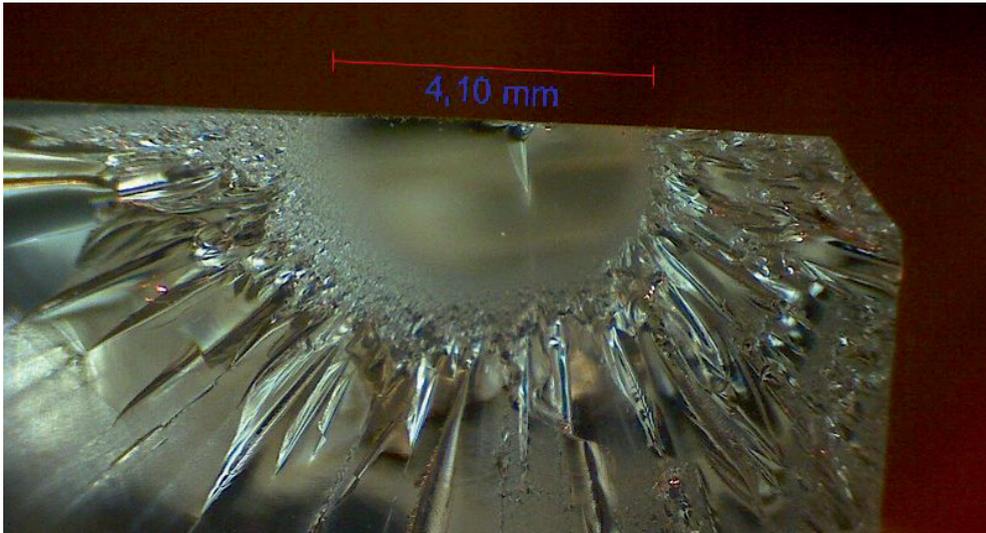


Abb. 3.12: Thermischer Bruch an Floatglas 4 mm, beginnend an einer deutlich erkennbaren Fehlstelle nahe der polierten Kante (rechte Kante), aus der Oberfläche heraus beginnend.

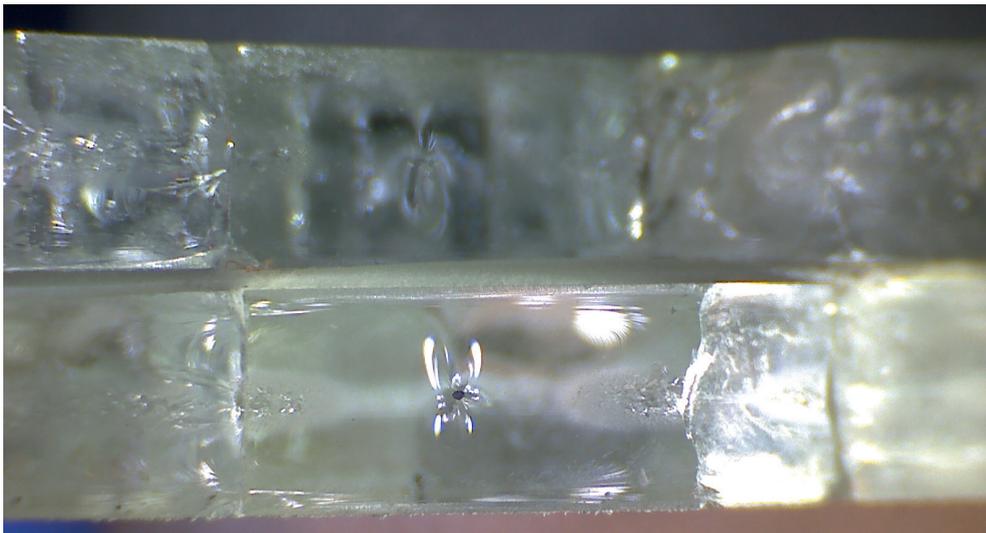


Abb. 3.13: NIS-Bruch bei 4 mm ESG vom deutlich erkennbaren Einschluss aus beginnend. Der Bruchschmetterling ist aufgeklappt, im oberen Bereich zeigt sich das Gegenstück ohne Einschluss. Abbildung mit 20-facher Vergrößerung.



Abb. 3.14: Mechanischer Bruch an Glasstab ( $d= 20\text{ mm}$ ) mit relativ großem Bruchspiegel und erkennbarer Diskontinuität, vor der aus sich der Bruchspiegel gebildet hat.

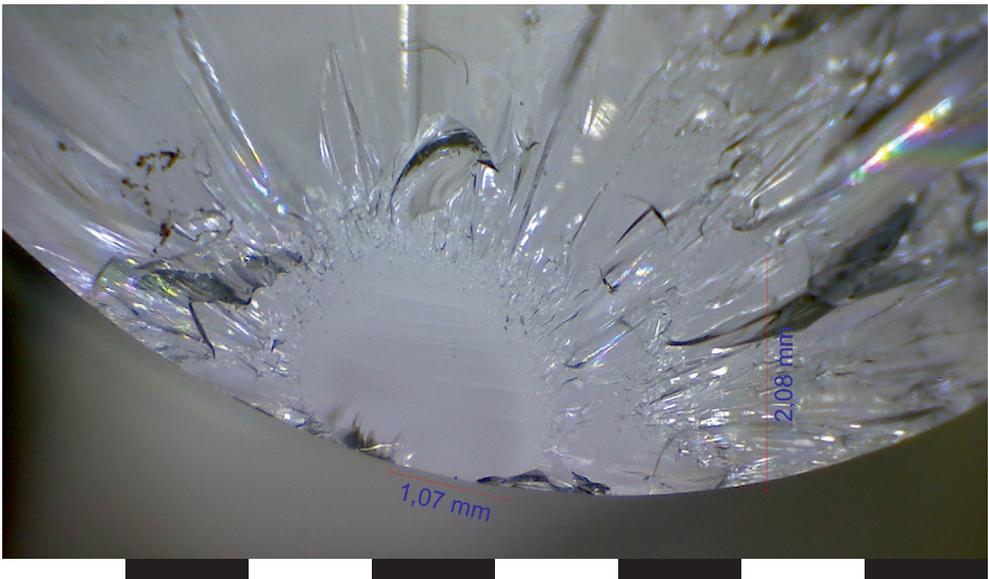


Abb. 3.15: Detailansicht zum obigen Bild 3.14 mit mm-Skala



Abb. 3.16: Bruchspiegel eines Glasstabs. Erkennbare Diskontinuität, von der der Initialbruch ausgeht mit Rauzone und Lanzettbrüchen.

Das Aussehen des Bruchspiegels ist nicht nur allein davon abhängig, wie groß die einwirkende Spannung ist, sondern auch davon, ob im Glas bereits Eigenspannung (Druck- oder Zugspannung) vorhanden ist. Dies ist bei ESG oder TVG der Fall, an deren Oberfläche Druckspannung und im Kern Zugspannung vorhanden ist. Dadurch wird die Form des Bruchspiegels „verzerrt“. Die nachfolgenden Bruchspiegel zeigen die Veränderungen durch derartige Einflüsse.



Oberflächeneigenspannung =  $\sigma_o = 0$

$$\sigma_A = \sigma_{\text{Bruch}}$$

Abb. 3.17: Halbkreisförmiger Bruchspiegel ohne vorhandene Eigenspannungen an der Oberfläche.



Abb. 3.18: Bruchspiegel mit vorhandenen Druckspannungen an der Oberfläche, was zu einem flacheren und breiteren Bruchspiegel führt.

Innere Spannung = Zug    Oberflächenspannung = Druck    (z. B. ESG)

$$\text{Oberflächeneigenspannung } \sigma_o = \sigma_o + \sigma_c \qquad \sigma_A = \sigma_{\text{Bruch}} + \sigma_c$$